

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

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

5/371

2019

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)
Билей П.В., д-р техн. наук, проф., акад. ЛАН Украины (Украина, Львов)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
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. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Малыгин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Северодвинск)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Моисеев Н.А., д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Морозов В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
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)
Романов Е.М., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
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)
Тараканов А.М., д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр. (Россия, Архангельск)
Тельшева 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)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Черная Н.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Беларусь, Минск)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Ширнин Ю.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Штукин С.С., д-р с.-х. наук, проф. (Республика Беларусь, Минск)
Энгельмани Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

BULLETIN
OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Lesnoy Zhurnal

(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

5/371

2019

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)
Biley P.V., Doctor of Engineering, Prof., Member of the Forest Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Lviv)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
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. (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry Sciences, Prof., Member of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Malygin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Severodvinsk)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Moiseev N.A., Doctor of Agriculture, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Morozov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
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)
Romanov E.M., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Tarakanov A.M., Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist (Russia, Arkhangelsk)
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)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Chernaya N.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic Belarus, Minsk)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shirnin Yu.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shtukin S.S., Doctor of Agriculture, Prof. (Republic Belarus, Minsk)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Е.В. Дмитриев, В.А. Козуб, П.Г. Мельник, А.А. Соколов, А.Н. Сафонова.</i> Классификация и оценка состояния смешанных древостоев по аэроизображениям сверхвысокого пространственного разрешения.....	9
<i>О.И. Полякова, Е.А. Жук, С.Н. Горошкевич.</i> Семеношение и структура шишек у клонов мутационных ведьминых метел кедра сибирского.....	25
<i>С.Н. Велисевич, А.В. Попов.</i> Структура разнообразия по вегетативной и генеративной структуре кроны кедра сибирского на плантации с разреженной посадкой.....	35
<i>В.И. Турусов, А.С. Чеканышкин, А.А. Лепёхин.</i> Опыт реконструктивных рубок в лесных полосах Каменной Степи.....	48
<i>М.А. Семёнов, А.А. Высоцкий, В.И. Пащенко.</i> Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями	57
<i>А.С. Ильинцев, А.П. Богданов, Ю.С. Быков.</i> Динамика физических свойств подзолистой почвы на вырубках при естественном зарастании.....	70
<i>Н.А. Тихонова, И.В. Тихонова.</i> Вододерживающая способность хвои в популяциях основных лесообразующих видов хвойных в лесах таежной зоны Сибири.....	83
<i>А.Б. Захаров, В.П. Бессчетнов.</i> Аномалии ветвления березы (<i>Betula</i>) в защитных лесных полосах автомагистралей.....	95
<i>Ю.В. Загурская, Т.И. Сиромля.</i> Сравнительный анализ элементного химического состава побегов <i>Padus avium</i> из техногенно нарушенных экотопов.....	105
<i>N.A. Kutakova, I.A. Morozkova, N.N. Vasiljeva, I.E. Bashkina, Yu.V. Aleksandrova.</i> Phenolic Compounds in Barberry and Wild Rose Fruits.....	115

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>Р.В. Воронов, О.Б. Марков, И.В. Григорьев, А.Б. Давтян.</i> Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций.....	125
<i>С.В. Посыпанов.</i> Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплотовой единицы, расположенной на твердом основании.....	135

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>В.Н. Ермолин, М.А. Баяндин, С.Н. Казицин, А.В. Намятов.</i> Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки.....	148
<i>В.Ю. Чернов, О.В. Цой, Н.А. Магальяс, М.С. Чернова.</i> Устройство для дендрохронологического исследования древесины.....	158

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Ю.Г. Хабаров, В.А. Вешняков, Н.Ю. Кузяков. Получение и применение комплексов лигносульфоновых кислот с катионами железа..... 167
- N.V. Chernaya, V.L. Fleisher, N.I. Bogdanovich. Reduction of Energy Consumption of Paper-And Cardboard Machines while Production of Glued Paper and Cardboard.... 188
- Е.В. Старжинская, А.М. Кряжев, С.И. Третьяков, А.А. Глуханов. Промывка смешанного сульфатного мыла нейтрализованной кислой водой..... 194

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Н.А. Моисеев. Роль лесов в создании экологически комфортной среды обитания и меры для ее реализации..... 203
3. Цогт, Ч. Дугаржав, А.И. Лобанов, С. Гэрэлбаатар, Б. Булган-Эрдэнэ. Возрастная динамика структуры надземной фитомассы культур сосны обыкновенной до 25-летнего возраста в условиях Западного Хэнтэя (Северная Монголия)..... 208
- Е.Б. Карбасникова, О.С. Залывская, О.В. Чухина. Содержание тяжелых металлов в почве и древесной растительности в условиях городской агломерации 216
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>E.V. Dmitriev, V.A. Kozub, P.G. Melnik, A.A. Sokolov, A.N. Safonova.</i> Classification and Assessment of the State of Mixed Forests from Very High Spatial Resolution Airborne Images.....	9
<i>O.I. Polyakova, E.A. Zhuk, S.N. Goroshkevich.</i> Cone Production and Cone Structure in the Clones from Mutational Witches' Brooms of Siberian Stone Pine.....	25
<i>S.N. Velisevich, A.V. Popov.</i> Pattern of Diversity in the Vegetative and Generative Crown Structure of the Siberian Stone Pine on a Seed Orchard with Sparse Tree Planting.....	35
<i>V.I. Turusov, A.S. Chekanyshkin, A.A. Lepyokhin.</i> Experience of the Reconstruction Cutting in the Forest Belts of Kamennaya Steppe.....	48
<i>M.A. Semenov, A.A. Vysotskiy, V.I. Pashchenko.</i> Adaptation Scenarios in Forest Management Due to the Possible Climate Changes.....	57
<i>A.S. Ilintsev, A.P. Bogdanov, Yu.S. Bykov.</i> Physical Properties Dynamics of Podzolic Soil in the Naturally Regenerated Cutover Areas.....	70
<i>N.A. Tikhonova, I.V. Tikhonova.</i> Water-Retaining Capacity of Needles in Populations of the Main Forest-Forming Coniferous Species in the Forests of the Taiga Zone of Siberia.....	83
<i>A.B. Zakharov, V.P. Besschetnov.</i> Anomalies of Birch (<i>Betula</i>) Branching in Protective Forest Belts of Highways.....	95
<i>Yu.V. Zagurskaya, T.I. Siromlya.</i> Comparative Analysis of the Elemental Chemical Composition of <i>Padus avium</i> Shoots from Anthropogenically Disturbed Ecotops..	105
<i>N.A. Kutakova, I.A. Morozkova, N.N. Vasiljeva, I.E. Bashkina, Yu.V. Aleksandrova.</i> Phenolic Compounds in Barberry and Wild Rose Fruits.....	115

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>R.V. Voronov, O.B. Markov, I.V. Grigorev, A.B. Davtyan.</i> Mathematical Model of the Modular Approach for Selection of a System of Machines for Creation and Operation of Forest Plantations.....	125
<i>S.V. Posypanov.</i> Dimensional Determination of a Two-Storied Package Rafting Unit Placed on a Solid Basement.....	135

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>V.N. Ermolin, M.A. Bayandin, S.N. Kazitsin, A.V. Namyatov.</i> Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Soft Wood Waste.....	148
<i>V.Yu. Chernov, O.V. Tsoy, N.A. Magalyas, M.S. Chernova.</i> A Device for Dendrochronological Analysis.....	158

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- Yu.G. Khabarov, V.A. Veshnyakov, N.Yu. Kuzyakov.* Preparation and Application of Complexes of Lignosulfonic Acids with Iron Cations..... 167
- N.V. Chernaya, V.L. Fleisher, N.I. Bogdanovich.* Reduction of Energy Consumption of Paper and Cardboard Machines in Production of Glued Paper and Cardboard..... 188
- E.V. Starzhinskaya, A.M. Kryazhev, A.A. Glukhanov, S.I. Tret'yakov.* Mixed Sulfate Soap Washing with Neutralized Spent Acid 194

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- N.A. Moiseev.* The Role of Forests in Creation of a Comfortable Environment and Measures for Its Implementation..... 203
- Z. Tsogt, Ch. Dugarjav, A.I. Lobanov, S. Gerelbaatar, B. Bulgan-Erdene.* Age-Related Dynamics of Above-Ground Phytomass Structure of Scots Pine Plantations Aged up to 25 in the Western Khentii Mountains of Northern Mongolia..... 208
- E.B. Karbasnikova, O.S. Zalyvskaya, O.V. Chukhina.* Heavy Metals Content in Soils and Woody Vegetation of Urban Area..... 216
-



ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 528.854 (630.4)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.9

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СМЕШАННЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПО АЭРОИЗОБРАЖЕНИЯМ СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ*

Е.В. Дмитриев^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [E-4794-2014](#), ORCID: [0000-0001-5363-3934](#)

В.А. Козуб², соискатель

П.Г. Мельник^{3,4}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [E-7644-2014](#)

А.А. Соколов⁵, канд. физ.-мат. наук; ORCID: [0000-0001-9236-5864](#)

А.Н. Сафонова^{6,7}, аспирант; ResearcherID: [F-6811-2019](#), ORCID: [0000-0002-3290-2717](#)

¹Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, Россия, 119333; e-mail: yegor@mail.ru

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская область, Россия, 141701; e-mail: postbox-kozub@yandex.ru

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 1-я Институтская ул., д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия, 141005; e-mail: melnik_petr@bk.ru

⁴Институт лесоведения Российской академии наук, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская область, Россия, 143030; e-mail: melnik_petr@bk.ru

⁵Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère Université du Littoral Côte d'Opale, Maison de la Recherche en Environnement Industriel 2, 189A, Avenue Maurice Schumann, 59140 Dunkerque, France; e-mail: anton.sokolov@univ-littoral.fr

⁶Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

⁷Soft Computing and Intelligent Information Systems research group, University of Granada, E-18071 Granada, Spain; e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

На сегодняшний день инвазия уссурийским полиграфом признана одним из основных факторов широкомасштабного усыхания сибирских лесов. Появление этого нового организма в пихтарниках серьезно ухудшило их состояние и привело к разнообразным экологическим эффектам в таежных экосистемах. В очагах массового размножения происходит снижение естественного биологического разнообразия, продуктивности лесов, изменение состава и структуры древесного и подчиненных ярусов. В данной работе предлагается методика определения степени поражения древостоев по цветным авиационным изображениям сверхвысокого разрешения (5...10 см на пиксель) с использованием методов машинного обучения. Методика включает в себя этапы предва-

* Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 г., по материалам XIX Международной конференции молодых ученых «Леса Евразии – Южный Урал» (25–30 августа 2019 г., г. Челябинск).

рительной обработки, сегментации крон отдельных деревьев, обучаемой классификации и оценки степени поражения в соответствии со стандартными категориями. Для отработки методики использовались изображения тестовых территорий заповедника «Столбы» (Красноярский край), полученные с помощью аппаратуры, установленной на беспилотные летательные аппараты DJI Phantom 3 Pro и Yuneec Typhoon H в мае 2016 г. Для этапа построения обучающего ансамбля предложена методика фильтрации обучающих данных, которая позволила повысить точность расчетов на этапе классификации. Приведено обоснование разделения трех основных классов объектов на подклассы с использованием кластерного анализа. Наличие подклассов обусловлено наличием различных пород деревьев на тестовом участке. Проведено сравнение эффективности различных методов обучаемой классификации, используемых для решения данной задачи. Показано, что все рассмотренные методы позволяют достичь предельно высокой точности – почти 95 %. Расчет значений параметра каппа показывает, что классификации, проведенные с помощью всех рассмотренных методов, имеют отличное соответствие экспертным данным. Проведен анализ устойчивости обучения. Оценки полной вероятности ошибки, полученные методами кросс-валидации и переклассификации, отличаются менее чем на 0,1 %, что свидетельствует об отсутствии проблемы переобучения. Анализ соотношения точности и скорости обработки показал, что наиболее целесообразно использовать нормальный байесовский классификатор. Высокая точность классификации позволяет получить оценки 6 степеней поражения древостоев на тестовом участке. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для работы региональных служб по управлению лесным хозяйством.

Для цитирования: Дмитриев Е.В., Козуб В.А., Мельник П.Г., Соколов А.А., Сафонова А.Н. Классификация и оценка состояния смешанных древостоев по аэроизображениям сверхвысокого пространственного разрешения // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 9–24. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.9

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-01-00215 «Исследование оперативных возможностей гиперспектральных технологий ДЗЗ для решения региональных задач с использованием действующих и перспективных ГСК космического базирования».

Ключевые слова: дистанционное зондирование, изображения сверхвысокого разрешения, лес, оценка состояния лесов, деградация лесов, стволовые вредители, распознавание образов, тематическая обработка изображений.

Введение

В настоящее время происходит широкомасштабное поражение лесов на территории Российской Федерации, и одним из основных факторов этого процесса является уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandford) – инвазивный вредитель-дендрофаг пихты [1, 6]. Данный вид стволовых вредителей изначально был обнаружен на территории Дальнего Востока на Сахалине, однако в последние годы ареал его обитания расширился и охватывает территорию Южной Сибири и европейскую часть России [1, 2]. Так, например, на территории Кемеровской области в период с 2004 по 2010 г. площадь очагов массового размножения уссурийского полиграфа увеличилась в 400 раз [2]. На сегодняшний день уссурийский полиграф наблюдается уже в 47 административных районах, в том числе Ленинградской и Московской областях [7, 8].

В основном массовому поражению уссурийским полиграфом подвержены различные виды пихты: белокорая, сахалинская, цельнолистная и бальзами-

ческая [3, 8, 16]. К повреждаемым деревьям (хотя и в гораздо меньшей степени) также относятся и некоторые другие виды семейства сосновых: ель сибирская, ель европейская, сосна обыкновенная, сосна кедровая корейская, лиственница сибирская [3, 8, 16, 17]. В первую очередь уссурийский полиграф заселяет деревья, поврежденные вследствие естественных и антропогенных факторов. Поражение здоровых деревьев говорит о недостатке пищевой базы при резком повышении численности вредителя.

Пихтовые леса являются не только ценным источником древесины, но и важным сырьем для медицинской промышленности. Появление уссурийского полиграфа значительно ухудшает состояние древостоев, приводит к разнообразным негативным экологическим эффектам, среди которых: снижение биоразнообразия, изменение состава и структуры светового и древесного ярусов, ухудшение микроклимата. Полиграф также участвует в распространении связанных вредителей и переносе фитопатогенных грибов, влияющих на сукцессии растительности. Описанные эффекты создают неблагоприятные условия для естественного возобновления пихтовой части полога и угрозу выпадения из состава насаждений пихты сибирской. С экономической точки зрения ущерб от инвазии жука уссурийского полиграфа значителен [3, 5].

В большинстве случаев возможности своевременного получения информации о новых очагах массового размножения уссурийского полиграфа сильно ограничены. В связи с этим сейчас происходит большой рост расстроенных пихтовых насаждений, непригодных для лесозаготовок и представляющих собой пожарную опасность. Оценка поражения лесов на данный момент осуществляется путем непосредственного выезда соответствующих специалистов на выборочные участки древостоя, которые могут считаться репрезентативными. По таким репрезентативным участкам дается оценка всего древостоя. В связи с тем что количество ресурсов, привлекаемых для таких работ, немного, указанные оценки обладают очень малой точностью. Автоматизация этих работ может сократить затраты на обнаружение очагов вредителя и повысить качество оценок.

В данной работе исследуется возможность получения точных оценок поражения древостоев дистанционными методами с использованием высокодетальных авиационных изображений. Подобного рода задача рассматривалась в работе [18]. В статье описывается двухэтапный метод определения степени поражения древостоев с использованием перспективной методики на основе сверточных нейронных сетей. Основной спорный момент касается постановки задачи. Классы поврежденных деревьев распознаются по их образам при рассмотрении сверху как отдельные объекты. Этапу распознавания предшествует поиск центров крон отдельных деревьев с использованием фильтра Гаусса, который имеет низкую точность: многие кроны либо пропускаются, либо объединяются с соседними в одну крону. В этом случае использование сверточных нейронных сетей, вероятно, потребует неоправданных вычислительных затрат.

Объекты и методы исследования

Методика, предлагаемая в данной работе, основана на альтернативном подходе, который включает в себя сегментацию крон отдельных деревьев и бо-

более гибкий расчет степени поражения отдельных деревьев на основе результатов автоматизированной попиксельной классификации компонент лесного полога внутри выделенных сегментов. Для проведения численных экспериментов были использованы те же данные, что и в [18]. Для классификации пикселей изображения использовались различные классические методы: нормальный байесовский классификатор, метод k ближайших соседей и многоклассовый метод опорных векторов с гауссовым ядром.

Предлагаемый подход тематической обработки авиационных изображений сверхвысокого разрешения можно разделить на несколько этапов.

Этап 1. Сегментация крон отдельных деревьев на изображении лесного полога. Для решения данной задачи используемые изображения должны иметь достаточно высокое пространственное разрешение – размер пикселя должен быть существенно меньше характерного размера кроны на интересующем нас участке. В ходе реализации данного этапа на изображении выделяются контуры, представляющие собой границы крон отдельных деревьев. Пиксели вне контуров соответствуют межкроновому пространству. Для решения этой задачи может быть использовано как визуальное дешифрирование, так и один из известных алгоритмов автоматизированной сегментации лесного полога, например алгоритм, предложенный в работе [14]. Следует отметить, что при высокой сомкнутости полога указанный алгоритм и другие подобные алгоритмы могут иметь существенные ошибки, и в этом случае для уточнения контуров необходимо использовать визуальный анализ. Усовершенствование алгоритмов сегментации, применяемых на данном этапе, по сути, является отдельной достаточно сложной задачей.

Этап 2. Проверка однородности пикселей внутри контура. Однородность означает, что пиксели одного контура при заданном наборе признаков относятся преимущественно к одному классу. Для проверки выдвинутого предложения используется кластерный анализ, задачей которого является разделение имеющихся неклассифицированных данных на некоторое число классов (оно может указываться исследователем или определяться автоматически), исходя из заданных критериев сходства.

В нашей работе использовалась эффективная модификация метода k -средних [9, 15], состоящая в совместном использовании пакетного и последовательного алгоритмов. Задачей данного метода является разделение набора измерений на заданное число кластеров таким образом, чтобы максимизировать функционал, представляющий собой сумму расстояний от элементов выборки до центров соответствующих им классов

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in P_i} (x_j - c_i)^2,$$

где k – количество кластеров, $x_j \in P_i$ – элемент кластера P_j , c_i – центроид кластера P_i .

Качество кластеризации данных зависит от того, насколько удачно было выбрано количество кластеров k . Для визуализации использовалась горизонтальная гистограмма «силуэт» [11]. Эта гистограмма строится для каждого кластера, длина столбиков определяется формулой:

$$s_n(i) = \frac{\min_m \{b_m(i)\} - a(i)}{\max \{a(i), \min(b_m(i))\}}, (m=1, \dots, k, m \neq n), \quad (1)$$

где $a(i)$ – среднее расстояние от i -го элемента n -го кластера до каждого из остальных элементов этого кластера; $b_m(i)$ – среднее расстояние до элементов m -го кластера ($m: m \neq n$). Из формулы (1) следует, что значение каждого столбца может быть от -1 до 1 , и чем оно выше, тем лучше вписывается объект в свой кластер по сравнению с остальными кластерами.

Этап 3. Обучаемая классификация пикселей и объектов внутри контуров по спектральным признакам. При классификации пикселей количество рассматриваемых классов может быть различным. При этом обязательно должны присутствовать следующие 3 класса: зеленые фитоэлементы деревьев (листва/хвоя), ветви и стволы, прочие объекты. При наличии внутри контура здорового дерева основная часть пикселей будет классифицирована как листва или хвоя, для пораженного дерева будут доминировать пиксели, классифицированные как ветви и стволы. Количество рассматриваемых классов может быть расширено, например, деревья могут быть классифицированы по породному составу и возрастным классам. При построении обучающей базы данных наряду с наземными измерениями необходимо учитывать результаты анализа, осуществляемого на этапе 2.

Для решения этой задачи нами использовались три базовых классификатора: нормальный байесовский классификатор (НБК), метод k -ближайших соседей (КБС) и многоклассовый метод опорных векторов (МОВ) [11, 13], имеющих различную постановку задачи, точность и вычислительную сложность.

При реализации НБК предполагается, что признаки распознаваемых объектов имеют нормальное распределение. Обучение данного классификатора состоит в получении оценок $\hat{\mu}_y$, векторов математических ожиданий и $\hat{\Sigma}_y$, ковариационных матриц для каждого распознаваемого класса $y \in Y$. Пусть x – классифицируемый вектор признаков, $class(x)$ – алгоритм классификации (функция, отображающая пространство признаков на конечное множество наименований объектов). Тогда алгоритм НБК имеет вид:

$$class(x) = \arg \max_{y \in Y} \left(\ln \det(\hat{\Sigma}_y^{-1}) - (x_y - \hat{\mu}_y)^T \hat{\Sigma}_y^{-1} (x - \hat{\mu}_y) \right).$$

Метод КБС определяет класс распознаваемого объекта на основании информации о ближайших к нему объектах, которые находятся в обучающей выборке. Пусть $u_i(x)$, ($i=1, \dots, k$) – наименования k объектов, наиболее близких к классифицируемому вектору признаков x . Тогда алгоритм КБС имеет вид:

$$class(x) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^k [u_i(x) = y],$$

где квадратные скобки означают индикаторную функцию. В нашей работе для определения близости используется евклидова метрика. Для увеличения скорости поиска используется модификация КБС на основе kd -деревьев [12].

В классическом варианте метода опорных векторов решается задача бинарной классификации. При обучении данного метода решается задача максимизации расстояния между дискриминантными гиперплоскостями, которые проходят через несколько граничных векторов признаков распознаваемых классов из обучающего множества. Эти точки называются опорными векторами. В случае неразделимых классов дискриминантные гиперплоскости проходят через опорные точки с заданной допустимой погрешностью.

Решающее правило для бинарного МОВ имеет вид:

$$class(x) = \text{sign} \left(\sum_{x_i \in S} \lambda_i y_i (x_i, x) - \omega_0 \right),$$

где S – множество опорных векторов, λ_i – отличные от нуля параметры (коэффициенты Лагранжа), значения которых определяются на этапе обучения.

Для решения задач нелинейной классификации вместо скалярных произведений (x_i, x) используется специальное преобразование $K(x_i, x)$, называемое ядром. В нашей работе используется гауссово ядро:

$$K(x_i, x) = \exp \left(-\|x_i - x\|^2 / (2\sigma^2) \right).$$

Для перехода к случаю многоклассовой классификации используется метод декодирования, известный в зарубежной литературе как ECOC (Error Correcting Output Codes) [10]. Метод основан на минимизации средневзвешенных потерь при решении серии из L задач бинарной классификации, определяемых некоторой заданной матрицей кодирования C . Алгоритм классификации имеет вид:

$$class(x) = \arg \min_{y_i \in Y} \frac{\sum_{j=1}^L |C_{ij}| g_{y_i}(C_{ij}, S_j(x))}{\sum_{j=1}^L |C_{ij}|},$$

где g_{y_i} – функция потерь для бинарного МОВ, $S_j(x)$ – направленное расстояние от классифицируемого вектора x до дискриминантной поверхности, C_{ij} – элемент кодовой матрицы [10]. В нашем случае $g_{y_i}(s) = \max(0, 1 - y_i s)$, а в качестве кодовой матрицы используется кодирование по принципу «каждый против каждого» [10].

Этап 4. Модель оценок степени поражения. На данном этапе для каждого контура из тестового участка производится оценка поражения на основе результатов классификации пикселей этого контура, полученных на этапе 3. Введем обозначения. Пусть:

X_1 – количество пикселей, отнесенных к классу зеленых фитоэлементов;

X_2 – количество пикселей, отнесенных к классу «ветви и стволы»;

X_3 – количество пикселей, отнесенных к классу «прочие объекты».

Если $X_3 \geq X_1 + X_2$, то полагаем, что оконтуренный объект не является деревом, иначе полагаем, что оконтуренный участок является деревом со степенью поражения:

$$t = \frac{X_2}{X_2 + X_1} \cdot 100 \%$$

При решении различных практических задач традиционно оперируют дискретными характеристиками состояния древостоев, определяемых по заданному набору признаков. Так, например, для лесов Московской области в работе [4] были введены 4 категории жизненного состояния: живые (без признаков ослабления), ослабленные, усыхающие и сухостой. Позже (для сибирских лесов) были предложены 6 категорий [5] по степени повреждения уссурийским полиграфом: 1 – здоровые, 2 – ослабленные, 3 – сильно ослабленные, 4 – усыхающие, 5 – свежий сухостой, 6 – старый сухостой.

Для пересчета степени поражения в категорию поражения нами использовалась линейная шкала. Такой подход был выбран в силу ограниченности используемых данных. Для нахождения более точного вида функции шкалирования необходимо провести дополнительные наземные исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Для отработки методики использовались изображения территории заповедника «Столбы», который находится вблизи г. Красноярска. Для получения изображений использовалась бесшовная ортомозаика цветных изображений с пространственным разрешением 5...10 см на пиксель, полученных в результате съемки с управляемого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 3 Pro со встроенной камерой в июле 2016 г. и с гексакоптера Yuneec Typhoon H (с камерой CGO3+) в мае 2016 г. Положение тестовых участков на территории заповедника представлено на рис. 1.

Большая часть территории заповедника представляет собой средний горный пояс (500...800 м над уровнем моря), покрытый смешанным лесом с преобладанием пихты. Первое появление уссурийского полиграфа в природном заповеднике «Столбы» было зарегистрировано в 2011 г., и, по полученным в настоящее время оценкам, ущерб, нанесенный жуком, составляет около 25...30 % от площади, занимаемой пихтой. Породный состав тестового участка представлен семью основными таксонами в разных пропорциях: сосна (40 %), пихта (25 %), лиственница, кедр, ель, береза и осина.

Для детальной демонстрации результатов из имеющихся данных был выбран относительно небольшой тестовый участок, на котором достаточно хорошо представлены деревья различных пород и степеней поражений. Для исследуемой территории мы имели только общие наземные данные о породном составе и степени поражения. При проведении визуального анализа снимков наблюдалось разделение здоровых и пораженных деревьев минимум на 2 класса. Таким образом, было выдвинуто предположение о возможности выделения следующих 5 классов:

- здоровые деревья типа 1 (class A);
- здоровые деревья типа 2 (class B);
- пораженные деревья типа 1 (class C);
- пораженные деревья типа 2 (class D);
- прочие объекты (class E).

Контуры, используемые для формирования обучающей выборки, представлены на рис. 2. Общие данные о количестве контуров и пикселей каждого класса, которые попали в выборку, представлены в табл. 1.

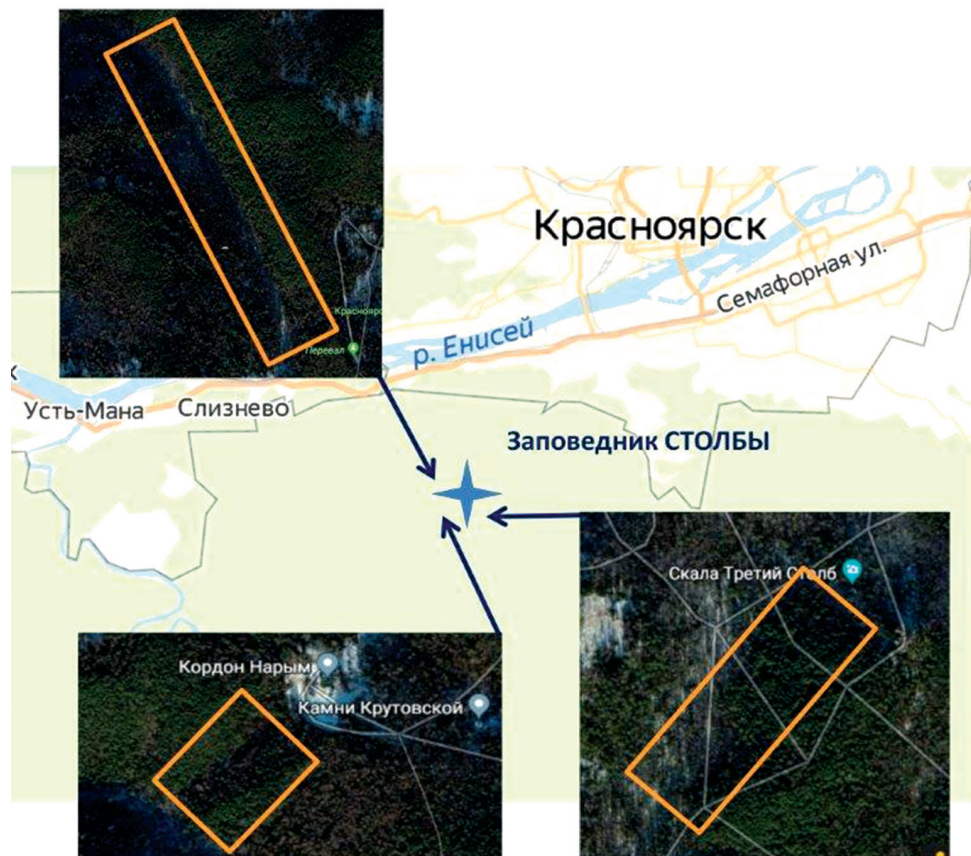


Рис. 1. Тестовые участки на территории заповедника «Столбы» (Красноярский край)
Fig. 1. Sample plots on the territory of the “Stolby” Nature Reserve (Krasnoyarskiy Region)

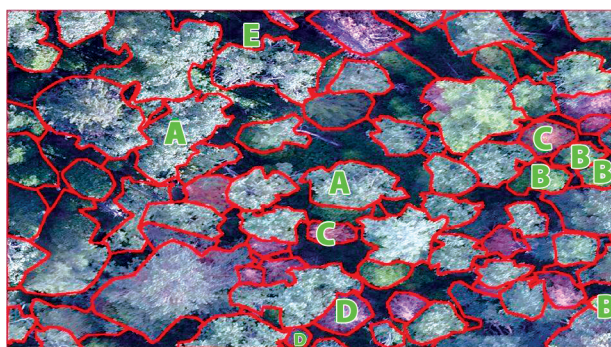


Рис. 2. Сегментация крон на тестовом изображении. Буквами отмечены контуры, пиксели которых использовались для построения обучающей выборки в соответствии с рассматриваемыми классами

Fig. 2. Segmentation of the tree crowns in the test image. The letters denote the contours which were used as sources of pixels for forming of the learning sample in accordance with the examined classes

Таблица 1

Параметры обучающей выборки

Класс	Кол-во контуров для обучающей выборки	Общее кол-во пикселей в контурах
A	2	70 259
B	4	26 347
C	2	15 244
D	2	11 520
E	1	43 596

При съемке разные компоненты полога располагались под разным углом к камере и имели разную освещенность. Из-за этого яркости разных частей одного объекта могут сильно различаться, однако отношение между яркостями разных каналов должны сохраниться. Поэтому целесообразно преобразовать яркости пикселей обучающей выборки таким образом, чтобы все они имели одинаковую интегральную яркость, а именно: для каждого пикселя поделить яркость каждого канала на интегральную яркость. Интегральная яркость рассчитывалась с помощью метода трапеций, центральные длины волн *RGB*-каналов были заданы следующим образом: красный – 660 нм, зеленый – 560 нм, синий – 485 нм.

Следует заметить, что интегральная яркость является нормой на данном подпространстве векторов яркостей пикселей пространства $\mathbb{R}^3$. Поэтому, про-нормировав яркости всех пикселей, входящих в выборку, мы тем самым снизили размерность пространства, и, следовательно, всю информацию о яркости каждого пикселя можно получить, взяв две любые нормированные яркости из трех. В дальнейшем будут использоваться нормализованные яркости *R*- и *G*-каналов.

Для проверки предположения о разделимости классов «здоровые деревья» и «пораженные деревья» на подклассы – мы провели численные эксперименты с использованием метода *k*-средних. Схема расчетов состояла в следующем. Обучающие данные для классов A и B объединялись в единое множество, и далее к нему применялся метод *k*-средних при *k* = 2. В случае удачной кластеризации делается вывод, что по указанным признакам класс «здоровые деревья» разделяется на 2 подкласса. Аналогичным образом проводится тест для классов C и D.

Результаты этого исследования представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3а представлены пиксели контуров, по которым формировались обучающие данные для классов A и B. В верхней части представлена часть *RGB*-изображения, соответствующая данным пикселям. В нижней части – результат кластерного анализа: красный – класс A, синий – класс B.

Как мы можем видеть, результаты кластерного анализа полностью согласуются с первоначальным предположением о разбиении на два подкласса – более 90 % пикселей было классифицировано верно. Кроме того, следует отметить, что основные артефакты расположены по краям контуров, и, скорее всего, это свидетельствует о наличии незначительных ошибок при сегментации крон деревьев. Аналогичные выводы мы можем сделать и для классов C и D (рис. 4а).

Качество кластеризации подтверждается также и силуэтами кластеров, представленными на рис. 3б и 4б. Как можно видеть, отрицательные значения отсутствуют, силуэты имеют форму, близкую к прямоугольной, и соотношение количества столбиков для каждой пары классов согласуется с данными табл. 1. Эксперименты с большим числом подклассов показали значительно худший результат, таким образом, рассмотрение указанных выше 5 классов мы сочли обоснованным.

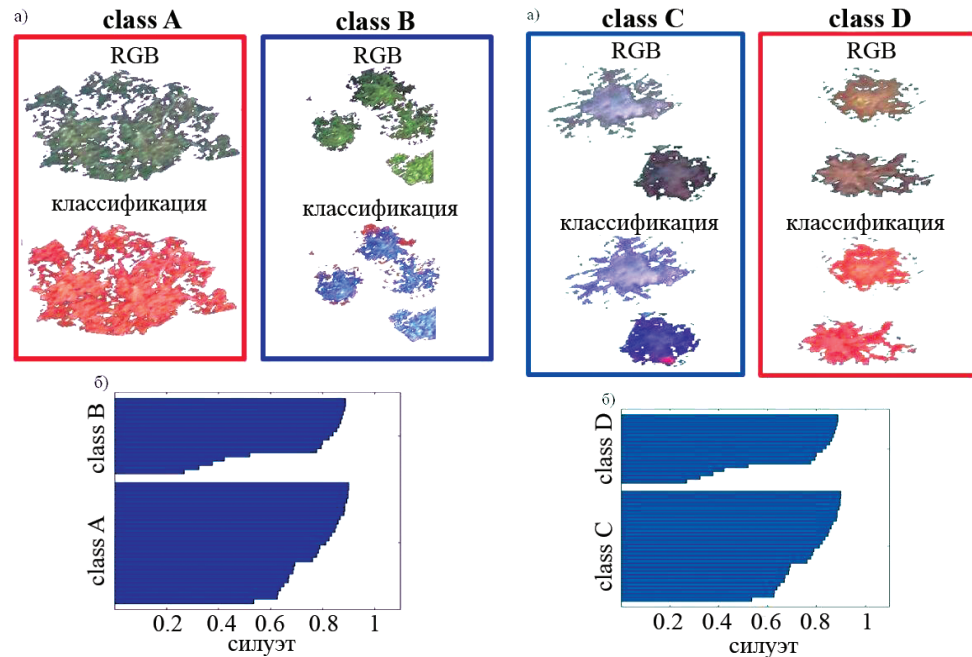


Рис. 3. Обоснование разделимости класса здоровых деревьев на подклассы – тип 1 и тип 2: а) результаты кластерного анализа методом k -средних при разделении на 2 класса; б) силуэты кластеров

Fig. 3. Substantiation of discriminability of the vigorous trees class to the subclasses type 1 and type 2: a) results of the cluster k-means analysis by fractionation to 2 classes; b) shadow figures of the clusters

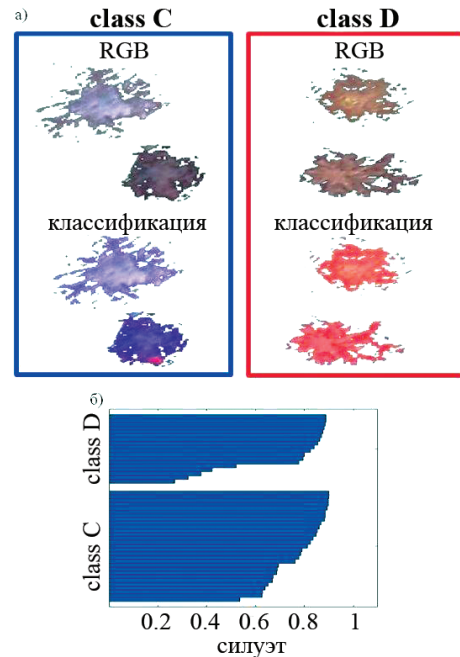


Рис. 4. Обоснование разделимости класса пораженных деревьев на подклассы – тип 1 и тип 2: а) результаты кластерного анализа методом k -средних при разделении на 2 класса; б) силуэты кластеров

Fig. 4. Substantiation of discriminability of the affected trees class to the subclasses type 1 and type 2: a) results of the cluster k-means analysis by fractionation to 2 classes; b) shadow figures of the clusters

Полученные таким образом обучающие данные были использованы для проведения обучаемой попиксельной классификации тестового изображения. Рассмотрено 3 различных типа классификаторов, описанных выше: НБК, КБС и МОВ, для которых проведено сравнение точности и скорости расчета. Результаты классификации контуров крон деревьев приведены на рис. 5. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с визуальным анализом RGB -изображения. Контуры пораженных деревьев классифицированы верно, исключение составляют 2 узких контура, экспертная классификация является спорной. Можно также заметить, что несколько контуров в левой

части изображений были отнесены к классу Е, что является положительным результатом, поскольку они соответствуют породе, которая не была включена в обучающую базу данных.

Для оценки ошибок рассматриваемых алгоритмов классификации использовались методы кросс-валидации k -fold [13] и переклассификации (применение классификатора непосредственно к полной обучающей выборке). Близость ошибок переклассификации и кросс-валидации свидетельствует об устойчивости обучения и определяет способность к обобщению.

Общими характеристиками качества обучаемой классификации являются полная вероятность ошибки ТЕ и каппа Козна κ [13]. Значения этих параметров для 3 рассматриваемых методов классификации представлены в табл. 2. ТЕ определяется как отношение количества ошибочно классифицированных объектов к общему количеству объектов, TE_{res} означает ТЕ, полученную методом переклассификации, а TE_{cv} означает ТЕ, полученную методом кросс-валидации. По данным табл. 2 мы можем заключить, что все рассмотренные методы имеют достаточно высокую точность – 95 %. Близость значений TE_{res} и TE_{cv} свидетельствует об отсутствии проблемы переобучения для всех классификаторов.

Параметр κ представляет собой меру фактического согласия между экспертными данными и результатами автоматической классификации. κ может принимать значения от -1 до 1 . Нулевое значение соответствует полностью случайной классификации. Принято, что значения κ можно шкалировать следующим образом: $[1; 0,8)$ – отлично; $[0,8; 0,6)$ – хорошо; $[0,6; 0,4)$ – приемлемо; $[0,4; 0,2)$ – посредственно; $[0,2; 0,0)$ – плохо; $[0,0; -1]$ – очень плохо. Таким образом, все рассмотренные методы показали отличное соответствие экспертным данным.

Таблица 2

Общие характеристики классификации

Общие характеристики качества	Методы		
	НБК	КБС	МОВ
TE_{res}	0,056	0,054	0,056
TE_{cv}	0,058	0,056	0,056
κ	0,909	0,925	0,922

Значения поклассовых ошибок представлены в табл. 3. Параметр ОЕ означает ошибку пропуска

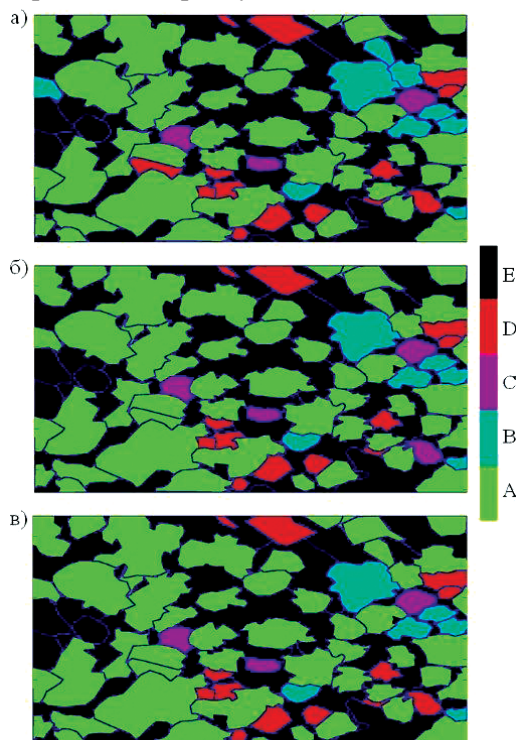


Рис. 5. Классификация контуров крон деревьев различными методами: а) нормальный байесовский классификатор (НБК); б) метод k -ближайших соседей (КБС); в) многоклассовый метод опорных векторов (МОВ)

Fig. 5. Classification of the tree crowns by the various methods: а) normal Bayes classifier, б) k -nearest neighbors algorithm, в) multi-class support vector machine

цели, которая показывает, какую долю объектов заданного экспертом класса классификатор отнес к другим классам. СЕ – ошибка ложной тревоги, показывающая долю объектов, которые классификатор отнес к некоторому заданному классу, но которые, по мнению эксперта, относятся к другим классам.

Таблица 3

Поклассовые ошибки

Метод	Ошибки	Класс пораженных деревьев				
		А	В	С	Д	Е
НБК	ОЕ	0,078	0,099	0,032	0,028	0,044
	СЕ	0,053	0,162	0,011	0,072	0,041
КБС	ОЕ	0,032	0,146	0,025	0,036	0,049
	СЕ	0,074	0,083	0,014	0,046	0,018
МОВ	ОЕ	0,029	0,156	0,027	0,033	0,054
	СЕ	0,080	0,082	0,013	0,048	0,014

Наилучшим образом классифицируются пораженные деревья обоих типов. Различие ошибок для рассматриваемых методов в основном обусловлено разным соотношением между ОЕ и СЕ. Основная часть ошибок возникает при разделении типов 1 и 2. Таким образом, задача оценки степени поражения безотносительно породного состава может быть решена с большей точностью.

Для сравнения вычислительной эффективности классификаторов мы приводим табл. 4, в которой указаны относительные скорости обучения и обработки. Несмотря на то что КБС и МОВ показали несколько меньшие ошибки, вносимые улучшения очевидно являются не столь существенными по сравнению с различиями в скорости обработки. Таким образом, для решения данной задачи достаточно использовать более эффективный НБК.

Таблица 4

Временные затраты на этапе классификации

Временные затраты	НБК	КБС	МОВ
Время обучения (усл. ед.)	1	2,5	900
Время обработки (усл. ед.)	1	10	400

Результаты оценки степени поражения для различных методов представлены в табл. 5 и на рис. 6.

Таблица 5

Распределение деревьев на тестовом участке по категориям поражения

Метод	Категории поражения						МП
	1	2	3	4	5	6	
НБК	53	2	0	1	3	13	33
КБС	54	2	0	0	3	13	33
МОВ	55	2	0	0	3	13	32

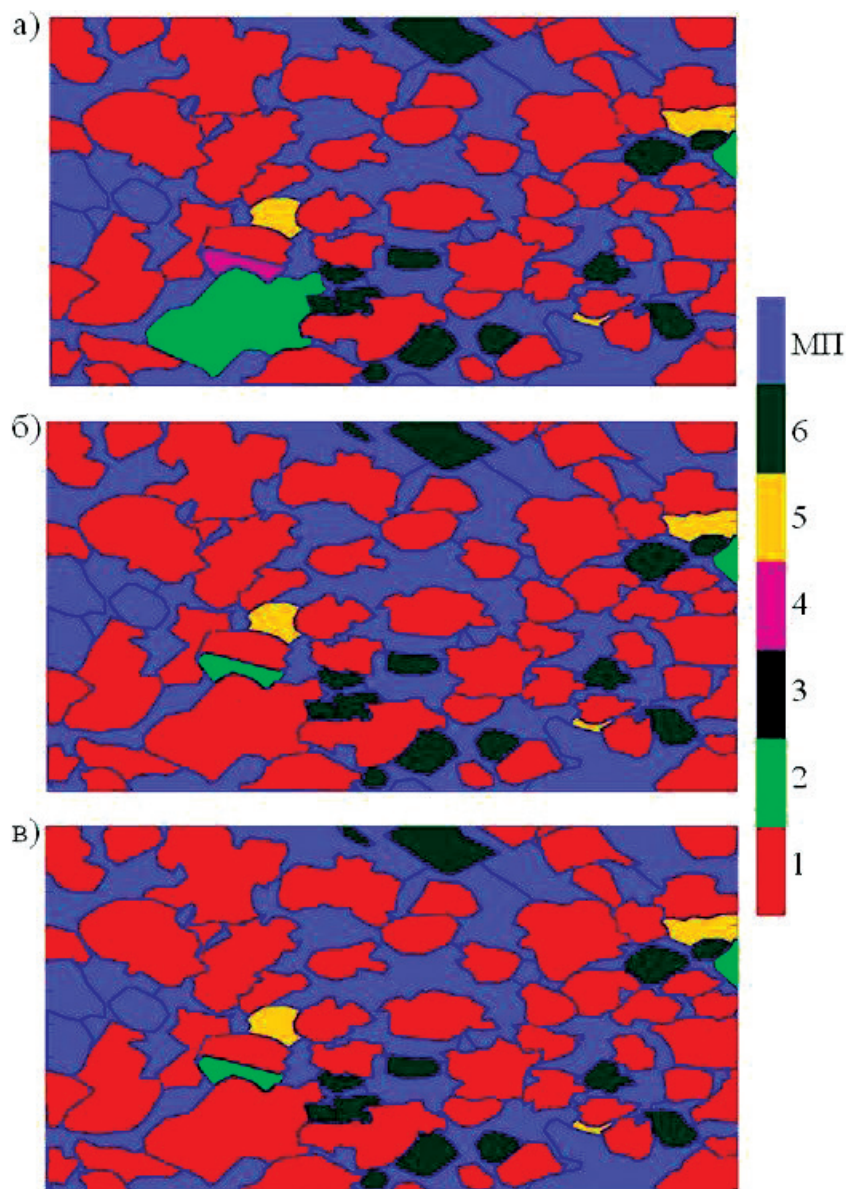


Рис. 6. Оценка степени поражения при использовании различных классификаторов: а) НБК; б) КБС; в) МОВ. Цифрами на цветовой шкале обозначены категории поражения: 1 – здоровые; 2 – ослабленные; 3 – сильно ослабленные; 4 – усыхающие; 5 – свежий сухостой; 6 – старый сухостой. МП означает межкروновое пространство

Fig. 6. Assessment of extent of injury by the use of various classifiers: а) normal Bayes classifier, б) k -nearest neighbors algorithm, в) multi-class support vector machine. The figures on the color scale indicate the categories of infestation: 1 – vigorous, 2 – weakened, 3 – severely weakened, 4 – drying out, 5 – immature snag, 6 – old snag. MP denotes the inter-crown space

Более 50 % тестового участка занято здоровыми деревьями. Основная часть пораженных деревьев отнесена к категории старого сухостоя. При срав-

нении данных на рис. 5 и 6 можно видеть, что категории 6 соответствует класс пораженных деревьев типа 2, при этом категории 5 соответствуют и тип 1, и тип 2 пораженных деревьев. Это свидетельствует о том, что при наличии подробных наземных данных методика распределения степени поражения по категориям 5 и 6, скорее всего, будет скорректирована введением характерных спектральных признаков старого и свежего сухостоя. Однако при имеющихся данных валидировать такую методику не представляется возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акулов Е.Н., Кулинич О.А., Пономарев В.Л. Полиграф уссурийский – новый инвазийный вредитель хвойных лесов России // Защита и карантин растений. 2011. № 7. С. 34–36. [Akulov E.N., Kulinich O.A., Ponomarev V.L. *Poly-graphus proximus* is a New Invasive Pest of Softwood Forests in Russia. *Zashchita i karantin rasteniy*, 2011, no. 7, pp. 34–36].
2. Гниненко Ю.И., Клюкин М.С. Уссурийский короед на территории России // Защита и карантин растений. 2011. № 11. С. 32–34. [Gninenko Yu.I., Klyukin M.S. *Polygraphus proximus* in the Territory of Russia. *Zashchita i karantin rasteniy*, 2011, no. 11, pp. 32–34].
3. Керчев И.А. Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии // Российский журнал биологических инвазий. 2014. № 2. С. 80–94. [Kerchev I.A. Ecology of Four Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) in the West-Siberian Region of Invasion. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions], 2014, no. 2, pp. 80–94].
4. Кобельков М.Е., Чуканов М.А., Хотин Д.В. Категории состояния основных лесообразующих пород Московской области. М., 2000. 40 с. [Kobel'kov M.E., Chukanov M.A., Khotin D.V. Status Categories of the Main Forest Forming Species of the Moscow Region. Moscow, 2000. 40 p.].
5. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Пашенова Н.В., Демидко Д.А., Пет'ко В.М., Баранчиков Ю.Н. Уссурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование поврежденных насаждений): метод. пособие. Томск; Красноярск, 2015. 48 с. [Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Pashe-nova N.V., Demidko D.A., Pet'ko V.M., Baranchikov Yu.N. *Four-Eyed Fir Bark Beetle in Siberian Forests (Distribution, Biology, Ecology, Detection and Survey of Damaged Stands): Study Guide*. Tomsk, 2015. 48 p.].
6. Криволицкая Г.О. Семейство Scolytidae (Ipidae) – Короеды / Определитель насекомых Дальнего Востока России. Т. 3, ч. 3. Владивосток: Дальнаука, 1996. С. 312–317. [Krivolitskaya G.O. Family Scolytidae, Bark Beetles. *Key to the Insects of the Russian Far East*. Vol. 3, part 3. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1996, pp. 312–317].
7. Мандельштам М.Ю., Поповичев Б.Г. Аннотированный список видов короедов (Coleoptera, Scolytidae) Ленинградской области // Энтомологическое обозрение, 2000. Т. 79, вып. 3. С. 599–618. [Mandel'shtam M.Yu., Popovichev B.G. Annotated List of Bark Beetles (Coleoptera, Scolytidae) of Leningrad Province. *Entomologicheskoye obozreniye* [Entomological Review], 2000, vol. 79, iss. 3, pp. 599–618].
8. Чилахсаева Е.А. Первая находка *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Scolytidae) в Московской области // Бюлл. Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2008. Т. 113, вып. 6. С. 39–42. [Chilakhsaeva E.A. First Record of *Polygraphus proximus* (Coleoptera: Scolytidae) in Moscow Province. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskii* [Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series], 2008, vol. 113, iss. 6, pp. 39–42].

9. Barbakh W., Fyfe C. Online clustering algorithms. *International Journal of Neural Systems*, 2008, vol. 18, no. 3, pp. 1–10.
10. Dietterich T.G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1995, vol. 2, pp. 263–286.
11. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. *Pattern Classification*. 2nd Edition. New York, NY, Wiley-Interscience, 2000. 688 p.
12. Freidman J.H., Bentley J.L., Finkel R.A. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1977, vol. 3, iss. 3, pp. 209–226. DOI: [10.1145/355744.355745](https://doi.org/10.1145/355744.355745)
13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. New York, NY, Springer, 2001. 536 p. DOI: [10.1007/978-0-387-21606-5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-21606-5)
14. Jing L., Hua B., Noland T., Li J. An Individual Tree Crown Delineation Method Based on Multi-Scale Segmentation of Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 70, pp. 88–98.
15. MacQueen J.B. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Vol. 1: Statistics. Berkeley, CA, University of California Press, 1967, pp. 281–297.
16. Nijima Y. Revision und Neubeschreibung der Polygraphus-Arten (Coleoptera, Ipidae) in Japan. *Insecta Matsumurana*, 1941, vol. 15(4), pp. 123–135.
17. Nobuchi A. Bark-Beetles Injurious to Pine in Japan. *Bulletin of the Government Forest Experiment Station*, 1966, vol. 185, pp. 1–49.
18. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Y., Herrera F. Detection of Fir Trees (*Abies sibirica*) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11(6), art. 643, pp. 1–19. DOI: [10.3390/rs11060643](https://doi.org/10.3390/rs11060643)

CLASSIFICATION AND ASSESSMENT OF THE STATE OF MIXED FORESTS FROM VERY HIGH SPATIAL RESOLUTION AIRBORNE IMAGES*

E.V. Dmitriev^{1,2}, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Scientist; ResearcherID: [E-4794-2014](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934), ORCID: [0000-0001-5363-3934](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934)

V.A. Kozub², External Student

P.G. Melnik^{3,4}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0001-9236-5864)

A.A. Sokolov⁵, Candidate of Physics and Mathematics; ORCID: [0000-0001-9236-5864](https://orcid.org/0000-0001-9236-5864)

A.N. Safonova^{6,7}, PhD Student; ResearcherID: [F-6811-2019](https://orcid.org/0000-0002-3290-2717), ORCID: [0000-0002-3290-2717](https://orcid.org/0000-0002-3290-2717)

¹Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 8, Moscow, 119333, Russian Federation; e-mail: yegor@mail.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), per. Institutskiy, 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation; e-mail: postbox-kozub@yandex.ru

³Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi-5, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: melnik_petr@bk.ru

⁴Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, Uspenskoe, Moscow Region, 143030, Russian Federation; e-mail: melnik_petr@bk.ru

*The article is published within the framework of implementation of the scientific journals development program in 2019, based on proceedings of XIX International conference of the young scholars “Forests of Euro-Asia – The Southern Ural” (August 25–30, 2019, Chelyabinsk).

⁵Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère Université du Littoral Côte d'Opale, Maison de la Recherche en Environnement Industriel 2, 189A, Avenue Maurice Schumann, 59140 Dunkerque, France; e-mail: anton.sokolov@univ-littoral.fr

⁶Siberian Federal University, prosp. Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

⁷Soft Computing and Intelligent Information Systems research group, University of Granada, E-18071 Granada, Spain; e-mail: safonova.nastya1@gmail.com

At present, the invasion by Ussuri polygraphus (*Polygraphus proximus* Blandf) is considered as one of the main factors of large-scale drying of Siberian forests. The appearance of this new organism in fir trees has led to seriously worsening their condition and a variety of ecological effects in taiga ecosystems. The strong decrease of natural biological diversity, forest productivity, changes in the composition and structure of tree and subordinate layers may occur in the centers of mass reproduction. In this paper, we propose a method for determination of category of forest damage from very high spatial resolution color airborne images (5–10 cm per pixel) using machine learning methods. The method includes the stages of preprocessing, segmentation of crowns of individual trees, the classification and assessment of the forest damage in accordance with conventional standards. The images of several test plots of Stolby Nature Reserve (Krasnoyarsk Territory), obtained with the help of equipment installed on unmanned aerial vehicles DJI Phantom 3 Pro and Yuneec Typhoon H in May 2016, were used for testing the method proposed. The filtering method proposed for the stage of constructing a training set made it possible to increase the accuracy at the classification stage. The substantiation of division of the three main classes of objects into subclasses using cluster analysis is given. The presence of subclasses is caused by presence of various tree species in the test plot. A comparison of the efficiency of various supervised classification methods used for solving this problem is performed. It is shown that all the considered methods allow us to achieve a sufficiently high accuracy, about 95%. The calculation of the Cohen's kappa coefficient shows that the classifications carried out with the help of all the considered methods have excellent agreement with the expert data. The analysis of the stability of training is carried out. Estimates of the total probability of error obtained by methods of cross-validation and resubstitution differ by less than 0.1%, which indicates the absence of the problem of overtraining. The joint analysis of accuracy and processing speed has shown that it is most appropriate to use the normal Bayesian classifier. High classification accuracy allows us to obtain estimates of 6 categories of forest damage in the test plot. The results obtained can be potentially used by regional forest management services.

For citation: Dmitriev E.V., Kozub V.A., Melnik P.G., Sokolov A.A., Safonova A.N. Classification and Assessment of the State of Mixed Forests from Very High Spatial Resolution Airborne Images. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 9–24. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.9

Funding: the work is supported by RFBR, project № 19-01-00215 «Investigation of operative opportunities of hyper-spectral technologies of remote sensing of the Earth to solve regional problems using updated hyper-spectral cameras from space».

Keywords: remote sensing, very high resolution images, forests, forest state assessment, forest degradation, stem pests, pattern recognition, thematic image processing.

Поступила 30.07.19 / Received on July 30, 2019

УДК 630*165.43:581.471

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.25

**СЕМЕНОШЕНИЕ И СТРУКТУРА ШИШЕК У КЛОНОВ
МУТАЦИОННЫХ ВЕДЬМИНЫХ МЕТЕЛ КЕДРА СИБИРСКОГО****О.И. Полякова, аспирант; ResearcherID: [K-7513-2017](#); ORCID: [0000-0002-6096-9070](#)**Е.А. Жук, канд. биол. наук; ResearcherID: [N-1566-2015](#); ORCID: [0000-0003-1135-6240](#)**С.Н. Горошкевич, д-р биол. наук; ResearcherID: [I-5084-2018](#); ORCID: [0000-0003-0805-8656](#)*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, д. 10/3, г. Томск, Россия, 634055;

e-mail: polyakova_olga93@mail.ru, eazhuk@yandex.ru, gorosh@imces.ru

Мутационная ведьмина метла (ВМ) – фрагмент кроны дерева с аномальным морфогенезом, включающим замедленный рост, обильное ветвление, сниженное апикальное доминирование и часто обильное семеношение. Мутационные ведьмины метлы являются основным источником декоративных карликовых привойных сортов хвойных. Кедр сибирский, как и другие хвойные, способен к образованию мутационных ведьминых метел. Для того чтобы установить, какое влияние мутация оказывает на развитие шишек ведьминых метел, был проведен анализ урожайности и разнообразия размеров и структуры шишек у 20 клонов ведьминых метел, а также их сравнение со средней нормальной шишкой кедра сибирского длиной 9 см, шириной 6 см, средним числом семян 57 шт. и долей медиальной фертильной зоны 39,1...60,3 % от общего числа чешуй. Клоны ведьминых метел имели разное количество шишек. Среднее число заложённых шишек у 13-летних клонов составляло 13 шт. Клоны ведьминых метел были очень разнообразны по всем признакам шишек. Самые маленькие шишки по длине отмечены у трех клонов, их длина составила менее 3 см. Два клона из них имели также и самый маленький диаметр: 2,3 и 2,2 см соответственно. Четыре клона имели относительно самые крупные шишки длиной более 4 см, а диаметр 3,4 см. Фертильная зона в шишках у клонов ведьминых метел составляла от 27,8 до 55,6 % от общего числа чешуй, т. е. лишь немного меньше, чем у нормальных шишек. Шишки имели по 40...60 семян, из которых у 20 % клонов развилось менее 20 семян, а у 15 % клонов – более 40 семян на шишку, что на треть меньше, чем у нормальных деревьев кедра сибирского. Число недоразвитых семян в шишках почти у всех клонов было невысоким, однако для некоторых доля недоразвитых семян составляла до 30 % от общего числа семян в шишке. Таким образом, шишки у клонов ведьминых метел были в 2–3 раза мельче, а их качество в целом было хуже, чем у нормальных шишек кедра сибирского, однако урожайность у клонов ведьминых метел в целом была довольно высокой. При этом клоны ведьминых метел обладали очень высоким разнообразием по урожайности и качеству шишек. Лишь единичные клоны с хорошей урожайностью и относительно крупными шишками могут быть перспективными для селекции как орехоплодные сорта. В связи с негативным влиянием густоты кроны ведьминых метел на число и размер их шишек в большинстве случаев наличие и обилие шишек может служить лишь дополнительным признаком, повышающим декоративность карликовых привойных сортов кедра сибирского. При этом все без исключения клоны ведьминых метел фертильны и вполне могут быть использованы для скрещивания и дальнейшей селекционной работы.

* Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 г., по материалам XIX Международной конференции молодых ученых «Леса Евразии – Южный Урал» (25–30 августа 2019 г., г. Челябинск).

Для цитирования: Полякова О.И., Жук Е.А., Горошкевич С.Н. Семеношение и структура шишек у клонов мутационных ведьминых метел кедра сибирского// Лесн. журн. 2019. № 5. С. 25–34. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.25
Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 18-16-00058).

Ключевые слова: мутационные ведьмины метлы, соматическая мутация, *Pinus sibirica*, полноразмерные семена.

Введение

Ведьмина метла (ВМ) – фрагмент кроны дерева с аномальным морфогенезом, включающим замедленный рост, обильное ветвление и сниженное апикальное доминирование. Большинство ВМ имеют патологическую природу, причиной их образования является заражение различными видами грибов и микроорганизмов [16, 19, 20], вследствие чего имеют болезненный вид и полное или частично полное угнетение репродуктивной функции [5, 6]. В отличие от них мутационные ВМ имеют нормальную жизнеспособность, высокую долговечность и полное отсутствие каких-либо патогенов или следов их жизнедеятельности [8, 11]. Причиной появления таких ВМ считают доминантную соматическую мутацию, происходящую в апикальной меристеме [9, 12], доказательством является расщепление семенного потомства ВМ от опыления нормальной пылью на два дискретных класса: карликовые и нормальные сеянцы чаще всего в соотношении 1:1 [3, 7, 14, 25].

Мутационные ВМ являются основным источником декоративных карликовых привойных сортов хвойных [10]. Однако это только первый этап селекционной работы. Получить декоративные культивары с новыми свойствами возможно только через использование семенного потомства ВМ от свободного и контролируемого скрещивания. Поэтому актуально исследование половой репродукции и семенной продуктивности ВМ.

Кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour), один из основных лесообразующих видов российской тайги, ценится прежде всего своими съедобными семенами. В последнее время введение кедр сибирского в культуру как орехоплодного вида стало как никогда актуально. Для этого необходимо вывести сорта с высокой семенной продуктивностью. ВМ с их замедленным ростом могли бы быть использованы как исходный материал для селекции карликовых орехоплодных сортов, если бы они имели высокую семенную продуктивность. Поэтому исследование половой репродукции ВМ кедр сибирского актуально вдвойне. Целью работы было исследование семеношения и структуры шишек у различных клонов ВМ кедр сибирского и установить, насколько шишки клонов ВМ отличаются от нормальных шишек кедр сибирского.

Объекты и методы исследования

Исследование семеношения и структуры шишек было проведено на клонах ВМ кедр сибирского. Эксперимент проводился на стационаре «Кедр» Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томска (56°13' с. ш., 84°51' в. д.). Источниками растительного материала выступило 20 деревьев с мутационными ВМ (табл.). ВМ имели разную плотность кроны

и семеношение, которые оценивали визуально [27]. Плотность ВМ считалась низкой, если она превышала плотность НК менее чем в 2 раза, средней – в 2–3 раза, высокой – более чем в 3 раза. Семеношение ВМ считалось слабым, если на 100 см² поверхности ВМ приходилось меньше 1 шишки, средним – 1–2 шишки, обильным – 2 и более шишек.

Таблица

Характеристика материнских деревьев с ведьмиными метлами (ВМ)

Клон ВМ	Происхождение и характеристики материнских деревьев									
	Широта	Долгота	Возраст дерева, лет	Высота дерева, м	Диаметр на уровне груди, см	Возраст ВМ, лет	Высота ВМ, м	Диаметр ВМ, м	Семеношение ВМ	Плотность ВМ
02	56°10'	84°00'	170	21	45	25	1,2	1,0	среднее	высокая
03	56°10'	84°00'	170	21	50	110	3,0	4,5	обильное	средняя
06	56°29'	84°57'	70	15	20	12	0,7	0,5	нет	высокая
08	56°10'	84°00'	170	21	48	80	1,75	1,5	обильное	высокая
010	56°10'	84°00'	180	20	80	20	0,7	0,7	нет	средняя
012	56°31'	84°44'	190	21	60	70	1,5	1,6	обильное	средняя
016	51°03'	85°36'	250	17	70	100	1,5	1,5	обильное	высокая
018	51°45'	89°56'	220	14	60	180	2,4	1,7	среднее	средняя
024	56°35'	84°38'	210	20	70	65	1,0	1,5	слабое	высокая
032	58°13'	84°32'	350	24	45	75	1,8	1,8	среднее	средняя
038	52°00'	90°20'	200	25	42	60	3,0	1,5	слабое	низкая
040	52°00'	90°20'	190	21	32	60	2,5	1,5	среднее	низкая
042	52°00'	90°20'	420	21	41	300	2,5	2,5	среднее	средняя
044	52°00'	90°20'	300	21	38	150	5,0	7,5	обильное	средняя
046	52°00'	90°20'	280	17	33	120	2,0	3,3	слабое	средняя
052	51°49'	112°32'	250	14	55	20	0,4	0,45	нет	высокая
053	50°49'	113°25'	300	16	70	90	1,0	1,1	нет	средняя
054	56°10'	84°00'	180	21	53	90	3,8	5,0	слабое	низкая
056	51°23'	87°46'	210	23	66	100	170	150	нет	средняя
086	56°25'	85°11'	200	21	60	90	250	300	обильное	средняя

В 2000–2007 гг. черенки от каждой ВМ были привиты на местный пятилетний подвой кедр сибирского. Привитые деревья выращивали с интервалами 1×1 м в рядах, каждый клон содержал 5...15 рамет. В августе 2016 г. были собраны шишки со всех рамет каждого клона. У клонов с небольшим числом шишек были собраны все шишки (3...9 штук). У клонов с большим числом шишек из всего урожая случайным образом были взяты для анализа по 15 шишек. У всех шишек измеряли следующие признаки: длина и диаметр шишек, число чешуй в проксимальной и дистальной стерильных зонах шишки, число чешуй в медиальной фертильной зоне шишки, а также число семян. Эталоном нормальной шишки для сравнения с ней шишек ВМ считали шишку со средней

длиной 9 см и средней шириной 6 см [2], средним числом семян 57 шт. и долей медиальной фертильной зоны 39,1...60,3 % от общего числа чешуй [1].

В 2019 г., когда возраст клонов увеличился и семеношение достигло максимума, у одновозрастных 13-летних клонов (12 клонов из 20) подсчитывали число шишек на всех раметах каждого клона. Среди шишек определяли несколько категорий, первые две ретроспективно по следам на коре [22]: (1) заложенные и неопыленные, которые опадали почти сразу после появления; (2) опыленные и несозревшие, которые увеличивались какое-то время после опыления и через некоторое время опадали; (3) созревшие, которые достигали полного размера в положенный срок.

Нормальность распределения признаков проверяли с помощью теста Колмогорова–Смирнова. Для сравнения морфологических признаков шишек и числа семян применяли однофакторный дисперсионный анализ и тест Ньюмена–Кейлса.

Результаты исследования и их обсуждение

В 2019 г. был самый обильный урожай за весь период роста клонов. Клоны ВМ имели разное количество шишек. У большинства клонов были единичные раметы, которые не имели шишек. Среднее число заложенных шишек у клонов составляло 13 шт., однако у разных клонов разброс по числу шишек был более чем 12-кратным (рис. 1). Соотношение шишек различных категорий также существенно различалось между клонами. У двух клонов около 5 % шишек опали в течение недели после периода опыления. У 11 клонов из 12 часть шишек, от 1 до 20 % от заложенных, опали до созревания. Более 80 % от заложенных шишек у всех клонов созрели.

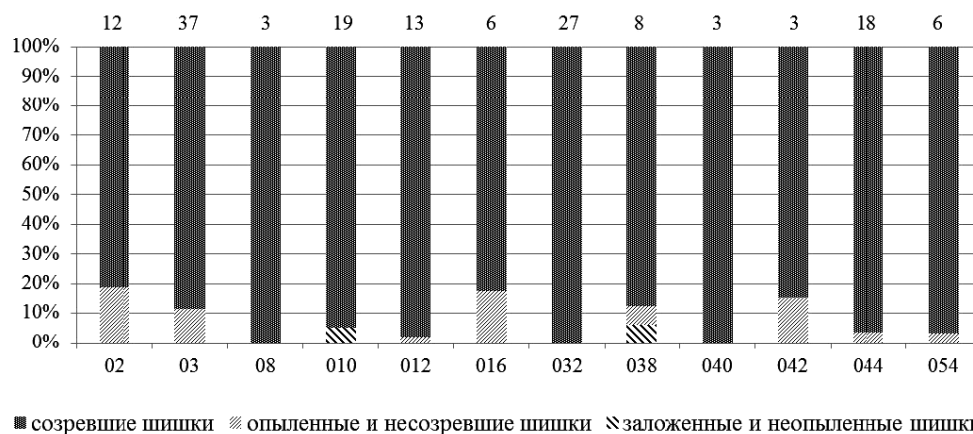


Рис. 1. Число шишек у клонов ведьминых метел (ВМ) (верхний ряд чисел) и доли шишек различных категорий: заложенные и неопыленные, опыленные и несозревшие, созревшие
Fig. 1. The number of cones in witches' broom clones (top row of numbers) and share of cones of different categories: generated and unpollinated, pollinated and non-mature, mature

Шишки у клонов ВМ сильно различались по размеру и форме (рис. 2). Встречались как клоны с шишками, почти не уступающими нормальным шишкам данного вида, так и клоны с очень мелкими шишками, чаще всего имеющие высокую плотность кроны. Как правило, мелкие шишки имели более круглую форму.

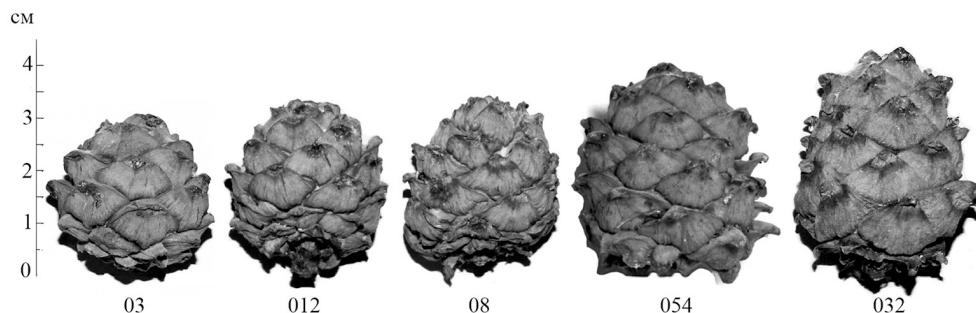


Рис. 2. Типичные шишки разных клонов ведьминых метел (ВМ). Числа в нижнем ряду соответствуют номерам клонов

Fig. 2. Typical cones in different witches' broom clones. The numbers in the bottom row correspond to the clone codes

Однофакторный дисперсионный анализ показал наличие значимых различий при $p < 0,05$ для всех морфологических признаков шишек у клонов ВМ. Самые маленькие шишки по длине отмечены у трех клонов (016, 056 и 06), их длина составила менее 3 см (рис. 3).

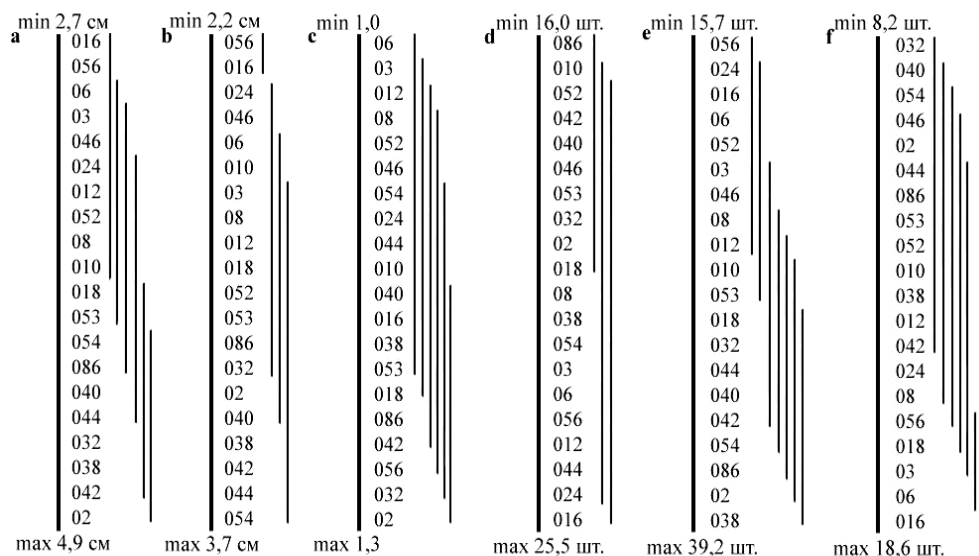


Рис. 3. Гомогенные группы, рассчитанные с помощью теста Ньюмена–Кейлса для морфологических признаков шишек у клонов ведьминых метел (ВМ) ($p < 0,05$). Клоны ранжировались в порядке от минимального до максимального значения признака. Линии соединяют клоны без значимых различий в значениях признаков: *a* – длина шишки; *b* – диаметр шишки; *c* – отношение длины шишки к диаметру; *d* – число стерильных чешуй в проксимальной зоне шишки; *e* – число чешуй в медиальной фертильной зоне шишки; *f* – число стерильных чешуй в дистальной зоне шишки

Fig. 3. Homogenous groups revealed by Newman-Keuls test for witches' broom clones for morphological cone traits in witches' broom clones ($p < 0.05$). Clones were ranked in order from minimal to maximal trait value. Lines connect clones with no significant differences in trait values. *a* – cone length, *b* – cone diameter, *c* – ratio of cone length and diameter, *d* – number of sterile scales in proximal cone part, *e* – number of fertile scales in medial cone part, *f* – number of sterile scales in distal cone part

Два клона из них (016 и 056) имели также и самый маленький диаметр: 2,3 и 2,2 см соответственно. Самыми крупными шишками по длине и диаметру были шишки, собранные с клонов 032, 038, 042 и 02. Их длина превышала 4 см, а диаметр – 3,4 см. У клона 054 шишки были не самые длинные, но имели самый большой диаметр. При этом даже самые крупные шишки у клонов ВМ были в 1,8 раза мельче средней нормальной шишки кедр сибирского. У большинства клонов форма шишки была слегка вытянутая, только у четырех клонов форма была округлой.

Число фертильных чешуй характеризует потенциальное число семян в шишке. Фертильная зона в шишках у клонов составляла от 27 до 55,6 %, лишь немного меньше, чем у нормальных шишек. Самая большая доля фертильной зоны в шишке отмечена у клонов 02 и 038. Наблюдались значимые различия между клонами по соотношению числа чешуй в проксимальной и дистальной стерильных зонах и медиальной фертильной зоне шишки. Шишки клона 016 содержали наибольшее число чешуй в обеих стерильных зонах и малое число чешуй в фертильной зоне.

У четырех клонов число семян составило менее 40 шт. на шишку, а у девяти клонов превысило 60 шт. на шишку. Однако далеко не все семяпочки развились в семена. У пяти клонов в шишке было не более 20 семян (рис. 4). Только у трех клонов число семян составило свыше 40 на шишку, что на треть меньше, чем у нормальных деревьев кедр сибирского. Число недоразвитых семян в шишках почти у всех клонов было невысоким, однако для некоторых доля недоразвитых семян составляла до 30 % от общего числа семян в шишке.

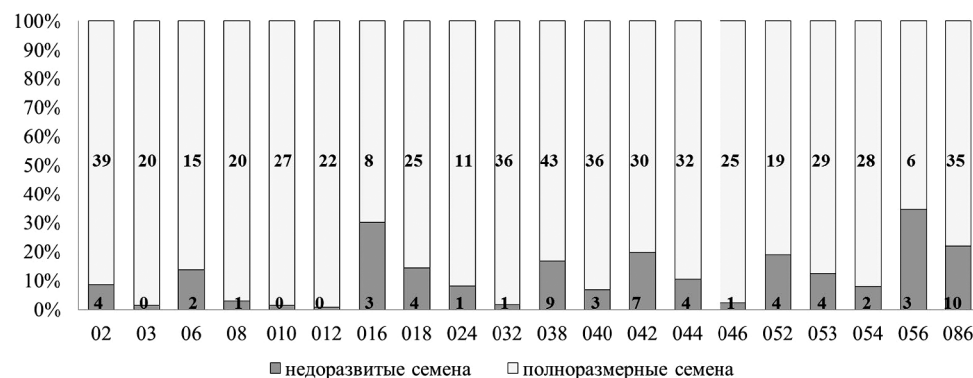


Рис. 4. Доли полноразмерных и недоразвитых семян в шишке у различных клонов ведьминых метел (ВМ). Числа внутри столбцов показывают число полноразмерных и недоразвитых семян на шишку

Fig. 4. Proportions of full-grown seeds and aborted seeds after pollination per cone in different witches' broom clones. The numbers inside the columns show number of full-grown seeds and aborted seeds after pollination per cone

У мутационных ВМ, в отличие от патологических, репродуктивная функция не угнетена. Хотя мутация приводит к полному отсутствию мужского цветения как у кедр сибирского [26], так и у других видов хвойных [13, 18, 23], она не препятствует заложению женских шишек. Однако шишки у клонов мутационных ВМ были в 2–3 раза мельче и имели менее вытянутую форму, чем нормальные шишки кедр сибирского. В природе шишки у мутационных ВМ

чаще всего меньше по размеру, чем у нормальной части кроны того же дерева [4, 18, 24], но иногда они не отличаются от нормальных [3]. На примере *P. halepensis* было показано, что с увеличением плотности кроны ВМ уменьшается размер их шишек [24].

Ранее было показано, что морфология ВМ частично зависит от морфологии материнского дерева, но значительно меньше, чем от выраженности мутации [27]. Корреляция между нормальными и мутантными клонами с одного дерева была значимой только по порогу ветвления – длине самого мелкого осевого побега, имеющего боковой побег, но этот признак является одним из ключевых, определяющих габитус ВМ. Оказалось, что между свойствами шишек нормальной кроны и производных от них ВМ также есть прямая зависимость [17]. Была обнаружена связь по ключевым признакам, определяющим форму шишки и число семян в шишке. Менее половины клонов ВМ в рамках нашего эксперимента имели парные клоны из нормальной части материнского дерева, поэтому не удалось оценить, насколько размер и структура их шишек зависели от характеристик материнского дерева.

Кроме признаков материнского дерева, размер шишек значительно зависит от размера побегов [15], поэтому небольшой размер шишек можно объяснить тем, что все части кроны у клонов ВМ, включая побеги, на которых формировались шишки, были гораздо короче, чем у нормальных деревьев. Ранее было показано, что у клонов ВМ кедр сибирского шишки могут образовываться даже на побегах длиной 1,7 см, чего никогда не происходит у клонов из нормальной части того же материнского дерева [27]. Мелкие размеры шишек ВМ могли быть следствием того, что они формировались на мелких побегах.

Заключение

Таким образом, шишки у клонов ВМ были мельче, а их качество в целом было хуже, чем у нормальных шишек кедр сибирского, однако урожайность у клонов ВМ в целом была довольно высокой. У кедр сибирского, как и у остальных хвойных, встречаются ВМ с разным сочетанием признаков [5, 21, 27]. Соответственно, для урожайности и качества шишек у клонов ВМ также было характерно большое разнообразие. Лишь единичные клоны с хорошей урожайностью и относительно крупными шишками могут быть перспективными для селекции как орехоплодные сорта. Наблюдалось негативное влияние густоты кроны ВМ на число и размер шишек. Из-за этого в большинстве случаев наличие и обилие шишек может служить лишь дополнительным признаком, повышающим декоративность карликовых привойных сортов кедр сибирского. При этом все без исключения клоны ВМ фертильны и вполне могут быть использованы для скрещивания и дальнейшей селекционной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горошкевич С.Н. Динамика роста и плодоношения кедр сибирского. Уровень и характер изменчивости признаков // Экология. 2008. № 3. С. 181–188. [Goroshkevich S.N. Dynamics of Growth and Seed Production in the Siberian Stone Pine: The level and pattern of variation in characters. *Rossiyskiy zhurnal ekologii*, 2008, vol. 39, no. 3, pp. 168–175].
2. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002. 707 с. [Koropachinskiy I.Y.,

Vstovskaya T.N. Woody Plants of the Asian Part of Russia. Novosibirsk, SB RAS Publ., Branch «Geo», 2002. 707 p.].

3. Носков В.И., Негруцкий С.Ф. К вопросу о происхождении «ведьминых метел» на сосне // Научные записки Воронежского лесотехн. ин-та. 1956. Т. 15. С. 207–210. [Noskov V.I., Negruzkiy S.F. About Origin of Witches' Brooms in Scotch Pine. *Nauchnye zapiski Voronezhskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1956, vol. 15, pp. 207–211].

4. Ямбуров М.С. «Ведьмины метлы» мутационного типа у некоторых видов семейства *Pinaceae*: дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2010. 133 с. [Yamburov M.S. *Mutational witches' brooms in some Pinaceae species*: Cand. Biol. Diss. Tomsk, 2010. 133 p.].

5. Ямбуров М.С., Горошкевич С.Н. «Ведьмины метлы» кедр сибирского как спонтанные соматические мутации: встречаемость, свойства и возможности использования в селекционных программах // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. XXIV. № 2–3. С. 317–324. [Yamburov M.S., Goroshkevich S.N. Witches'-brooms in Siberian Stone Pine as Somatic Mutations: Occurrence, Features and Possibility of Using in Breeding Programs. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2007, vol. 24, no. 2–3, pp. 317–324].

6. Bertaccini A. Phytoplasmas: Diversity, Taxonomy, and Epidemiology. *Frontiers in Bioscience*. 2007, vol. 12, pp. 673–689.

7. Brown C.L., Sommer H.E., Wetzstein H. Morphological and Histological Differences in the Development of Dwarf Mutants of Sexual and Somatic Origin in Diverse Woody Taxa // *Trees*, 1994, vol. 9, iss. 2, pp. 61–66.

8. Buckland D.C., Kuijt J. Unexplained Brooming of Douglas-fir and Other Conifers in British Columbia and Alberta. *Forest Science*, 1957, vol. 3, iss. 3, pp. 236–242.

9. Duffield J., Wheat J. Dwarf Seedlings From Broomed Douglas-fir. *Silvae Genet*, 1963, vol. 12, pp. 129–133.

10. Farjon A. A Handbook of the World's Conifer. 2nd edn. Leiden, Brill. 2017. 1154 p.

11. Fordham A.J. Dwarf Conifers From Witches'-brooms. *Arnoldia*, 1967, vol. 27, pp. 29–50.

12. Grasso V. Dwarf Seedlings From Witches' Brooms of *Pinus halepensis*. *Italia forestale e montana*, 1969, vol. 24, pp. 241–245.

13. Johnson A.G., Pauley S.S., Cromell W.H. Dwarf Seedlings From Witches' Brooms in Jack Pine II. *Minn For Notes*, 1965, no. 163, p. 2.

14. Johnson A.G., Pauley S.S., Cromell W.H. Pine Dwarf Segregates From Witches'-brooms. *Proc Int Plant Propag Soc.*, 1968, vol. 18, pp. 265–270.

15. Leslie A.B., Beaulieu J.M., Crane P.R., Donoghue M.J. Cone Size Is Related to Branching Architecture in Conifers. *New Phytol.*, 2014, vol. 203, pp. 1119–1127. DOI: [10.1111/nph.12864](https://doi.org/10.1111/nph.12864)

16. Money N.P. Mushrooms: A Natural and Cultural History. London, Reaktion Books, 2017. 224 p.

17. Polyakova O., Goroshkevich S., Zhuk E. Cone Structure and Seed Development in Grafted Witches' Broom and normal crown clones from the same trees of *Pinus sibirica* // New Forests. 2019. Pp. 1–15. DOI: [10.1007/s11056-018-09700-x](https://doi.org/10.1007/s11056-018-09700-x)

18. Rudolph T.D., O'Malley D.M., Reed E.A. Potential for Indirect Selection of Rescued Jack Pine Embryos Based upon Linkage Between Seedling Dwarfism and Megagametophyte Allozymes. *Proceedings of the North Central Tree Improvement Conference*, 1983, pp. 162–174.

19. Seo J.K., Kim M.K., Kwak H.R., Kim J.S., Choi H.S. Complete Genome Sequence of Longan Witches' Broom-associated Virus, a Novel Member of the Family *Potyviridae*. *Archives of Virology*, 2017, vol. 162, iss. 9, pp. 2885–2889. DOI: [10.1007/s00705-017-3405-2](https://doi.org/10.1007/s00705-017-3405-2)

20. Sugio A., MacLean A.M., Kingdom H.N., Grieve V.M., Manimekalai R., Hogenhout S.A. Diverse Targets of Phytoplasma Effectors: from Plant Development to Defense Against Insects. *Annual Review of Phytopathology*, 2011, vol. 49, pp. 175–195. DOI: [10.1146/annurev-phyto-072910-095323](https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095323)

21. Vasilyeva G.V., Zhuk E.A. Needle Structure of Mutational Witches' Brooms in *Pinus sibirica*. *Dendrologiya*, 2016, vol. 75, pp. 79–85. DOI: [10.12657/denbio.075.008](https://doi.org/10.12657/denbio.075.008)
22. Vorobyev V.N., Goroshkevich S.N., Savchuk D.A. Method of Retrospective Study of Semiference Dynamics in *Pinaceae*. *Proceedings of the International Workshop on Subalpine Stone Pines and their Environment: the Status of our Knowledge*. Ogden, 1994, pp. 201–204.
23. Vrgoc P. Cluster Analysis of Height and Crown Density of Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) Witches Brooms Progenies. *Ann For.*, 1999, vol. 24, pp. 24–57.
24. Vrgoc P. Witches' Broom of Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) and its Use for New Ornamentals. *Acta Hort*, 2002, vol. 29, pp. 199–205. DOI: [10.17660/ActaHortic.2002.572.23](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.572.23)
25. Waxman S. Witches'-brooms' Sources of New and Interesting Dwarf Forms of *Picea*, *Pinus*, and *Tsuga* Species. *Acta Horti Symp Propag Arboric*, 1975, vol. 54, pp. 25–32. DOI: [10.17660/ActaHortic.1975.54.3](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1975.54.3)
26. Yamburov, M.S., Goroshkevich, S.N. Witches' brooms in Siberian stone pine as somatic mutations and initial genetic material for breeding of nut-bearing and ornamental cultivars. *Annals of Forest Research*, [S.l.], p. 165–166, feb. 2008. ISSN 20652445. Available at: <http://www.afrjournal.org/index.php/afr/article/view/162>. Date accessed: 09 Sep. 2019. DOI: [10.15287/afr.2008.162](https://doi.org/10.15287/afr.2008.162)
27. Zhuk E., Vasilyeva G., Goroshkevich S. Witches' Broom and Normal Crown Clones from the Same Trees of *Pinus sibirica*: a Comparative Morphological Study. *Trees*, 2015, vol. 29, iss.4., pp. 1079–1090. DOI: [10.1007/s00468-015-1187-2](https://doi.org/10.1007/s00468-015-1187-2)

CONE PRODUCTION AND CONE STRUCTURE IN THE CLONES FROM MUTATIONAL WITCHES' BROOMS OF SIBERIAN STONE PINE*

O.I. Polyakova, Postgraduate Student; ResearcherID: [K-7513-2017](https://orcid.org/0000-0002-6096-9070); ORCID: [0000-0002-6096-9070](https://orcid.org/0000-0002-6096-9070)

E.A. Zhuk, Candidate of Biology; ResearcherID: [N-1566-2015](https://orcid.org/0000-0003-1135-6240); ORCID: [0000-0003-1135-6240](https://orcid.org/0000-0003-1135-6240)

S.N. Goroshkevich, Doctor of Biology; ResearcherID: [I-5084-2018](https://orcid.org/0000-0003-0805-8656); ORCID: [0000-0003-0805-8656](https://orcid.org/0000-0003-0805-8656)

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademicheskiiy 10/3, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: polyakova_olga93@mail.ru, eazhuk@yandex.ru, gorosh@imces.ru

Mutational witches' broom (WB) is a fragment of tree crown with abnormal morphogenesis, including slow growth, abundant branching, reduced apical dominance and often abundant seed production. Mutational WBs are the main source of ornamental dwarf grafting conifer cultivars. Siberian stone pine, like other conifers, is capable of forming mutational WBs. In order to reveal how the mutation affects the development of WB cones an analysis of the cone yield and cone size and structure in 20 WB clones was made, and they were compared with a mean normal Siberian stone pine cone with length 9 cm, width 6 cm, 57 seeds per cone and the proportion of the medial fertile zone 39.1–60.3% of the total number of scales. WB clones

*The article is published within the framework of implementation of the scientific journals development program in 2019, based on proceedings of XIX International conference of the young scholars "Forests of Euro-Asia – The Southern Ural" (August 25–30, 2019. Chelyabinsk).

had a different number of cones. Thirteen-year old clones had 13 cones in average. All cone traits varied greatly among the WB clones. Three clones had shortest cones, their length was less than 3 cm. Two of the clones also had the smallest diameter, 2.3 and 2.2 cm, respectively. Four clones had relatively large cones, longer than 4 cm, and diameter 3.4 cm. The fertile zone in the cones of WB clones was from 27.8% to 55.6% from the total number of scales, i.e. only slightly smaller than that in normal cones. The cones contained 40–60 ovules, which gave rise to less than 20 seeds in 20% of the clones, and more than 40 seeds per cone in 15% of the clones, which is a third less than that in normal Siberian stone pine trees. The number of aborted seeds after pollination in cones was almost not high for all clones, however, for some, the proportion of aborted seeds was up to 30% of the total number of seeds per cone. Thus, the cones in WB clones were 2–3 times smaller, and they were generally inferior to normal Siberian stone pine cones, but the yield in WB clones was quite high. At the same time, the WB clones were highly variable in yield and cone quality. Only individual clones with good yield and relatively large cones can be promising for breeding as nut-bearing cultivars. Due to the negative WB crown density on the number and size of their cones, in most cases, the presence and abundance of cones can only serve as an additional feature that enhances the ornamental value of dwarf graft cultivars of Siberian stone pine. At the same time, all WB clones were fertile and could be used for cross-breeding and further selection work.

For citation: Polyakova O.I., Zhuk E.A., Goroshkevich S.N. Cone production and cone structure in the clones from mutational witches' brooms of Siberian stone pine. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 25–34. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.25

Funding: This work is supported by the Russian Science Foundation under grant no. 18-16-00058.

Keywords: mutational witches' broom, somatic mutation, *Pinus sibirica*, full-grown seeds.

Поступила 02.08.2019 г. / Received on August 2, 2019

УДК 630*181.65+582.475.2+581.143.4+581.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.35

СТРУКТУРА РАЗНООБРАЗИЯ ПО ВЕГЕТАТИВНОЙ И ГЕНЕРАТИВНОЙ СТРУКТУРЕ КРОНЫ КЕДРА СИБИРСКОГО НА ПЛАНТАЦИИ С РАЗРЕЖЕННОЙ ПОСАДКОЙ*

С.Н. Велисевич, канд. биол. наук; ResearcherID: [N-1661-2015](#), ORCID: [0000-0003-4929-1681](#)

А.В. Попов, аспирант; ResearcherID: [K-7504-2017](#), ORCID: [0000-0001-7578-2455](#)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, д. 10/3, г. Томск, Россия, 634055; e-mail: velisevich@imces.ru, tomskceltic@gmail.com

Исследования характера и природы разнообразия хозяйственно ценных признаков у лесных древесных видов представляют большой интерес не только с позиций лесной селекции и практического лесоводства, но и с общебиологической точки зрения. В ряду объектов внимания ученых-селекционеров особое место занимают орехоплодные виды, к числу которых принадлежит кедр сибирский. Его введение в культуру путем плантационного выращивания древесины и создания промышленных орехоплодных плантаций позволит в будущем резко снизить хозяйственную нагрузку на природные экосистемы. Цель настоящей работы состояла в анализе структуры разнообразия по росту и генеративному развитию кроны деревьев кедра сибирского на специально созданной плантации, где низкий уровень естественного отбора дает возможность для более результативной селекции *на скороплодность, рост и семенную продуктивность*. Плантация, расположенная на юге равнинной западносибирской части ареала (юг Томской области), создана из семян кедра местной популяции. Они были высажены в 1977 г. в качестве производственных культур с обычной плотностью (0,75×3 м). В 10-летнем возрасте их рассадил на расстоянии 8×8 м. На основе ретроспективного метода, позволяющего по следам на коре побегов восстановить ход их органогенеза и роста, реконструирована динамика вступления в половую репродукцию 89 модельных деревьев, достигших 40-летнего возраста, проведена сравнительная характеристика вегетативного и генеративного развития кроны. Полученные результаты показывают, что в целом исходная идея о зависимости эффективности отбора от условий, в которых формировалось насаждение, подтверждается. В естественном сомкнутом насаждении многие из выявленных в ходе данного исследования лидеров по плодоношению отстали бы из-за среднего или даже слабого роста и, возможно, не достигли бы репродуктивного возраста. На плантации с разреженной посадкой они сохранились и вышли в лидеры по плодоношению. Раннее начало плодоношения, даже в условиях разреженной посадки, положительно связано со скоростью роста в прегенеративный период онтогенеза ($r = +0,65$). Уровень различий по генеративному развитию деревьев оказался гораздо выше, чем по вегетативному. Обилие мужских побегов в кроне и относительная протяженность мужского генеративного яруса определялись прежде всего высотой деревьев. На развитие женской генеративной сферы активный рост дерева в высоту, напротив, не имел заметного влияния. Контрастные различия в связях мужской и женской сферы с различными показателями роста являются, по нашему мнению, весьма интересным результатом. Высокие деревья с неширокой кроной наиболее перспективны для селекции на пыльцевую продуктивность, поскольку имеют более протяженный мужской ярус и благодаря этому имеют больше мужских побегов в кроне. Деревья с широкой

* Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 г., по материалам XIX Международной конференции молодых ученых «Леса Евразии – Южный Урал» (25–30 августа 2019 г., г. Челябинск).

кроной перспективны для селекции на семенную продуктивность. Однако урожайность не во всех случаях является прямой функцией размера кроны, а зависит от конкретного генотипа дерева. Это подтверждается тем, что в каждой группе (высоких, средних и низких деревьев) есть индивиды высокоурожайные и низкоурожайные, что открывает возможности для селекции на семенную продуктивность в группах, различающихся по уровню роста. Использование расчетного относительного показателя «на 1 м² площади горизонтальной проекции кроны» дало возможность для отбора лучших деревьев по урожайности (сочетающих минимальный размер кроны с количеством шишек на единицу площади кроны) и росту (сочетающих большую высоту и узкую крону).

Для цитирования: Велисевич С.Н., Попов А.В. Структура разнообразия по вегетативной и генеративной структуре кроны кедра сибирского на плантации с разреженной посадкой // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 35–47. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.35

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 18-16-00058).

Ключевые слова: кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour), плантация с разреженной посадкой, рост, половая репродукция, разнообразие, отбор.

Введение

Лес в хозяйственной деятельности человека – это в первую очередь древесина, поэтому абсолютное большинство исследований по внутривидовому разнообразию и практически все селекционные программы относятся к теме вегетативной продуктивности и качества древесины. Лесосеменные плантации (seed orchards) наиболее часто используются в половом размножении лесных видов во всем мире [10, 11, 15, 18, 19, 21, 22]. Они состоят из отобранных, генетически превосходящих родителей-кандидатов потомков, основная задача которых – давать обильный и легко собираемый урожай генетически улучшенных семян [14, 16, 25].

Между тем рост – это всего лишь одна из двух сторон жизнедеятельности дерева. Вторая, и очень важная, – половая репродукция – изучена и задействована в селекционных программах гораздо меньше, поскольку для традиционного лесовосстановления раннее и обильное плодоношение – нежелательное явление, тормозящее рост [2, 3, 7, 23]. Поэтому генеративная структура кроны деревьев на лесосеменных плантациях рассматривалась преимущественно в связи с мероприятиями по содействию панмиксии [12, 13, 16], формированию кроны для увеличения количества пыльцы [20] и облегчения сбора шишек [15, 17, 24]. Еще меньше известно о связи и соотношении этих двух основных проявлений жизни деревьев в структуре природного разнообразия и о возможности использования этого разнообразия в селекционной практике. Возможно, такая ситуация сложилась ввиду того, что подавляющее большинство лесных древесных видов, используемых в практическом лесоводстве, выращивается на древесину.

Кедр сибирский – ценнейший для России орехоплодный вид с почти чисто российским ареалом. Однако на данный момент кедровые леса используются нерационально: либо их рубят, либо собирают орех в естественных насаждениях (изымают семена, необходимые для воспроизводства вида), что сильно вредит природным экосистемам. В лучшем случае выращивают в виде культур из семян, собранных в припоселковых кедровниках. При этом их селекционная ценность невысока, поскольку ранг плюсовых деревьев далеко не всегда

сохраняется в их семенном и вегетативном потомстве [9]. Это обуславливает необходимость продолжения ранее начатых исследований характера и природы разнообразия хозяйственно ценных признаков данного вида [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8] через анализ структуры разнообразия по росту и плодоношению. Эти работы целесообразно проводить на специальных объектах. Например, отбор по скороплодности невозможен в естественных насаждениях с их возрастной, почвенной и фитоценотической неоднородностью. Актуальность этой работы определяется также относительно большой длиной селекционного цикла, которая у кедра сибирского особенно велика из-за медленного роста в начале онтогенеза и вследствие этого позднего начала плодоношения. За рубежом работы по селекции кедра вообще не проводятся.

Цель настоящей работы состояла в анализе структуры разнообразия по росту и генеративному развитию кроны деревьев кедра сибирского на специально созданной плантации с разреженной посадкой (8×8 м), где низкий уровень естественного отбора дает возможность для более результативной селекции *на скороплодность, рост и семенную продуктивность. Анализируется возможность* использования расчетных относительных показателей (на 1 м² площади горизонтальной проекции кроны) для отбора лучших по урожайности и росту деревьев.

Объекты и методы исследования

Анализируемая плантация расположена на юге равнинной западносибирской части ареала кедра сибирского на территории Калтайского опытного лесхоза Томской области (56°13' с. ш., 84°49' в. д.). Она создана из семян местной популяции, которые были высажены в 1977 г. в качестве производственных культур с обычной плотностью – 0,75×3 м. В 1987 г., когда деревья достигли 1,5 м, их выкопали и рассаднили на расстоянии 8×8 м. За деревьями плантации ведутся регулярные наблюдения, осуществляется лесотехнический уход. К 2018 г. они достигли 40-летнего возраста и генеративного этапа развития (рис. 1, 2).



Рис. 1. Внешний вид 40-летних деревьев кедра сибирского в лесных культурах с разреженной посадкой

Fig. 1. Appearance of 40-year-old Siberian cedar trees in the thinned forest plantation



Рис. 2. Фото лесных культур, полученное с помощью беспилотного летающего аппарата

Fig. 2. Photo of forest plantations obtained using a pilotless aircraft

Метод реконструкции динамики органогенеза и роста побегов [2, 3, 7], усовершенствованный нами для целей данной работы, позволил восстановить ход онтогенеза каждого модельного дерева, провести сравнительную характеристику их вегетативного и генеративного развития. Возраст начала половой репродукции восстанавливали по следам от микро- и макростробилов на коре мужских и женских побегов соответственно. В 2004 г., в период массового вступления деревьев в половую репродукцию, проведена первая инвентаризация лесных культур, по результатам которой 89 модельных деревьев разделены на группы, различающиеся по срокам вступления в плодоношение. Вторая инвентаризация проведена в 2018 г., по результатам которой деревья разделены на группы по росту и количеству шишек в кроне.

Для анализа вегетативной и генеративной структуры кроны в каждой мутовке ствола выбиралась 1 средняя скелетная ветвь, на которой подсчитывалось общее число побегов, отдельно учитывались побеги с микро- и макростробилами. Полученные значения признаков умножались на число эквивалентов таких скелетных ветвей в мутовке ствола, чтобы определить суммарное количество побегов в каждой мутовке, а затем и во всей кроне. Измерялась длина годовых приростов ствола и генеративных ярусов вдоль по стволу. Подсчитывалось количество однолетних шишек (озими). Произведен расчет относительных показателей – числа женских и мужских генеративных органов на площадь горизонтальной проекции кроны.

Анализ фактического материала проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) по Фишеру, включая метод линейных контрастов Шеффе, который позволяет установить различия между группами деревьев. Расчеты проводили с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 6.0.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты первой инвентаризации показали, что раннее начало плодоношения, даже в условиях разреженной посадки, положительно связано со ско-

ростом роста в прегенеративный период онтогенеза (табл. 1). Основную массу составили особи со средними сроками начала половой репродукции. Более чем 60 % деревьев культур первые шишки начали формировать после 25 лет. Эта группа характеризовалась средними размерами ствола, средним числом побегов в кроне и их относительным количеством в пересчете на единицу длины ствола. Деревья, не вступившие в половую репродукцию, имели минимальные размеры, а деревья, склонные к более раннему вступлению в плодоношение (15...20 лет), на момент анализа имели максимально высокие показатели вегетативного развития. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между возрастом вступления дерева в репродукцию и его высотой составил +0,65 (достоверно при $p = 0,05$).

Таблица 1

Характеристика вегетативного и генеративного развития деревьев кедра сибирского на этапе вступления в половую репродукцию (2004 г.)

Признак	Среднее по насаждению ($n=89$)	Скороплодные ($n = 12$)	Массовое вступление в плодоношение ($n = 62$)	Неплодоносящие ($n = 15$)
Высота ствола, м	4,5 0,73	5,2 0,80 а	4,6 0,66 аб	4,0 0,61 б
Диаметр ствола, см	14,8 2,63	17,2 3,24 а	14,8 2,31 аб	12,9 2,34 б
Число побегов в кроне, шт.	4013 2132	5489 3118 а	4005 1960 аб	2651 1082 б
Число побегов на единицу длины ствола, шт./м	<u>876</u> 384	<u>1021</u> 397 а	<u>863</u> 374 а	<u>673</u> 266 а
Число женских побегов в кроне, шт.	<u>14,4</u> 8,00	<u>24,6</u> 7,24 б	<u>12,8</u> 4,18 аб	—

Примечание. В числителе – среднее значение; в знаменателе – среднее стандартное отклонение; * – буквенные индексы при цифрах обозначают достоверность различий, рассчитанных по методу линейных контрастов Шеффе. При отсутствии различий буквенный индекс одинаков.

Вторая инвентаризация показала, что к 40 годам все неплодоносящие деревья вступили в половую репродукцию. Ранг по уровню вегетативного и генеративного развития кроны остальных деревьев заметно изменился. У деревьев с ранними и средними сроками начала плодоношения наблюдалось снижение величины годовых приростов в высоту. Это вполне ожидаемо, если учесть, что для лесных древесных видов переход к половой репродукции совпадает с достижением пика приростов ствола в высоту и даже с их некоторым снижением [2, 3].

Поскольку целью данной работы было выявление деревьев, перспективных для селекции на: (1) вегетативную и (2) семенную продуктивность, вся выборка была разделена на группы по высоте, как интегральному показателю среднегодовалых темпов роста индивида, и по количеству шишек в кроне, как интегральному показателю общей семенной продуктивности (табл. 2). При

делении на группы по высоте руководствовались принципом: к «средним деревьям» отнесены деревья со средним значением признака $\pm$ сигма, к крайним – «высокие деревья» (+ сигма) и «низкие деревья» (– сигма).

Таблица 2

**Характеристика вегетативного развития деревьев кедров сибирского
на плантации с разреженной посадкой (2018 г.)**

Признак	Среднее по насажде- нию (<i>n</i> = 89)	Высокие		Средние		Низкие	
		Много шишек (<i>n</i> = 12)	Мало шишек (<i>n</i> = 9)	Много шишек (<i>n</i> = 28)	Мало шишек (<i>n</i> = 22)	Много шишек (<i>n</i> = 10)	Мало шишек (<i>n</i> = 8)
Высота ствола, м	8,7 1,10	10,1 0,40 а	9,8 0,48 а	8,8 0,24 б	9,0 0,28 б	7,6 0,13 в	7,3 0,36 в
Диаметр ствола, см	35,5 6,65	38,8 10,11 б	35,4 4,21 б	35,1 5,70 б	35,3 3,95 б	34,3 6,16 б	33,1 8,58 б
Площадь горизон- тальной проекции кроны, м ²	29,9 9,00	27,1 7,46 б	37,4 7,00 б	29,0 10,02 б	28,4 4,89 б	33,1 12,15 б	22,5 3,83 б
Число побегов в кроне, тыс. шт.	15,8 7,0	21,8 9,5 б	14,8 2,9 б	12,3 4,8 б	17,4 5,1 б	16,7 7,8 б	12,6 4,9 б
Число побегов на единицу длины ствола, шт./м	1810 702	2151 922 б	1502 301 б	1378 200 б	1920 533 б	2193 1012 б	1696 608 б

Примечание. См. табл. 1.

Более 50 % выборки составили средние по высоте деревья. Диаметр ствола зависел от числа побегов в кроне и площади ее горизонтальной проекции ($r = +0,42^*$ и $+0,58^*$ соответственно; * – достоверно при $p = 0,05$). По площади проекции кроны существенных различий между деревьями не наблюдается, что, по-видимому, объясняется свободным их расположением и возможностью развития кроны в ширину.

Уровень различий по генеративному развитию деревьев оказался гораздо выше, чем по вегетативному (табл. 3). Обилие мужских побегов в кроне и относительная протяженность мужского генеративного яруса определялись прежде всего высотой деревьев ($r = +0,61^*$ и $r = +0,73^*$ соответственно). Невысокие деревья отличались минимальными значениями признаков, характеризующих мужскую генеративную сферу.

Таблица 3

**Характеристика генеративного развития деревьев кедров сибирского
на плантации с разреженной посадкой (2018 г.)**

Признак	Среднее по наса- ждению (<i>n</i> = 89)	Высокие		Средние		Низкие	
		Много шишек (<i>n</i> = 12)	Мало шишек (<i>n</i> = 9)	Много шишек (<i>n</i> = 28)	Мало шишек (<i>n</i> = 22)	Много шишек (<i>n</i> = 10)	Мало шишек (<i>n</i> = 8)
Доля мужских по- бегов от числа всех побегов кроны, %	26 20,1	35 14,1 аб	37 19,6 а	16 12,3 аб	45 22,2 а	12 10,5 б	7 5,8 б

Окончание табл. 3

Признак	Среднее по насаждению (n = 89)	Высокие		Средние		Низкие	
		Много шишек (n = 12)	Мало шишек (n = 9)	Много шишек (n = 28)	Мало шишек (n = 22)	Много шишек (n = 10)	Мало шишек (n = 8)
Доля мужского яруса от длины кроны, %	55 27,1	62 16,8 аб	77 12,4 а	54 26,3 аб	61 23,4 аб	34 22,2 б	28 19,3 б
Доля женских побегов от числа всех побегов кроны, %	1,0 0,82	1,6 0,81 б	0,3 0,21 а	1,7 0,78 б	0,6 0,13 б	1,7 0,43 б	0,2 0,15 а
Доля женского яруса от длины кроны, %	51 19,4	38 18,4 бв	62 15,2 аб	54 5,5 б	53 12,5 б	74 15,8 а	16 6,4 в
Число шишек в кроне, шт.	273 158,6	532 260,5 в	71 54,6 а	425 160,6 бв	160 51,8 аб	396 187 б	6 3,9 а
Число шишек на единицу площади проекции кроны, шт./1 м ²	8,6 2,7	14,5 8,26 аб	2,8 1,91 в	16,3 7,36 а	5,8 1,81 б	10,9 5,46 аб	0,3 0,17 в
Число заложившихся шишек на женском побеге, шт.	1,9 0,95	2,3 0,30 б	1,5 0,87 а	2,6 0,81 б	2,2 1,00 б	2,0 0,63 б	0,4 0,29 а
Число созревших шишек на женском побеге, шт.	0,7 0,36	0,8 0,14 б	0,7 0,41 аб	0,9 0,29 б	0,8 0,38 б	0,8 0,33 б	0,2 0,23 а

Примечание: см. таблицу 1.

На развитие женской генеративной сферы активный рост дерева в высоту, напротив, не имел заметного влияния. Длина женского генеративного яруса, доля женских побегов и число шишек в кроне достоверно положительно оказались связанными с площадью горизонтальной проекции кроны ($r = +0,43^*$, $r = +0,45^*$ и $r = +0,56^*$ соответственно). Несмотря на отсутствие достоверных различий по площади проекции кроны, у особей с обильным плодоношением число шишек в пересчете на единицу площади проекции кроны было существенно больше, чем у слабо плодоносящих. Эта зависимость наблюдалась во всех трех группах, различающихся по высоте.

Контрастные различия в связях мужской и женской сферы с различными показателями роста являются, по нашему мнению, весьма интересным результатом.

Суммарное количество шишек в кроне зависело в значительной степени от числа женских побегов ($r = +0,74^*$), от протяженности женского генеративного яруса ($r = +0,57^*$) и активности заложения шишек на женском побеге ($r = +0,41^*$).

Самыми продуктивными по количеству шишек с единицы площади кроны оказались деревья средней высоты. Следует также отметить, что все «скороплодные» деревья, вступившие в половую репродукцию в возрасте до 20 лет, на данный момент входят в группу обильно плодоносящих деревьев средней высоты. Большинство деревьев со средними сроками начала плодоношения (около 25 лет) равномерно распределились по группам с обильным плодоношением среди высоких и низких деревьев, а также средних деревьев

с малым числом шишек в кроне. Деревья с поздним (30 лет и более) вступлением в плодоношение составили основную массу слабо плодоносящих среди высоких и низких.

Такое распределение деревьев по группам говорит о том, что, с одной стороны, урожайность молодых генеративных деревьев в значительной мере связана с возрастом начала плодоношения: чем раньше оно началось, тем больше шишек в кроне. В свою очередь, возраст начала плодоношения связан с достижением определенной высоты дерева и «критического» размера кроны, то есть на уровне насаждения быстрорастущие индивиды раньше вступают в плодоношение. С другой стороны, урожайность не во всех случаях является прямой функцией размера кроны, а зависит от конкретного генотипа дерева. Это подтверждается тем, что в каждой высотной группе есть индивиды высокоурожайные и низкоурожайные, что открывает возможности для селекции на семенную продуктивность в группах, различающихся по скорости роста.

Важным моментом в данной работе является поиск признаков вегетативной структуры кроны, наиболее тесно связанных с семенной или пыльцевой продуктивностью. Судя по полученным результатам, высокие деревья с неширокой кроной наиболее перспективны для селекции на пыльцевую продуктивность, поскольку имеют более протяженный мужской ярус и благодаря этому имеют больше мужских побегов в кроне. Деревья с широкой кроной перспективны для селекции на семенную продуктивность. В зрелых естественных насаждениях наблюдается аналогичная закономерность. Деревья с широкой канделябровидной кроной дают больший урожай шишек с объема кроны. Деревья с овальной неширокой (и, как правило, ажурной) кроной характеризуются высокой пыльцевой продуктивностью [3]. Данная закономерность наблюдается и в нашем случае – в культурах с разреженной посадкой.

В естественных насаждениях связь между вегетативными и генеративными процессами прямая и тесная: возможность обильно плодоносить появляется лишь у тех деревьев, которые быстро растут и быстро выходят в первый ярус насаждения. Анализ корреляционных связей между основными признаками роста и плодоношения в исследуемых нами культурах показал, что при свободном росте и отсутствии внутри- и межвидовой конкуренции связи между ростом и плодоношением сильно ослабевают (рис. 3). Графическое выражение связи между такими ключевыми признаками, как (1) число шишек на 1 м² горизонтальной проекции кроны и (2) площадь горизонтальной проекции кроны, показывает, что она отсутствует ($r = -0,05$), поскольку плодоносить могут деревья с любой скоростью роста. Однако выделяются 2 дерева, которые сочетают минимальные размеры кроны и высокую урожайность.

Представим себе гипотетическую орехоплодную плантацию, созданную из вегетативного потомства этих двух деревьев. Если у анализируемых нами исходных культур при средней площади кроны (30 м²) среднее число шишек на 1 м² составляет 10 шт., то полный урожай с 1000 м² площади культур составит 10 000 шт. На гипотетической плантации с небольшими кронами (23 м²), но с высоким урожаем с единицы площади кроны (35 шишек) итоговый урожай со всей плантации может достигать 35 000 шишек на 1000 м². Грубое округление показывает, что селекционный потенциал может достигать 350 %, что свидетельствует о перспективности такого способа отбора для создания орехоплодных плантаций.

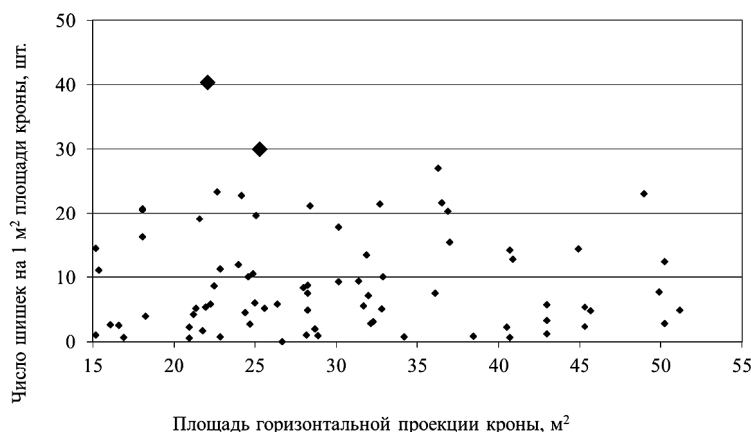


Рис. 3. Связь между числом шишек на 1 м² площади проекции кроны и ее площадью у деревьев кедра сибирского на плантации с разреженной посадкой

Fig. 3. The relationship between the number of cones per 1 m² of crown projection area and area crown of Siberian cedar trees on a sparse stand plantation

У культур с разреженной посадкой есть значительные преимущества и для селекции на рост – в высоту, по объему ствола, по его качеству. Актуален, например, отбор по соотношению размеров ствола и кроны. Если целью отбора будут деревья с крупным стволом и узкой кроной, то они могут давать больше древесины с единицы площади. Хотя эта тема, в отличие от селекции хвойных на семенную продуктивность, уже рассматривалась в мировой науке [18, 25].

Анализ корреляционных связей между высотой ствола и площадью горизонтальной проекции кроны (рис. 4) показал, что связь между этими признаками довольно слабая ($r = +0,26$), а значит, не так функционально зависима, как, например, связь высоты и диаметра ствола ($r = +0,72^*$).

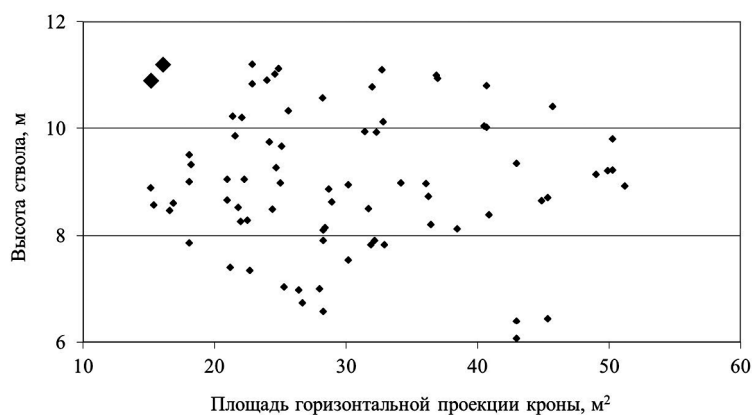


Рис. 4. Связь между высотой и площадью горизонтальной проекции кроны у деревьев кедра сибирского на плантации с разреженной посадкой

Fig. 4. The relationship between the height and area of the horizontal projection crown of Siberian cedar trees on a plantation with sparse planting

Крупным маркером выделены 2 дерева, сочетающие большую высоту ствола при минимальных размерах кроны. Такие генотипы – быстро растущие в высоту и при этом узкокронные, то есть не занимающие большой площади в лесных культурах, представляют собой ценный объект для селекции на древесину.

Заключение

Полученные результаты показывают, что в целом исходная идея о зависимости эффективности отбора от условий, в которых формировалось насаждение, подтверждается. В естественном сомкнутом насаждении многие из выявленных в ходе данного исследования лидеров по плодоношению отстали бы из-за среднего или даже слабого роста и, возможно, не достигли бы репродуктивного возраста. На плантации с разреженной посадкой они сохранились и вышли в лидеры по плодоношению. Раннее начало плодоношения, даже в условиях разреженной посадки, положительно связано со скоростью роста в прегенеративный период онтогенеза. Уровень различий по генеративному развитию деревьев оказался гораздо выше, чем по вегетативному. Обилие мужских побегов в кроне и относительная протяженность мужского генеративного яруса определялись прежде всего высотой деревьев. На развитие женской генеративной сферы активный рост дерева в высоту, напротив, не имел заметного влияния. Контрастные различия в связях мужской и женской сферы с различными показателями роста являются, по нашему мнению, весьма интересным результатом. Высокие деревья с неширокой кроной наиболее перспективны для селекции на пыльцевую продуктивность, поскольку имеют более протяженный мужской ярус и благодаря этому имеют больше мужских побегов в кроне. Деревья с широкой кроной перспективны для селекции на семенную продуктивность. Однако урожайность не во всех случаях является прямой функцией размера кроны, а зависит от конкретного генотипа дерева. Это подтверждается тем, что в каждой группе (высоких, средних и низких деревьев) есть индивиды высокоурожайные и низкоурожайные, что открывает возможности для селекции на семенную продуктивность в группах, различающихся по уровню роста. Использование расчетного относительного показателя «на 1 кв. м. площади горизонтальной проекции кроны» дало возможность для отбора лучших деревьев по урожайности (сочетающих минимальный размер кроны с количеством шишек на единицу площади кроны) и росту (сочетающих большую высоту и узкую крону).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авров Ф.Д. Самоопыление, перекрестное скрещивание и свободное опыление кедр сибирского в припоселковом южно-таежном кедровнике // Проблемы кедр: Семеношение и размножение. Томск: Томский науч. центр СО АН СССР, 1990. Вып. 4. С. 3–7. [Avrov F.D. Self-pollination, Cross-breeding and Free Pollination of Siberian Cedar in the Southern Taiga Peri-urban Cedar Forest. *Problems of Cedar: Seed-bearing and Reproduction*. Tomsk, Tomsk Scientific Center SB RAS USSR, 1990, vol. 4, pp. 3–7].
2. Воробьев В.Н., Воробьева Н.А., Горошкевич С.Н. Рост и пол кедр сибирского. Новосибирск: Наука, 1989. 167 с. [Vorobyov V.N., Vorobyeva N.A., Goroshkevich S.N. *Growth and Gender of Siberian Cedar*. Novosibirsk, Nauka, 1989. 167 p.].

3. Горошкевич С.Н. Пространственно-временная и структурно-функциональная организация кроны кедра сибирского: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2011. 37 с. [Goroshkevich S.N. *Spatio-temporal and Structural-functional Organization of the Siberian Cedar Crown*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Tomsk, 2011. 37 p.].

4. Долголиков В.И. Семенное потомство быстрорастущих деревьев хвойных пород // Выращивание и формирование высокопродуктивных насаждений в южной подзоне тайги / под ред. В.Е. Максимова. Л.: Наука, 1984. С. 55–60. [Dolgov V.I. Seed Progeny of the Fast-growing Conifer Trees. *Cultivation and Formation of Highly Productive Plantations in the Southern Taiga Subzone*. Leningrad, Nauka, 1984, pp. 55–60].

5. Ирошников А.И. Полиморфизм популяций кедра сибирского // Изменчивость древесных растений Сибири / под ред. Е.Г. Минина, А.И. Ирошникова. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1974. С. 77–103. [Iroshnikov A.I. Polymorphism of Siberian Cedar Populations. *Variability of Woody Plants of Siberia*. Krasnoyarsk, ILID SB AS USSR, 1974, p. 77–103].

6. Матвеева Р.Н., Милютин Л.И., Буторова О.Ф., Братилова Н.П. Отбор деревьев кедра сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 9–20. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9. [Matveyeva R.N., Mil'utin L.I., Butorova O.F., Bratilova N.P. Selection of the Highly Reproductive Siberian Cedar Trees at a Geographic Tree Seed Orchard. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 9–20].

7. Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 272 с. [Nekrasova T.P. *Biological Basis of the Siberian Cedar Seed Production*. Novosibirsk, Nauka, 1972. 272 p.].

8. Титов Е.В. Плантационное выращивание кедровых сосен: учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2004. 165 с. [Titov Ye.V. *Plantation Growth of the Cedar Pines: Study Guide*. Voronezh, 2004. 165 p.].

9. Титов Е.В. Эффективный метод определения урожайности прививок кедра сибирского // Лесотехн. журн. 2015. № 3. С. 112–122. DOI: [10.12737/14159](https://doi.org/10.12737/14159) [Titov E.V. Effective Method for Determining the Yield of Grafts of Siberian Cedar. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2015, no. 3, pp. 112–122]. DOI: [10.12737/14159](https://doi.org/10.12737/14159)

10. Шутов И.В. Плантационное лесоводство. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. 366 с. [Shutov I.V. *Plantation Forestry*. SPb, 2007. 366 p.].

11. Яблоков А.С. Лесосеменное хозяйство. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 466 с. [Yablokov A.S. *Forest Seed Management*. Moscow, 1965. 466 p.].

12. Burczyk J., Adams W.T., Shimizu J.Y. Mating Patterns and Pollen Dispersal in a Natural Knobcone Pine (*Pinus attenuata* Lemmon) Stand. *Heredity*, 1996. vol. 77, pp. 251–260.

13. El-Kassaby Y.A. Clonal-row vs. Random Seed Orchard Designs: Mating Pattern and Seed Yield of Western Hemlock (*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.). *Forest Genetics*. 2003, vol. 10, pp. 121–127.

14. Feilberg L., Soegaard B. Historical Review of Seed Orchards. *Forestry Commission Bulletin*, 1975, vol. 54, pp. 1–8.

15. Funda T., El-Kassaby Y. A. Seed Orchard Genetics. *CAB Reviews*, 2012, vol. 7, no. 013, pp. 1–23.

16. Giertych M. Seed Orchard Designs. *Forestry Commission Bulletin*, 1975, vol. 54, pp. 25–37.

17. Ho R.H., Schooley H.O. A Review of Tree Crown Management in Conifer Orchards. *The Forestry Chronicle*, 1995, vol. 71, no. 3, pp. 311–316.

18. Kleinschmit J., Khurana D.K., Gerhold H.D., Libby W.J. Past, Present, and Anticipated Applications of Clonal Forestry. *Clonal Forestry II* / Ed. by M.R. Ahuja, W.J. Libby. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993, pp. 9–41. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84813-1_2

19. Lindgren D., Karlsson B., Andersson B., Prescher F. Swedish Seed Orchards for Scots Pine and Norway Spruce. *Seed Orchard Conference. Umea, Sweden*, 2008, pp. 142–153.
20. Matheson A.C., Willcocks K.W. Seed Yield in a Radiata Pine Seed Orchard Following Pollarding. *New Zealand Journal Forestry Sciences*, 1976, vol. 6, pp. 14–18.
21. Matras J. A Review of the Seed Orchard Programme in Poland. *Seed Orchard Conference. Umea, Sweden*, 2008, pp. 165–171.
22. Nikkanen T. A Review of Scots Pine and Norway Spruce Seed Orchards in Finland. *Seed Orchard Conference. Umea, Sweden*, 2008, pp. 195–198.
23. Sala A., Hopping K., McIntire E. J.B., Delzon S., Crone E.E. Masting in White-bark Pine (*Pinus albicaulis*) Depletes Stored Nutrients. *New Phytologist*. 2012, vol. 196, pp. 189–199.
24. Webber J.E. Western Hemlock: A Manual for Tree Improvement Seed Production. *Research Branch. B.C. Ministry of Forests and Range*. 2000. Work Paper 44. 27 p.
25. Zobel B.J., Barber J., Brown C.L., Perry T.O. Seed Orchards – Their Concept and Management. *Journal of Forestry*, 1958, vol. 56, pp. 815–825.

PATTERN OF DIVERSITY IN THE VEGETATIVE AND GENERATIVE CROWN STRUCTURE OF THE SIBERIAN STONE PINE ON A SEED ORCHARD WITH SPARSE TREE PLANTING*

S.N. Velisevich, Candidate of Biology; ResearcherID: [N-1661-2015](#), ORCID: [0000-0003-4929-1681](#)

A.V. Popov, Postgraduate Student; ResearcherID: [K-7504-2017](#), ORCID: [0000-0001-7578-2455](#)
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), prosp. Akademicheskiiy, 10/3, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: velisevich@imces.ru, tomskceltic@gmail.com

Studies of the diversity of economically valuable traits in forest tree species are of great interest not only for forest selection and practical silviculture, but also important as a general biological problem. Among the objects of attention of breeders, a special place is occupied by cone-bearing species such as Siberian stone pine. Its cultivation through the forest tree plantations for wood and for cone-bearing will allow in the future to reduce the damage for natural ecosystems significantly. The purpose of this work was to analyze the structure of diversity in growth and generative development of the Siberian stone pine crown on a specially created plantation, where a low level of natural selection makes it possible to more efficiently select for early reproduction, growth and seed productivity. This plantation is located in the south of the area (Western Siberia, south of Tomsk region). It was created from stone pine seeds of the local population, that were sown in 1977 as forest crops with standard density (0,75 x 3 м). At the age of 10, they were planted out at a distance of 8 x 8 m. The vegetative and generative development of 89 trees aged 40 years was analyzed. We used a retrospective method that allows reconstructing of the tree organogenesis and growth on the scars on the bark of the shoots. The start of sexual reproduction has been reconstructed; a comparative characteristic of the vegetative and generative development of the tree crown has been carried out. The results show that, in general, the initial idea of the dependence of the efficiency of selection on the conditions in which the trees were formed is confirmed. In the natural dense stands, many

*The article is published within the framework of implementation of the scientific journals development program in 2019, based on proceedings of XIX International conference of the young scholars “Forests of Euro-Asia – The Southern Ural” (August 25-30, 2019. Chelyabinsk).

of the leader trees in cone-bearing, which we found in our study, could fall behind due to slow growth and did not live to reproductive age. On the plantation where sparse tree planting was applied, they survived and became the leaders in cone-bearing. Early start of reproduction, even under conditions of sparse tree planting, is positively correlated with the growth rate in the pre-generative period of ontogenesis ($r = + 0.65$). The level of variations in the generative development of trees was much higher than in the vegetative one. The abundance of male shoots in the crown and the relative length of the male generative zone of crown were determined primarily by the height of the trees. On the contrary, the active growth of the tree in height did not have a noticeable influence on the development of the female shoots and the female generative zone of crown. Contrasting differences in the traits of male and female crown development with growth traits are very interesting result, in our opinion. Tall trees with a narrow crown are most promising for pollen productivity breeding, since they have a longer male generative zone and because of this they have more male shoots in the crown. Trees with a broad crown are promising for seed production breeding. Although seed productivity is not in all cases a direct function of the size of the crown, but depends on the specific genotype of the tree. This is confirmed by the fact that in each group (high, medium and low trees) there are individuals of high-cone-bearing and low-cone-bearing, which is promising for seed production breeding in groups of different growth levels. Using the calculated relative traits «1 m² of the area of the horizontal projection of the crown onto the ground surface» made it possible to select the best trees for seed production (combining the minimum size of the crown with the number of cones per unit area of the crown) and growth (combining greater height and narrow crown).

For citation: Velisevich S.N., Popov A.V. Pattern of diversity in the vegetative and generative crown structure of the siberian stone pine on a seed orchard with sparse tree planting. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 35–47. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.35

Funding: This work is supported by the Russian Science Foundation under grant no. 18-16-00058.

Keywords: Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour), seed orchard, sparse tree planting, growth, sexual reproduction, diversity, selection.

Поступила 02.08.19 / Received on August 2, 2019

УДК 634.0.32:631.543.82

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.48

ОПЫТ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ РУБОК В ЛЕСНЫХ ПОЛОСАХ КАМЕННОЙ СТЕПИ

В.И. Турусов, д-р с.-х. наук, акад. РАН; ORCID: [0000-0002-5853-9549](https://orcid.org/0000-0002-5853-9549)

А.С. Чеканышкин, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ORCID: [0000-0002-7848-2818](https://orcid.org/0000-0002-7848-2818)

А.А. Лепёхин, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.; ORCID: [0000-0002-3847-1161](https://orcid.org/0000-0002-3847-1161)

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева, д. 81, квартал V, пос. 2-го участка Института им. В.В. Докучаева, Таловский р-н, Воронежская обл., Россия, 397463; e-mail: niish1c@mail.ru

В последние десятилетия в лесоаграрных ландшафтах областей и краев России все более актуальной становится проблема ухудшения состояния и сохранности защитных лесных насаждений, утраты ими эффективного эколого-мелиоративного воздействия на агроэкосистемы. Для лесных полос, находящихся в возрастной стадии спелости и перестойности, наиболее распространенными процессами их деградации является разрастание опушек, изреживание верхнего яруса и внутренних рядов древостоя, наличие большого количества сухих и больных деревьев. В подавляющем большинстве исправить такие насаждения рубками ухода невозможно и требуется срочное проведение работ по их реконструкции. Цель исследований – оценка проведенных приемов реконструктивных рубок в лесных полосах неудовлетворительного состава и состояния на показатели роста и лесопатологическое состояние культур дуба черешчатого. Исследования проведены в 1986–2018 гг. на территории Каменной Степи (Таловский р-н Воронежской обл.). Объектом исследований послужила реконструируемая неудовлетворительная по составу и состоянию древостоя 9-рядная полезащитная лесная полоса № 206 с созданием культур дуба черешчатого. Насаждение было создано в 1948 г. по древесно-кустарниковому типу смешения: Кя–Кя–(Д+Аж)–Кя–(Д+Аж)–Кя–(Д+Аж)–Кя–Кя, где Кя – клен ясенелистный, Д – дуб черешчатый, Аж – акация желтая. Направление ее – с севера на юг. Ширина междурядий – 2,3 м, расстояние между деревьями в ряду – 0,7 м. Опыт заложен в трех вариантах: 1 – контроль, лесная полоса в исходном состоянии – 0,46 га; 2 – устройство продольных коридоров в лесной полосе – 0,50 га; 3 – устройство диагональных коридоров под углом 30° к продольной оси лесной полосы – 0,38 га. Установлено, что более тщательная подготовка почвы и благоприятный световой режим в диагональных коридорах позволили обеспечить лучший рост культур дуба черешчатого на протяжении периода исследований, и к 40-летнему возрасту превышение над продольными коридорами (западным и восточным) составило по высоте – 18,1 и 3,8%, а по диаметру ствола – 40,2 и 14,8 %. Максимальные приросты по высоте и диаметру наблюдаются с 17...20 лет. Характерным является отставание развития деревьев в крайних рядах относительно центральных рядов. Соблюдение режимов рубок ухода в опытных вариантах культур дуба черешчатого способствовало наличию 76,6...93,0 % жизнеспособных экземпляров от общего количества деревьев. Наибольшее значение наблюдается в более выгодной световой экспозиции – диагональных коридорах, где их среднее превышение, по сравнению с продольными коридорами (западным и восточным), составляет 9,4 и 5,7 %. Отсутствие рубок ухода (прореживания) за лесными культурами привело к увеличению доли лесного отпада в вариантах опыта на 5,9...7,7 %, нежизнеспособных деревьев и ограниченно жизнеспособных соответственно на 10,3...13,0 % и 10,9...9,4 %, при одновременном сокращении жизнеспособных деревьев на 26,7...31,6 %.

Для цитирования: Турусов В.И., Чеканышкин А.С., Лепёхин А.А. Опыт реконструктивных рубок в лесных полосах Каменной Степи // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 48–56. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.48

Ключевые слова: лесные насаждения, реконструктивные рубки, культуры дуба черешчатого, лесопатологическое состояние деревьев.

Введение

В настоящее время в Воронежской области площадь защитных лесных насаждений составляет 170,8 тыс. га, в том числе полезащитных – 57,1 тыс. га, противоэрозионных – 53,0 тыс. га [11]. Около 70 % полезащитных лесных полос вступило в возрастную стадию спелости и перестойности, они утратили свои эколого-мелиоративные функции. Особенно это касается полезащитных лесных полос, в составе которых значительную часть занимают клен ясенелистный, ясень пушистый, береза или тополь. В них наиболее распространены являются прогрессирующие процессы разрастания опушек, изреживания верхнего яруса и внутренних рядов древостоя, наблюдается большой процент сухих и больных деревьев. Все это требует срочного выполнения соответствующих лесохозяйственных мероприятий, в частности проведения работ по реконструкции насаждений, которые уже невозможно исправить рубками ухода.

В агролесомелиорации реконструкция насаждений – это восстановление их защитных свойств путем коренного изменения породного состава, ширины, числа рядов, типа смешения, конструкции [1, 3, 6, 7, 9]. Работы по реконструкции малоценных лесных насаждений в России и за рубежом относятся к числу сложных, малоизученных и не всегда оказываются успешными [4, 10, 12, 13, 14, 15].

Цель исследований – оценка проведенных приемов реконструктивных рубок в лесных полосах неудовлетворительного состава и состояния на показатели роста и лесопатологическое состояние культур дуба черешчатого.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в 1986–2018 гг. на стационарном опыте, заложенном в 1976 г. сотрудниками отдела агролесомелиорации НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева на территории Каменной Степи (Таловский р-н Воронежской обл.). Объектом исследований послужила реконструируемая неудовлетворительная по составу и состоянию древостоя 9-рядная полезащитная лесная полоса № 206 с созданием культур дуба черешчатого. Насаждение было создано в 1948 г. по древесно-кустарниковому типу смешения: Кя–Кя–(Д+Аж)–Кя–(Д+Аж)–Кя–(Д+Аж)–Кя–Кя, где Кя – клен ясенелистный, Д – дуб черешчатый, Аж – акация желтая. Направление ее – с севера на юг. Ширина междурядий – 2,3 м, расстояние между деревьями в ряду – 0,7 м.

Опыт заложен в южной части лесной полосы на площади 1,34 га в трех вариантах: 1-й – контроль, лесная полоса в исходном состоянии – 0,46 га; 2-й – устройство продольных коридоров в лесной полосе – 0,50 га; 3-й – устройство диагональных коридоров под углом 30° к продольной оси лесной полосы – 0,38 га (см. рис. на с. 50).

При закладке опыта в составе древесных пород 28-летнего насаждения преобладал клен ясенелистный – 98 %. На долю дуба черешчатого приходилось около 2 %. В летне-осенний период при проведении рубок на варианте 2 организовали два продольных коридора: а) западный (шириной 6,9 м) – за счет вырубki 2-го и 3-го рядов клена ясенелистного с западной стороны; б) восточный (шириной 11,5 м) – за счет вырубki 2–5-го рядов клена ясенелистного с восточной стороны. Наряду с этим производилась вырубка подростa клена ясенелистного, произрастающего в рядах погибшего дуба черешчатого. С целью сохранения защитной высоты реконструируемого насаждения и создания эффекта коридора для будущих культур дуба черешчатого оставили несрубленными 1, 4 и 9-й ряды клена ясенелистного от западной стороны. В варианте 3 прорубили три диагональных коридора, шириной 10 м каждый, в направлении с северо-востока на юго-запад с оставлением нетронутых участков материнского насаждения такой же ширины. Затем в образованных коридорах выкорчевали все пни.



Космоснимок лесной полосы № 206 с вариантами реконструкции (1, 2 и 3 – варианты опыта)

Satellite imagery of the forest strip No. 206 displaying the alternatives of the reconstruction (1, 2 and 3 – versions of the experiment)

На протяжении вегетационного периода 1977 г. в продольных и диагональных коридорах производилась подготовка почвы под посев культур дуба черешчатого. Следует отметить, что по всей площади продольных коридоров перед выполнением обработки почвы во второй половине мая проведено сплошное опрыскивание арборицидом 2,4-Д аминная соль 5%-й концентрации в водном растворе с применением ранцевых опрыскивателей, в результате чего весь самосев древесных пород погиб. Затем междурядья между бывшими рядами деревьев клена ясенелистного были вспаханы плугом без отвалов и проведены три культивации орудием КРТ-3 (последняя 4 сентября). В диагональных коридорах проведены вспашка плугом без отвалов, дискование бороной БДТ-2,2 в четыре следа и культивация КРТ-3 (последняя 30 августа).

В 1978 г. в продольных коридорах, по предварительно взрыхленной почве, выселили желуди дуба черешчатого в старых междурядьях: в западном – три

ряда, в восточном – пять. Высеивали по пять желудей в лунку, расстояние между лунками – 1 м. В диагональных коридорах высеивали по три ряда желудей дуба с технологией посева аналогично продольным коридорам. Всхожесть желудей была 100 %, вследствие чего в посевных лунках появилось по пять сеянцев. По мере роста культур дуба в 1978–1986 гг. проводили агротехнические и лесохозяйственные уходы, включающие в себя удаление сорной растительности ручной прополкой и уничтожение арборицидами поросли на пнях вырубленных деревьев клена ясенелистного.

В 1987 г. проведено первое прореживание культур дуба черешчатого в лунках с оставлением 2–3 лучших экземпляров. Кроме этого для улучшения условий роста культур дуба в обоих вариантах выполнили их осветление, при котором в варианте 2 между продольными коридорами вырубил оставленный 4-й ряд клена ясенелистного, а в крайних (1-й и 9-й) рядах материнского насаждения удалили отмершие деревья и затеняющие дуб сверху в коридорах. В варианте 3 вдоль диагональных коридоров вырубил только деревья клена ясенелистного, нависающие над деревьями дуба черешчатого. Последующими рубками в 1990 и 1991 гг. количество деревьев в лунке доведено до одного.

Изучение роста культур дуба черешчатого и оценку их лесопатологического состояния осуществляли с применением общепринятых методик и инструктивных указаний [2, 5, 8]. Проводили сплошной пересчет деревьев с замером их высоты и диаметра ствола у корневой шейки и на высоте груди (1,3 м), определяли общее лесопатологическое состояние каждого дерева с отнесением к категории: жизнеспособные (ЖС), ограниченно жизнеспособные (ОЖ), нежизнеспособные (НЖ), лесной отпад (ЛО).

Результаты исследования и их обсуждение

Сопоставление показателей роста культур дуба черешчатого показало их различие на вариантах опыта. Более тщательная подготовка почвы и благоприятный световой режим в диагональных коридорах позволили обеспечить лучший рост культур дуба черешчатого на протяжении периода исследований, и к 40-летнему возрасту превышение над продольными коридорами (западным и восточным) составило по высоте – 18,1 и 3,8 %, а по диаметру ствола – 40,2 и 14,8 % (табл. 1).

Таблица 1

Динамика роста культур дуба черешчатого

Годы наблюдений	Продольные коридоры				Диагональные коридоры	
	западный		восточный			
	Н, м	D, см	Н, м	D, см	Н, м	D, см
1986, до р. у.	0,8	0,8 / –	1,4	1,6 / –	2,0	2,3 / –
1987, после р. у.	1,0	1,0 / –	1,9	2,1 / –	2,4	2,9 / –
1989, до р. у.	1,1	1,3 / –	2,6	3,1 / –	3,2	4,3 / –
1990, после р. у.	1,3	1,5 / –	3,0	3,6 / –	3,7	4,9 / –
1991, до р. у.	1,9	– / 1,2	3,2	– / 2,7	4,0	– / 3,5
1991, после р. у.	1,9	– / 1,2	3,2	– / 2,8	4,2	– / 3,6
1993, без р. у.	2,5	– / 1,9	4,2	– / 4,2	4,7	– / 4,8
1995, до р. у.	2,9	– / 2,4	4,5	– / 4,6	5,1	– / 5,3

Окончание табл. 1

Годы наблюдений	Продольные коридоры				Диагональные коридоры	
	западный		восточный			
	Н, м	D, см	Н, м	D, см	Н, м	D, см
1995, после р. у.	3,4	– / 3,1	5,0	– / 5,4	5,6	– / 6,1
2000, без р. у.	5,5	– / 6,0	7,1	– / 7,4	7,3	– / 8,5
2005, без р. у.	7,8	– / 7,4	9,6	– / 9,8	9,2	– / 10,4
2009, до р. у.	8,2	– / 9,2	9,9	– / 11,5	9,7	– / 12,4
2009, после р. у.	8,5	– / 10,0	10,2	– / 12,0	10,4	– / 13,3
2014, без р. у.	10,7	– / 11,3	11,8	– / 14,1	12,1	– / 16,6
2018, без р. у.	11,6	– / 12,7	13,2	– / 15,5	13,7	– / 17,8

Примечание. Н – высота деревьев; D – диаметр ствола: в числителе – у корневой шейки; в знаменателе – на высоте 1,3 м; р. у. – рубки ухода.

Анализируя развитие культур дуба черешчатого по вариантам опыта, можно отметить, что максимальные приросты по высоте и диаметру наблюдаются с 17...20 лет. Характерным является отставание развития деревьев в крайних рядах относительно центральных рядов. Например, в западном коридоре из трех рядов шириной 6,9 м средний диаметр девятилетнего дуба в первом (западном) ряду был 0,7 см, во втором (центральном) – 1,3 см, в третьем (восточном) – 0,9 см, а средняя высота – 0,8; 1,2 и 0,9 м. В 2005 г., спустя 18 лет после удаления четвертого ряда, затеняющего коридор, средний диаметр культур дуба первого ряда составил 5,6 см, второго ряда – 8,8 см и третьего – 7,8 см, а средняя высота соответственно ряду – 6,3; 8,9 и 8,1 м.

В восточном коридоре 9-летние культуры дуба черешчатого первого (западного) ряда достигли высоты 1,0 м; второго – 2,5 м; третьего – 2,8 м, четвертого – 2,0 м; пятого (восточного) ряда – 1,3 м со средним диаметром соответственно ряду – 1,5; 3,9; 4,0; 3,4 и 1,3 см. В возрасте 27 лет культуры дуба черешчатого имели в первом ряду следующие таксонометрические показатели: высота – 7,9 м, диаметр – 7,5 см, во втором – 10,0 м и 10,5 см, в третьем – 10,8 м и 11,2 см, в четвертом – 10,0 м и 10,1 см, в пятом ряду – 7,7 м и 7,3 см.

В диагональных коридорах в возрасте 9 лет средняя высота и диаметр дуба черешчатого составляли в первом ряду – 2,0 и 2,6 см, во втором – 2,8 и 3,3 см, в третьем – 2,5 и 2,9 см. В 27-летних культурах средняя высота дуба в первом ряду составила 7,9 м, а средний диаметр – 8,6 см, во втором ряду – 10,4 и 12,1 см, в третьем ряду – 9,3 и 10,4 см.

Это можно объяснить угнетением культур дуба черешчатого со стороны клена ясенелистного, который после формирования коридоров интенсивно наращивал крону в их сторону и являлся серьезным конкурентом за свет, влагу и питание. Судя по состоянию дуба в центральных рядах, для нормального его роста в коридорах реконструируемого насаждения крайние ряды культур должны размещаться не ближе 3,5...4 м от клена ясенелистного, с обязательным расширением этой зоны посредством вырубki клена через 6–10 лет после закладки культур дуба.

В процессе роста лесные культуры нельзя оставлять без лесоводственных уходов, так как ухудшается санитарное состояние и жизнеспособность насаждений (табл. 2).

Таблица 2

Лесопатологическое состояние культур дуба в вариантах опыта

Годы наблюдений	Распределение деревьев по категориям состояния в продольных коридорах, %				Распределение деревьев по категориям состояния в диагональных коридорах, %			
	ЖС	ОЖ	НЖ	ЛО	ЖС	ОЖ	НЖ	ЛО
1987, после р. у.	76,6/83,7	16,1/12,5	7,3/3,8	0/0	92,8	7,0	0,2	0
1991, после р. у.	86,0/89,3	13,8/10,3	0,2/0,1	0/0,3	93,0	7,0	0	0
1995, после р. у.	84,8/85,6	14,4/14,0	0,8/0,4	0/0	89,8	10,2	0	0
2005, без р. у.	65,4/70,1	17,6/16,3	11,7/10,9	5,3/4,7	75,2	12,3	8,7	3,8
2018, без р. у.	53,2/58,1	25,3/23,4	13,8/11,7	7,7/6,8	63,1	20,7	10,3	5,9

Примечание. В числителе – в западном коридоре; в знаменателе – в восточном коридоре; р. у. – рубки ухода; ЖС – жизнеспособные; ОЖ – ограниченно жизнеспособные; НЖ – нежизнеспособные; ЛО – лесной отпад.

Из данных табл. 2 видно, что соблюдение режимов рубок ухода в 1987–1995 гг. в опытных вариантах культур дуба черешчатого способствовало наличию 76,6...93,0 % жизнеспособных экземпляров от общего количества деревьев. Наибольшее значение наблюдается в более выгодной световой экспозиции – диагональных коридорах, где их среднее превышение, по сравнению с продольными коридорами (западным и восточным), составляет 9,4 и 5,7 %. Отсутствие рубок ухода (прореживания) за лесными культурами с 1996 по 2018 г. привело к увеличению доли лесного отпада в вариантах опыта на 5,9...7,7 %, нежизнеспособных деревьев и ограниченно жизнеспособных соответственно на 10,3...13,0 % и 10,9...9,4 %, при одновременном сокращении жизнеспособных деревьев на 26,7...31,6 %.

Заключение

Данный опыт показывает, что при реконструктивных рубках основной причиной, сдерживающей успешный рост и высокую жизнеспособность культур дуба черешчатого, является недостаточное освещение их кроны. В широких насаждениях следует создавать продольные коридоры, а в узких лесных полосах – поперечные или диагональные, что обеспечит нормальный световой режим деревьям дуба черешчатого. Вырубку деревьев материнского насаждения, конкурирующих с главной породой, необходимо заканчивать не позднее 10-летнего возраста лесных культур.

Для получения устойчивых и мелиоративно-эффективных насаждений в культурах дуба черешчатого необходимо на протяжении их роста и развития проводить своевременные рубки ухода: осветление и прочистки через 2–5 лет, прореживания через 5–10 лет, проходные рубки через 10–15 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агролесомелиорация / под ред. акад. РАСХН А.Л. Иванова, К.Н. Кулика. 5-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с. [*Afforestation amelioration*. Ed. by A.L. Ivanov, K.N. Kulik. 5th edition. Volgograd, VNIALMI Publ., 2006. 746 p.].
2. Артюховский А.К., Харченко Н.А., Быков Н.А., Арефьев Ю.Ф. Экологические основы лесозащиты в насаждениях зеленых зон. Воронеж: ВГУ, 1994. 128 с. [Artyukhovskiy A.K., Harchenko N.A., Bykov N.A., Aref'ev Yu.F. Ecological Basics of Forest Protection in Green Areas. Voronezh, VGU Publ., 1994. 128 p.].
3. Бабенко Д.К. Методические указания по изучению рубок ухода, реконструкции и лесовозобновления в пологих защитных лесных полосах степной и полупустынной зон СССР. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1978. 38 с. [Babenko D.K. Guidelines for the Study of Thinning, Reconstruction and Reforestation in the Forest Shelter Belts of the Steppe and Semi-desert Zones of the USSR. Volgograd, VNIALMI Publ., 1978. 38 p.].
4. Бугаев В.А., Гладышева Н.В. Реконструкция малоценных лесов. Воронеж: ВГУ, 1991. 128 с. [Bugaev V.A., Gladysheva N.V. The Reconstruction of Low-value Forests. Voronezh, VGU Publ., 1991. 128 p.].
5. Дударев А.Д., Гладышева Н.В., Лозовой А.Д. Методика и техника работ на пробных площадях. Воронеж, 1978. С. 5–32. [Dudarev A.D., Gladysheva N.V., Lozovoy A.D. Methods and Techniques of Work on the Test Areas. Voronezh, 1978, 80 p.].
6. Маттис Г.Я., Павловский Е.С., Калашиников А.Ф. и др. Справочник агролесомелиоратора. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 248 с. [Mattis G.Ya., Pavlovskiy E.S., Kalashnikov A.F. et al. Agricultural Amelioration Directory. Moscow, *Lesnaya promyshlennost'*, 1984. 248 p.].
7. Меринов Г.П. К вопросу о реконструкции защитных лесных полос // Сб. науч. работ Научно-исследовательского института сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева. М.: Россельхозиздат, 1965. Т. 3. С. 262–269. [Merinov G.P. On the Issue of Reconstruction of Protective Forest Belts. *Sbornik nauchnykh rabot Nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyaystva Tsentral'no-Chernozemnoy polosy im. V.V. Dokuchayeva*. Moscow, Rossel'hozizdat, 1965, vol. 3, pp. 262–269.].
8. Наставление по организации и ведению лесопатологического мониторинга в лесах России. М.: ВНИИЛМ, 2001. 88 с. [*Manual on Organization and Management of Forest Pathology Monitoring in the Forests of Russia*. Moscow, VNIILM, 2001. 88 p.].
9. Павловский Е.С. Устройство агролесомелиоративных насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 128 с. [Pavlovskiy E.S. Design of the Agroforestry Plantations. Moscow, *Lesnaya promyshlennost'*, 1973. 128 p.].
10. Решетников В.Ф., Сторожихина К.М. Состояние и перспективы реконструкции малоценных насаждений методом создания лесных культур дуба черешчатого в лесхозах Беларуси // Тр. БГТУ. № 1. Лесное хозяйство. 2016. № 1. С. 56–60. [Reshetnikov V.F., Storozhishina K.M. State and Prospects of Reconstruction of Invaluable Stands by Method of Creation of the Pedunculate Oak Forest Plantations in Forestries of Belarus]. *Trudy BGTU*, 2016, no.1: *Forestry*, pp. 61–64].
11. Чеканышкин А.С., Лепехин А.А. Состояние защитного лесоразведения в Центрально-Черноземной зоне // Лесн. журн. 2015. № 4. С. 9–17. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.4.9](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.4.9) [Chekanyshkin A.S., Lepyokhin A.A. Condition of Protective Afforestation in Central Black Soil Territories. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2015, no. 4, pp. 9–17].
12. Чмыр А.Ф. Структура и экология вторичных лиственных лесов на вырубках и их реконструкция. СПб.: СПбНИИЛХ, 2002. 234 с. [Chmyr A.F. The Structure and Ecology of Secondary Deciduous Forests and Their Reconstruction. St. Petersburg, SPbNIILKH Publ., 2002. 234 p.].

13. Achim E., Manea G., Vijulie I., Cocos O., T'rlă L. Ecological Reconstruction of the Plain Areas Prone to Climate Aridity Through Forest Protection Belts. Case Study: Dăbuleni Town, Oltenia Plain, Romania. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, vol. 14, pp. 154–163.
14. Bogle T., Cornelis van Kooten G. Options for Maintaining Forest Productivity After Natural Disturbance: A principal Agent Approach. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 26, pp. 138–144.
15. Louranen J., Rikala R., Smolander H. Mashine Planting of Norway Spruce by Bracke and Ecoplanter: An Evalution of Soil Preparation, Planting Method and Seedling Performace. *Silva Fennica*, 2011, vol. 45(3), pp. 341–357.

EXPERIENCE OF THE RECONSTRUCTION CUTTING IN THE FOREST BELTS OF KAMENNAYA STEPPE

V.I. Turusov, Doctor of Agriculture, Academician of RAS; ORCID: [0000-0002-5853-9549](https://orcid.org/0000-0002-5853-9549)

A.S. Chekanyshkin, Candidate of Agriculture, Leading Researcher; ORCID: [0000-0002-7848-2818](https://orcid.org/0000-0002-7848-2818)

A.A. Lepyokhin, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher; ORCID: [0000-0002-3847-1161](https://orcid.org/0000-0002-3847-1161)

V.V. Dokuchayev Scientific Research Institute of Agriculture of the Central-Chernozem zone, 81, kvartal 5, pos. 2-go uchastka Instituta im V.V. Dokuchayeva, Talovskiy rayon, Voronezh Region, 397463, Russian Federation; e-mail: niish1c@mail.ru

In the last decade in forest-agrarian landscapes areas and territories of Russia all the more urgent becomes the problem of deterioration and preservation of protective forests, loss of effective ecological-reclamation impact on agro-ecosystems. For forest strips that are in the age stage of maturity and overrun, the most common processes of their degradation are the growth of forest edges, thinning of the upper tier and inner rows of the stand, the presence of a large number of dry and diseased trees. In the overwhelming majority, it is impossible to correct such plantations by thinning, and urgent work is needed to reconstruct them. The purpose of the research is to evaluate the methods of reconstructive logging in forest belts of unsatisfactory composition and condition for growth indicators and the pathology of pedunculate oak cultures. Studies conducted in 1986–2018 on the territory of the Stone Steppe (Talovsky district of the Voronezh region). The object of research was the reconstructed unsatisfactory in composition and state of the stand 9-row forest shelter strip No. 206 with the creation of pedunculate oak cultures. The plantation was created in 1948 according to the tree-shrub type of mixing: Kya – Kya– (D + Azh) – Kya– (D + Azh) –Kya– (D + Azh) –Kya – Kya, where Kya – maple american, D – English oak, Azh – acacia yellow. Its direction is from north to south. Row spacing – 2.3 m, the distance between the trees in a row – 0.7 m. Experience laid in three versions: 1 – control, forest strip in the initial state – 0.46 ha; 2 – arrangement of longitudinal corridors in the forest belt – 0.50 ha; 3 – device diagonal corridors at an angle of 30° to the longitudinal axis of the forest belt – 0.38 ha. It was established that a more thorough soil preparation and favorable light conditions in diagonal corridors ensured the best growth of pedunculate oak cultures during the study period and by the age of 40, the elevation above the longitudinal corridors (western and eastern) was 18.1 and 3, 8%, and the diameter of the trunk – 40.2 and 14.8%. The maximum increments in height and diameter are observed 17–20 years. Characteristic is the lag development trees in extreme ranks relatively central series. Compliance with thinning regimes in experimental variants of pedunculate oak contributed to the presence of 76.6...93.0% viable specimens of the total number of trees. The highest value is observed in a more favorable light exposure – diagonal

corridors, where their average excess, compared with the longitudinal corridors (western and eastern), is 9.4 and 5.7%. The absence of thinning (thinning) of forest crops led to an increase in the share of forest mortality in the options of experience by 5.9...7.7% of non-viable trees and partially viable, respectively, by 10.3...13.0% and 10.9...9,4%, while reducing viable trees by 26.7...31.6%.

For citation: Turusov V.I., Chekanyshkin A.S., Lepyokhin A.A., Experience Reconstructive Felling in the Forest Belts of Kamennaya Steppe. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 48–56. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.48

Keywords: forest plantations, stands, reconstruction cuttings logging, culture plantation of English oak, forest pathological condition state of trees.

Поступила 25.04.19/Received on April 25, 2019

УДК 630*64

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.57

ПРОГНОЗ АДАПТИВНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ

М.А. Семёнов, канд. биол. наук, зам. директора по научной и инновационной работе;

ResearcherID: [M-8712-2016](#), ORCID: [0000-0002-3709-1669](#)

А.А. Высоцкий, д-р с.-х. наук, ведущий науч. сотр.; ORCID: [0000-0001-9974-2482](#)

В.И. Пащенко, мл. науч. сотр.; ORCID: [0000-0002-3748-1886](#)

Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: ilgis@lesgen.vtn.ru

Усиление антропогенного воздействия на биосферу в XX в. и в начале XXI в. привело к потеплению климата на планете, аридизации и опустыниванию территорий и снижению способности экосистем к саморегуляции и естественному восстановлению. В результате произошло значительное сокращение количества естественных и девственных лесов на планете и формирование на больших площадях производных низкокачественных насаждений. По данным Межправительственной группы экспертов ООН, потепление будет продолжаться и в дальнейшем. При этом в ближайшие 30–40 лет будет возрастать частота возникновения засух, а потери мировой экономики от трансформации климата к 2100 г. могут составить до 20 % от глобального валового продукта. В соответствии с палеонтологическими данными, климат на земном шаре никогда не был стабильным: периоды потепления и похолодания периодически сменяли друг друга. Современное потепление в отличие от предыдущих исторических периодов носит в основном антропогенный характер и в европейской части России происходит главным образом в холодное время года, поэтому амплитуда колебания среднегодовых показателей температуры уменьшается, что заметно снижает континентальность климата. Однако происходящее повышение среднегодовой температуры воздуха в Центрально-Черноземном и Поволжском регионах свидетельствует не об улучшении условий произрастания растений, а об усилении нестабильности климата: повысилась частота повторения засух, аномально суровых и аномально теплых зим, а растения все в большей степени стали подвергаться многократному воздействию стрессовых факторов. Результаты специальных исследований позволили сделать вывод о возможных значительных изменениях климата уже в обозримом будущем. Очевидно, что для минимизации последствий от этих процессов необходимо применять превентивные меры по адаптации к меняющимся климатическим условиям таких метеозависимых отраслей, как лесное хозяйство и агропромышленный комплекс. В случае непринятия необходимых мер изменение климата в лесостепном районе и районе степей Европейской России неизбежно отразится на состоянии лесных экосистем. При этом следует ожидать как изменения их породного состава и уровня биоразнообразия, так и повышения рисков возникновения лесных пожаров, массового распространения вредителей и болезней леса, увеличения частоты и силы экстремальных погодных явлений и ухудшения социально-экономических условий ведения лесного хозяйства. Исследования динамики климата проводились путем изучения температурного режима воздуха и количества выпадавших в регионе осадков за длительный период времени и анализа имеющихся литературных сведений отечественных и международных климатических организаций. Возможные изменения климата оценивали по методике, разработанной межправительственной группой экспертов ООН с учетом будущих выбросов парниковых газов и концентрации их в атмосфере. На основании выполненных исследований сделан вывод, что при развитии даже самого мягкого сценария в конце XXI в. в лесостепном районе и районе степей европейской части России произойдут значительные изменения климатических параметров, которые неиз-

бежно затронут состояние лесных экосистем. При этом ключевыми факторами, имеющими первостепенное значение в ответе управляемых лесов на эти изменения климата, будут лесные пожары, вредители и болезни леса и неблагоприятные погодные условия. В настоящее время лесные экосистемы располагают довольно высоким адаптационным потенциалом. Однако в связи с появлением перечисленных выше факторов риска потребуется проведение упреждающих и стратегических адаптационных мероприятий различной степени заблаговременности, направленных на снижение возможных негативных последствий, способных вывести экосистему из состояния равновесия. Использование только ситуационных и тактических мер не будет способствовать укреплению потенциала лесных экосистем и неизбежно приведет к значительным экономическим потерям.

Для цитирования: Семёнов М.А., Высоцкий А.А., Пащенко В.И. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 57–69. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.57

Ключевые слова: изменение климата, лесные экосистемы, адаптация, биосфера, вредители и болезни леса, экстремальные погодные факторы, саморегуляция, восстановление.

Введение

Потепление климата на планете как следствие человеческой деятельности привлекло внимание ученых еще в 60–70-е гг. XX в. Анализ результатов специальных исследований позволил сделать вывод о возможных негативных последствиях трансформации климата уже в обозримом будущем [2, 3, 14, 16].

В лесостепной зоне европейской части России (ЕЧР) среднегодовая температура воздуха за многолетний период с 1871 по 1996 г. возросла с 5,6 до 6,2 °С. Такого значительного повышения среднегодовой температуры в регионе не происходило за весь период метеорологических наблюдений [4, 6, 8, 17]. Для современного периода потепления характерно прохождение его главным образом в холодное время года, в результате чего уменьшается амплитуда колебаний среднегодовых показателей и заметно снижается континентальность климата. Однако происходящая трансформация свидетельствует не об улучшении условий произрастания растений, а об усилении нестабильности погодных условий: повышается частота повторения засух, аномально суровых и аномально теплых зим, а растения все в большей степени подвергаются многократному воздействию стрессовых факторов [8, 9].

Трансформация климата в настоящее время стала основной экологической проблемой планетарного масштаба. Мировое сообщество, с одной стороны, все больше осознает значение лесов в биосфере, с другой – необходимость усиления роли государств в совершенствовании долгосрочных правовых основ лесоправления и принятии превентивных мер воздействия.

Повышение среднегодовой температуры холодного периода года и увеличение продолжительности вегетации в разных экосистемах оказывают неоднозначное влияние на растения. В условиях короткого вегетационного периода, когда температура является лимитирующим фактором, а повышение концентрации углекислого газа в атмосфере активизирует процесс фотосинтеза, умеренное потепление климата позитивно воздействует на рост растений [8, 17, 18]. Однако положительное воздействие изменения климата на леса прекратилось практически еще в 50-е гг. XX в., когда усиление ростовых процессов сменилось угнетением в связи с температурными стрессами [9].

Для изучения динамики и причин деформации климата, влияния на природу и жизнь людей, возможности адаптации и снижения антропогенного воздействия на климатическую систему планеты Организацией Объединенных Наций (ООН) совместно с Всемирной метеорологической службой в 1988 г. создана Межправительственная группа экспертов по климату (МГЭИК).

Происходящие изменения климата активно изучаются и в нашей стране. Эти работы ведутся Научно-исследовательским институтом глобального климата и экологии, являющимся головным учреждением в международных программах и официальным представителем России в МГЭИК, а также научно-исследовательскими учреждениями системы Рослесхоза (СПбНИИЛХ, СевНИИЛХ, ВНИИЛГИСбиотех и др.).

Созданные структуры сыграли значительную роль в оказании помощи правительствам ряда стран по определению политики реагирования на изменения климата в соответствии с Рамочной конвенцией ООН (1992 г.), Киотским протоколом (2007 г.) и Парижским соглашением (2015 г.). Выполненные исследования показали, что выбросы углекислого газа в атмосферу с 1970 по 2004 г. увеличились почти на 80 %, а концентрация парниковых газов в настоящее время значительно превосходит показатели доиндустриального периода. Главным образом это связано с антропогенной деятельностью людей, сжигающих огромное количество ископаемых видов топлива и интенсивно вырубающих леса [2, 16]. Происходящие изменения климата влияют не только на состояние атмосферы и водных объектов, но и на образ жизни и здоровье людей. Это воздействие будет и дальше возрастать во всех регионах мира, а при возникновении экстремальных явлений будут увеличиваться сила и частота стрессов [4].

По мнению ученых, прогрессирующее потепление климата на преобладающей территории Российской Федерации является главным вектором наблюдаемых изменений погодных условий, который нельзя не учитывать в деятельности таких метеозависимых отраслей, как лесное хозяйство и агропромышленный комплекс. Поэтому основные направления адаптации к изменяющемуся климату в лесном хозяйстве и экологии – разработка и реализация превентивных мер, направленных на снижение негативных последствий [3, 16].

В 2015 г. на Парижском форуме по климату 195 государств-участников договорились осуществлять меры, направленные на усиление стоков и сокращение эмиссии углерода, чтобы не допустить роста средней температуры воздуха на планете к 2100 г. более чем на 2,0 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем. Значительное повышение этого показателя, обусловленное выбросом в атмосферу парниковых газов, может привести к необратимым последствиям для экологии планеты.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в лесостепном районе и районе степей ЕЧР, представляющих собой особую ландшафтную зону с переходным от леса к степи теплым и сухим умеренно-континентальным климатом [15]. Средняя лесистость лесостепной зоны, куда входит и часть областей Центрального федерального округа, составляет 27,5 %, Центрально-Черноземного региона – только 8,7 %. Леса северной части лесостепной зоны представляют собой крупные лесные массивы естественных насаждений основных лесообразующих пород.

Сосновые боры и дубравы Центрального Черноземья – это относительно небольшие разрозненные лесные массивы, значительная часть которых объявлена заповедной. В степной зоне естественных лесных массивов нет, а искусственные насаждения представлены главным образом лесными полосами различного назначения [5].

Динамику температурного режима и количества выпадавших осадков в регионе изучали по материалам областных метеорологических станций, распространение энтомологических вредителей и болезней леса и состояние лесных экосистем в связи с изменяющимся климатом – по лесоустроительным и отчетным данным областных управлений лесного хозяйства и Рослесозащиты.

Возможные изменения климата в XXI в. оценивали по методике МГЭИК ООН с учетом различных вариантов будущих выбросов парниковых газов и концентрации их в атмосфере.

Для расчетов уязвимости использовали методологический подход, разработанный немецкими учеными, который предварительно был апробирован специалистами СПбНИИЛХ [11, 12].

На основании полученных результатов исследований, проведенных ВНИИЛГИСбиотех в 2017–2018 гг., и с учетом опыта СПбНИИЛХ были выявлены ключевые факторы, имеющие первостепенное значение при прогнозировании ответа управляемых лесов лесостепного и степного районов ЕЧР на изменение климата: это лесные пожары, вредители леса, болезни леса, неблагоприятные погодные условия.

Нормированный показатель рассчитывали по следующей формуле:

$$X_{i,0-1} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}},$$

где $X_{i,0-1}$ – нормированный показатель в диапазоне от 0 до 1; X_i – отдельные точки массива данных для преобразования; $X_{\max}$, $X_{\min}$ – максимальное и минимальное значение данного показателя.

Способность к адаптации определяли как разницу между единицей и нормированным показателем.

Сценарии адаптации системы ведения лесного хозяйства в управляемых лесах лесостепного района и района степей ЕЧР разрабатывали путем подбора необходимых лесохозяйственных мероприятий и их комбинаций с учетом основополагающих принципов ведения лесного хозяйства [1, 7, 12].

Результаты исследования и их обсуждение

За 100-летний период (1900–2000 гг.) потепление в России составило 1,00 °С, на планете в целом – 0,66 °С, а с 1907 по 2006 г. этот показатель по России достиг 1,29 °С, что также выше, чем на земном шаре. Интенсивность потепления со временем нарастала как в целом по России, так и в Центральном регионе ЕЧР.

Многолетнее устойчивое повышение температуры воздуха и колебание количества выпадающих осадков на территории лесостепного района и района степей ЕЧР ведут к увеличению интенсивности и количества опасных гидрометеорологических явлений. При этом даже небольшие изменения средних величин могут приводить к значительным колебаниям экстремумов. В таких случаях в исследуемом районе следует ожидать изменений породного состава и уровня биоразнообразия основных типов лесных экосистем, повышения

риска возникновения лесных пожаров, массового распространения вредителей и болезней леса, увеличения частоты и силы экстремальных погодных явлений и ухудшения социально-экономических условий ведения лесного хозяйства.

При трансформации температуры воздуха более чем на 1,0 °C в регионе, скорее всего, будет снижаться продуктивность основных типов лесных экосистем, при этом увеличится частота повторения засух, нарушится равновесное состояние лесных экосистем и продолжится деградация дубрав и усыхание березовых древостоев.

В 2020–2030 гг. заметных сдвигов в положении экотопов не будет. Они будут возможны только во внутренней структуре сообществ. В 2050 г. при предполагаемом изменении температуры на 1,7...1,8 °C летом и особенно зимой повысится испаряемость влаги, в результате увеличится площадь осинников, которые по балкам и речным долинам будут продвигаться в степную зону.

Для лесохозяйственного производства особенно важно знать, насколько предсказуем климат планеты на десятилетия вперед.

Оценить предстоящие изменения климата можно только с учетом будущих выбросов парниковых газов и концентрации их в атмосфере. МГЭИК разработала набор сценариев возможных выбросов парниковых газов в атмосферу в XXI в., которые основаны на различных гипотезах о мировом развитии и определяются демографическими, экономическими и технологическими факторами и от которых зависят такие показатели, как интенсивность использования ископаемого топлива и объем выбросов в атмосферу парниковых газов. Сформированные модели выбросов углеродного цикла позволяют рассчитывать изменения концентрации парниковых газов, а по ним – климат на определенный период времени. Такие прогнозы, конечно, условны, так как зависят конкретно от того, какой из сценариев выберет человечество в будущем для своего развития.

Специальный доклад МГЭИК [7, 19] содержит набор из 40 сценариев, охватывающих широкий диапазон возможных в будущем выбросов и концентраций парниковых газов (CO_2 , CH_4 и NO_2), которые объединены в 4 группы в зависимости от возможных вариантов изменения ситуации в будущем:

A_1 – объединяет сценарии с очень быстрыми темпами экономического роста, ускоренным внедрением более эффективных технологий, ростом народонаселения Земли с пиком этого показателя в середине века;

A_2 – описывает очень неоднородный мир, основополагающим признаком которого является самообеспечение и сохранение самобытности, экономическое развитие региональной направленности, а экономический рост более медленный, чем в других группах;

B_1 – соответствует единой для всего мира направленности развития, как и в группе A_1 ; главное внимание здесь уделяется глобальным решениям в сфере экономической устойчивости, но без дополнительных инициатив, связанных с климатом;

B_2 – аналогична группе A_2 и исходит из стратегии локальных решений проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости. Мир с постоянно увеличивающимся глобальным населением и более низкими, чем в группе A_2 , темпами роста, промежуточным уровнем развития и менее быстрыми и более разнообразными технологическими изменениями по сравнению с сюжетными линиями групп A_1 и B_1 . Эта группа, как и B_1 , ориентирована на охрану окружающей среды и социальную справедливость [7, 11, 12] (табл. 1).

Таблица 1

**Возможные изменения климатических параметров на территории ЕЧР
по отношению к современному климату в начале (2011–2030 гг.),
середине (2041–2060 гг.) и конце (2080–2099 гг.) XXI в.**

Сценарий климатических изменений	Значение параметра* по периодам		
	2011–2030 гг.	2041–2060 гг.	2080–2099 гг.
B ₁	$\frac{1,2 \pm 0,4}{4,9 \pm 3,2}$	$\frac{2,1 \pm 0,7}{5,8 \pm 2,7}$	$\frac{3,0 \pm 1,1}{9,1 \pm 3,3}$
A ₁ B ₁	$\frac{1,2 \pm 0,7}{3,3 \pm 3,0}$	$\frac{2,8 \pm 0,8}{8,0 \pm 3,5}$	$\frac{4,4 \pm 1,2}{11,7 \pm 4,6}$
A ₂	$\frac{1,0 \pm 0,5}{3,5 \pm 2,3}$	$\frac{2,5 \pm 0,7}{6,4 \pm 2,9}$	$\frac{5,1 \pm 1,2}{12,4 \pm 4,5}$

Как видно из табл. 1, к концу XXI в. среднегодовая температура воздуха на планете может повыситься от 1,9 до 6,3 °С, а суммарное количество осадков – от 6,3 мм до 16,9 мм в зависимости от того, какой сценарий на планете будет осуществляться человечеством. Значительные изменения климатических параметров в лесостепном районе и районе степей ЕЧР могут произойти при даже самом мягком сценарии, что неизбежно затронет состояние лесных экосистем.

Ожидаемое потепление климата в разных регионах Российской Федерации неоднозначно. К югу потепление будет меньше, за исключением самой южной части лесостепного района и района степей ЕЧР, но нигде на территории России не ожидается снижение температуры. Прогнозируется значительное повышение уже в первой половине XXI в.

Ожидаемый рост годового количества осадков в теплое время года на территории России будет происходить главным образом в северных регионах, где возможно увеличение повторяемости ливней и связанных с ними экстремальных режимов погоды. В южных регионах европейской части страны ожидается уменьшение количества летних осадков, рост среднего за год количества которых при потеплении климата обычно приводит к увеличению стока на большинстве водосборов [13].

Таким образом, при развитии даже самого мягкого сценария к концу XXI в. в лесостепном районе и районе степей ЕЧР произойдут значительные изменения климатических параметров, которые неизбежно затронут состояние лесных экосистем. При этом прогнозируемое изменение климата на территории ЕЧР будет происходить по сезонам года.

Уязвимость биологических систем к сопротивлению меняющимся факторам внешней среды определяли как адаптационный потенциал [12].

В ходе исследований выявлены ключевые факторы, имеющие первостепенное значение при прогнозировании ответа управляемых лесов на изменение климата: лесные пожары, вредители и болезни леса, неблагоприятные погодные условия.

По каждой из 11 исследованных областей лесостепного и степного регионов определены расчетные значения каждого из факторов для оценки способности экосистем к адаптации (табл. 2–5). Более низкие значения нормированных показателей в табл. 2–5 свидетельствуют о меньшей уязвимости. С повышением уязвимости снижается способность к адаптации.

Для оценки лесных площадей по фактической горимости (табл. 2) рассчитывали относительную площадь пожара, т. е. площадь пожара, которая приходится на единицу площади территории в среднем за сезон по многолетним данным. Для исследуемых областей определено отношение средней площади, пройденной пожарами за год, к общей площади лесов региона (за период с 2000 по 2017 г.).

Таблица 2

Расчетные значения ключевого фактора уязвимости «лесные пожары»

Область	Горимость лесов (относительная площадь пожаров за год), %	Нормированное значение показателя	Способность к адаптации
Белгородская	0,031	0,09	0,91
Волгоградская	0,150	0,44	0,56
Воронежская	0,314	0,92	0,08
Курская	0,009	0,02	0,98
Липецкая	0,322	0,95	0,05
Орловская	0,002	0,00	1,00
Пензенская	0,039	0,11	0,89
Ростовская	0,340	1,00	0,00
Самарская	0,045	0,13	0,87
Саратовская	0,096	0,28	0,72
Тамбовская	0,210	0,62	0,38

Видно, что наименее уязвимыми к пожарной опасности являются управляемые леса Белгородской, Курской, Орловской и Пензенской областей. Способность к адаптации лесов этих административных единиц находится в интервале 0,89–1,00. Наименее способны к адаптации и наиболее уязвимы управляемые леса Ростовской, Липецкой и Воронежской областей.

Расчет по ключевому фактору «вредители леса» (табл. 3) производили по областям, в которых в течение изучаемого периода были случаи гибели лесов от воздействия насекомых-вредителей.

Таблица 3

Расчетные значения ключевого фактора уязвимости «вредители леса»

Область	Относительная площадь насаждений, погибших от вредителей, %	Нормированное значение показателя	Способность к адаптации
Воронежская	0,001	0,034	0,966
Курская	0,011	0,379	0,621
Липецкая	0,001	0,034	0,966
Орловская	0,029	1,000	0,000

Наименее уязвимы к вредителям леса насаждения Воронежской и Липецкой областей. При значительных изменениях климата неблагоприятная ситуация по этому ключевому фактору может сложиться в Орловской области.

Наибольшим адаптационным потенциалом к ключевому фактору уязвимости «болезни леса» (табл. 4) обладают управляемые леса Волгоградской, Ростовской, Саратовской и Курской областей, наименьшим – Тамбовской области.

Таблица 4

Расчетные значения ключевого фактора уязвимости «болезни леса»

Область	Относительная площадь насаждений, погибших от болезней, %	Нормированное значение показателя	Способность к адаптации
Белгородская	0,026	0,255	0,754
Волгоградская	0,001	0,000	1,000
Воронежская	0,041	0,408	0,592
Курская	0,016	0,153	0,847
Липецкая	0,070	0,704	0,296
Орловская	0,006	0,051	0,049
Пензенская	0,040	0,398	0,602
Ростовская	0,003	0,020	0,980
Самарская	0,009	0,082	0,918
Саратовская	0,004	0,031	0,969
Тамбовская	0,099	1,000	0,000

Из табл. 5 видно, что к ключевому фактору «неблагоприятные погодные условия» наименее уязвимы лесные насаждения Белгородской, Курской, Пензенской и Воронежской областей. Наименьшим адаптационным потенциалом в этом отношении располагают управляемые леса Орловской и Тамбовской областей.

Таблица 5

Расчетные значения ключевого фактора уязвимости «неблагоприятные погодные условия»

Область	Относительная площадь насаждений, погибших от неблагоприятных погодных условий, %	Нормированное значение показателя	Способность к адаптации
Белгородская	0,004	0,000	1,000
Волгоградская	0,081	1,000	0,000
Воронежская	0,014	0,130	0,870
Курская	0,004	0,001	0,999
Липецкая	0,040	0,468	0,532
Орловская	0,011	0,090	0,010
Пензенская	0,009	0,065	0,935
Ростовская	0,023	0,247	0,753
Самарская	0,070	0,857	0,143
Саратовская	0,018	0,177	0,823
Тамбовская	0,080	0,987	0,013

В лесостепном районе и районе степей ЕЧР за 20-летний период с 1997 по 2017 г. по состоянию на 01.01.2017 г. в сравнении с 1997 г.:

увеличилась площадь лесных земель, занятых сосной обыкновенной, за исключением Воронежской, Орловской и Самарской областей;

увеличилась площадь насаждений низкоствольной формы дуба и снизилась площадь, занятая дубом высокоствольным, в Воронежской, Липецкой и Самарской областях;

увеличилась площадь насаждений дуба высокоствольного и уменьшилась площадь низкоствольной формы дуба в Белгородской и Пензенской областях;

уменьшилась общая площадь дубовых насаждений в Ростовской области; отмечено усыхание березовых и деградация дубовых насаждений по всем областям.

На основании качественной оценки уязвимости сделан вывод, что лесные экосистемы лесостепного района и района степей ЕЧР располагают довольно высоким адаптационным потенциалом. Однако по таким факторам риска, как лесные пожары, вредители и болезни леса и неблагоприятные погодные условия, требуется проведение адаптационных мероприятий различной степени заблаговременности, направленных на снижение возможных негативных последствий, способных вывести экосистему из состояния равновесия [1].

Наибольшим приоритетом при формировании и осуществлении стратегий и программ адаптации лесного хозяйства лесостепного района и района степей ЕЧР обладают упреждающие и стратегические меры, осуществляемые органами государственной власти. Использование только ситуативных и тактических мер не будет способствовать укреплению адаптационного потенциала лесов, оно будет только снижать экономическую эффективность реализации стратегии адаптации в целом [19].

Практическое осуществление комплекса адаптационных мероприятий в соответствии с предусмотренным типом и приоритетностью позволит оптимизировать структуру лесов, повысить устойчивость их к насекомым-вредителям и болезням, сохранить и приумножить ресурсы побочного пользования, снизить пожарную опасность в лесах и потери от экстремальных погодных условий, сократить эмиссию углекислого газа в атмосферу.

Разработанные сценарии адаптации системы ведения лесного хозяйства лесостепного района и района степей ЕЧР следует рассматривать как первоначальный этап при выборе стратегии лесопользования, на основании которого будут создаваться адаптационные программы [10, 11]. В них предусмотрено применение сортов сосны обыкновенной селекции ВНИИЛГИСбиотех: «Красавица» (повышенной смолопродуктивности и устойчивости к корневой губке) и «Острогжская» (повышенной засухоустойчивости).

На основании проведенной оценки уязвимости управляемых лесов лесостепного района и района степей ЕЧР с учетом основных параметров климатических прогнозов разработаны следующие сценарии адаптации системы ведения лесного хозяйства в управляемых лесах региона [11, 12]:

- сценарий A_1 текущего, или «наблюдаемого» изменения климата;
- сценарий B_1 SRES (Special report on emission scenarios);
- сценарий A_2 SRES (Special report on emission scenarios).

Для каждого сценария предложен комплекс адаптационных мер по всем ключевым факторам.

При развитии событий по сценарию A_1 текущего, или наблюдаемого, изменения климата леса лесостепного и степного районов ЕЧР будут адаптационно устойчивы. Адаптационные меры могут быть применимы лишь для некоторых областей. Дополнительные меры адаптации по ключевому фактору уязвимости «лесные пожары» могут потребоваться в Воронежской, Белгородской, Липецкой и Тамбовской областях; по ключевому фактору «неблагоприятные погодные условия» – в Волгоградской, Самарской и Тамбовской областях.

При развитии событий по сценарию B₁ SRES лесные экосистемы в большинстве областей будут иметь достаточную устойчивость ко всем ключевым факторам угроз. Их адаптационная способность оценена как удовлетворительная. Применительно к ним потребуется лишь непрерывный мониторинг за состоянием систем и применение адаптационных мер, в том числе полномасштабных лесохозяйственных мероприятий, чтобы не допустить переход систем в состояние более низкой адаптационной способности.

Развитие событий по жесткому сценарию A₂ SRES предполагает, что система будет нуждаться в принятии дополнительных мер, кроме тех, что будут применяться по сценарию B₁ SRES.

Таким образом, влияние постоянно меняющегося климата на лесные экосистемы лесостепного района и района степей ЕЧР может быть снижено за счет совершенствования системы противопожарного мониторинга и организационно-управленческой структуры охраны леса, борьбы с лесными пожарами, своевременного проведения санитарно-оздоровительных мероприятий и организационно-просветительской работы с населением.

Заключение

Многолетнее устойчивое повышение температуры воздуха и колебание количества выпавших осадков на территории лесостепного района и района степей европейской части России определяют неустойчивость климата, интенсивность и количество экстремальных и опасных гидрометеорологических явлений.

При развитии любого, даже самого мягкого, сценария в регионе произойдут значительные изменения климата, которые неизбежно затронут состояние лесных экосистем.

Лесные экосистемы располагают довольно высоким адаптационным потенциалом. Однако по таким факторам риска, как лесные пожары, вредители и болезни леса и неблагоприятные погодные условия, потребуется проведение мероприятий различной степени заблаговременности, направленных на снижение возможных негативных последствий, способных вывести экосистему из состояния равновесия.

Для снижения негативного влияния постоянно меняющихся климатических факторов на лесные экосистемы необходимо: увеличивать покрытую лесом площадь и проводить лесовосстановление на селекционно-генетической основе; своевременно осуществлять уборку ветровалов и горельников, совершенствовать систему мониторинга, профилактировать появление корневых гнилей в лесных культурах и молодняках; проводить карантинные мероприятия при переработке семян и выращивании посадочного материала; регулировать популяции копытных животных; строго соблюдать лесохозяйственные правила расположения и сроки примыкания лесосек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адаптация лесов к изменению климата: глобальный обзор последствий изменения климата для лесов и людей и варианты адаптации. IUFRO, 2009. 24 с. Режим доступа: https://www.iufro.org/download/file/26209/4496/Policy_brief_RU_pdf (дата обращения: 12.02.2019). [Forest Adaptation to Climate Change: A Global Overview of the Impacts of Climate Change on Forests and People and Adaptation Options. IUFRO, 2009. 24 p.].

2. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с. [Budyko M.I. *Past and Future Climate*. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1980. 352 p.].

3. Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра РФ. 2016. Вып. 360. С. 45–78. [Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. About the Dynamics of the Agroclimatic Indicators of Conditions of Sowing, Wintering and Formation of the Yield of the Main Grain Crops. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of Hydrometcentre of Russia], 2016, iss. 360, pp. 45–78].

4. Гальцов А.П., Чаплыгина А.С. Второе совещание по проблеме преобразования климата // Изв. АН СССР. Сер.: География. 1962. № 5. С. 184–186. [Gal'tsov A.P., Chaplygina A.S. Second Meeting on Climate Change. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Geografiya*, 1962, no. 5, pp. 184–186].

5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2016 году. М.: Росгидромет, 2017. 70 с. [A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2016. Moscow, Roshydromet Publ., 2017. 70 p.].

6. Климат Воронежа: справ. / под ред. Ц.А. Швер, С.А. Павлова. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 104 с. [Climate of Voronezh: A Handbook. Ed. by Ts.A. Shver, S.A. Pavlova. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1968. 104 p.].

7. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Катцов В.М., Малевский-Малевич С.П., Мохов И.И., Надежина Е.Д., Семенов В.А., Спорышев П.В., Хон В.Ч. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38–49. [Meleshko V.P., Golitsyn G.S., Govorkova V.A., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Kattsov V.M., Malevsky-Malevich S.P., Mokhov I.I., Nadyozhina E.D., Semenov V.A., Sporyshev P.V., Khan V.Ch. Anthropogenic Climate Changes in Russia in the 21st Century: An Ensemble of Climate Model Projections. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology], 2004, no. 4, pp. 38–49].

8. Олссон Р. Использовать или охранять? Бореальные леса и изменение климата // Устойчивое лесопользование. 2013. № 2(35). С. 36–45. [Olsson R. Use or Guard? Boreal Forests and Climate Change. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2013, no. 2(35), pp. 36–45].

9. О стратегических оценках последствий изменений климата в ближайшие 10–20 лет для природной среды и экономики Союзного государства: докл. 2009. 19 с. Режим доступа: http://www.primgidromet.ru/news/rosgidromet_opublikoval_doklad (дата обращения: 12.02.2019) [On Strategic Assessments of the Impact of Climate Change in the Next 10–20 Years on the Environment and Economy of the Union State: A Report. 2009. 19 p.].

10. Оценка влияния лесохозяйственных мероприятий на цикл углерода и разработка сценариев адаптации системы ведения лесного хозяйства в управляемых лесах северной и средней тайги европейско-уральской части России в связи с ожидаемыми изменениями климата: заключ. отчет о НИР / Федеральное агентство лесного хозяйства. Архангельск: СЕВНИИЛХ, 2016. 299 с. [Assessment of the Impact of Forest Management Activities on the Carbon Cycle and Development of Adaptation Scenarios of the Forest Management System in the Managed Forests of the Northern and Middle Taiga of the European-Ural Part of Russia in Connection with the Expected Climate Changes: Final Report on Scientific Research Activity. Arkhangelsk, SEVNIILKh Publ., 2016. 299 p.].

11. Разработка сценариев адаптации системы ведения лесного хозяйства в управляемых лесах лесостепного района и района степей европейской части Российской Федерации в связи с ожидаемыми изменениями климата: промежуточ. отчет о НИР / Федеральное агентство лесного хозяйства. Воронеж: ВНИИЛГИСбиотех, 2017. 169 с. [Development of Adaptation Scenarios of the Forest Management System in the Managed Forests of the Forest-Steppe and Steppe Regions of the European Part of the Russian Federation in Connection with the Expected Climate Changes: Final Report on Scientific Research Activity. Voronezh, VNIILGISbiotekh Publ., 2017. 169 p.].

12. Разработка сценариев адаптации системы ведения лесного хозяйства в управляемых лесах Северо-Запада европейской части России в связи с ожидаемыми изменениями климата. Оценка наиболее вероятных изменений в лесном покрове, требующих применения адаптационных мер разной степени заблаговременности: заключ. отчет о НИР / Федеральное агентство лесного хозяйства. СПб.: СПбНИИЛХ, 2016. 116 с. [*Development of Adaptation Scenarios of the Forest Management System in the Managed Forests of the North-West of the European Part of Russia in Connection with the Expected Climate Change. Assessment of the Most Likely Changes in Forest Cover that Require Adaptation Measures of Varying Degrees of Advance: Final Report on Scientific Research Activity*. Saint Petersburg, SPbNIILKh Publ., 2016. 116 p.].

13. Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития Российской Федерации. Росгидромет, 2005. 178 с. Режим доступа: <http://www.meteorf.ru/upload/iblock/e5b/3380-Verstka-19-may-2006-A4-compr.pdf> (дата обращения: 19.05.2016) [*Results of Climate Change Studies for Sustainable Development Strategies of the Russian Federation*. Rosgidromet, 2005. 178 p.].

14. Сазонов Б.И. Природа современных изменений климата // Проблемы дендрохронологии и дендроклиматологии: тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. по вопросам дендрохронологии, 29–31 мая 1990 г. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 122. [Sazonov B.I. Nature of Modern Climate Change. *Issues of Dendrochronology and Dendroclimatology: Abstracts of the 5th All-Union Meeting on Issues Related to Dendrochronology*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990, p. 122].

15. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей / под ред. Ф.Н. Милькова. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1961. 261 с. [*Physical and Geographical Zoning of the Central Chernozem Regions*. Ed. by F.N. Mil'kov. Voronezh, VGU Publ., 1961. 261 p.].

16. Callendar G.S. The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1938, vol. 64, iss. 275, pp. 223–240. DOI: [10.1002/qj.49706427503](https://doi.org/10.1002/qj.49706427503)

17. Lloyd A.H., Bunn A.G. Responses of the Circumpolar Boreal Forest to 20th Century Climate Variability. *Environmental Research Letters*, 2007, vol. 2, no. 4. 13 p. DOI: [10.1088/1748-9326/2/4/045013](https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045013)

18. Rahmstorf S. Shifting Seas in the Greenhouse? *Nature*, 1999, vol. 399, pp. 523–524. DOI: [10.1038/21066](https://doi.org/10.1038/21066)

19. Strandberg G. *Baltic Challenges and Chances for Local and Region Development Generated by Climate Change*. Centre for Climate Science and Policy Research (CSPR). Stockholm, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2010. 20 p.

ADAPTATION SCENARIOS IN FOREST MANAGEMENT DUE TO THE POSSIBLE CLIMATE CHANGES

M.A. Semenov, Candidate of Biology, Deputy Director for Scientific Research and Innovation; ResearcherID: [M-8712-2016](https://orcid.org/0000-0002-3709-1669), ORCID: [0000-0002-3709-1669](https://orcid.org/0000-0002-3709-1669)

A.A. Vysotskiy, Doctor of Agriculture, Leading Research Scientist; ORCID: [0000-0001-9974-2482](https://orcid.org/0000-0001-9974-2482)

V.I. Pashchenko, Junior Research Scientist; ORCID: [0000-0002-3748-1886](https://orcid.org/0000-0002-3748-1886)

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: ilgis@lesgen.vrn.ru

The increased human impact on the environment in the 20th and the beginning of the 21st centuries has resulted in global warming, aridization, desertification and reduced ability of ecosystems to adapt to changes and recover from disturbances. As a result, the world natural virgin forests have receded drastically and been replaced by lower quality second-growth forests over large areas. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of the United Nations the warming will continue even further, which will lead to

increased drought frequency in the next 30–40 years; as a result by the end of the century the world economy can lose up to 20 % of the global gross product. The paleontological data indicate that the climate on our planet has never been stable: periods of warming have always been followed by periods of cooling and vice versa. Modern warming, in contrast to previous historical periods, is anthropogenic and in the European part of Russia occurs mainly in the cold season. Therefore, the amplitude of oscillation in the average annual temperature decreases, which significantly reduces the climate continentality. However, the increased mean annual air temperature in the Central Chernozem and Volga regions reflects the climate instability rather than the improved growth conditions. Thus, droughts are becoming increasingly frequent as well as abnormally warm and abnormally cold winters. Consequently, plants are suffering from increased influence of multiple stress factors. The results of the special studies enable us to conclude that the climate may significantly change in the foreseeable future. The need for preventive measures in order to minimize the effects of climate changes is indisputable, as only well-conceived actions can help such weather-dependent industries as forestry and agriculture to adapt to changing climatic conditions. It is obvious, that if we fail to take swift actions in this regard, climate changes in the forest-steppe and steppe zones of European Russia will inevitably have serious consequences for the state of forest ecosystems. These consequences might include changes in the species composition and biodiversity level of the forest ecosystems, increased risks of forest fires and mass spread of pests and forest diseases, increased frequency and intensity of extreme weather events and deterioration of economic conditions for forest management. Our studies of trends and patterns in climate were carried out by observation of the air temperature regime and the amount of precipitation in the region over a long period of time. We relied on the available literature of Russian and international climate research organizations. The assessment of possible climate change was carried out using the IPCC methodology. We also took into account future greenhouse gas emissions and their concentration in the atmosphere. The study concluded that in the forest-steppe and steppe zones of the European part of Russia any scenario, even the mildest one, would lead to significant changes in climatic parameters by the end of the 21st century, which would inevitably affect the state of forest ecosystems. Forest fires, pests and forest diseases will become the key stress factors, which will have a paramount impact on managed forests. Currently, forest ecosystems have a fairly high adaptive capacity. However, in order to reduce the potential negative impact of unfavourable factors we need to implement a variety of prevention and adaptation measures with different time frames for the implementation. Appropriate preventive actions timely made can reduce the possible negative effects of climate changes and help to keep the ecosystems balanced. It is important to note that sheer situational and tactical measures cannot increase the adaptive capacity of forest ecosystems and will, therefore, inevitably lead to significant economic losses.

For citation: Semenov M.A., Vysotskiy A.A., Pashchenko V.I. Adaptation Scenarios in Forest Management Due to the Possible Climate Changes. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 57–69. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.57

Keywords: climate change, forest ecosystems, adaptation, biosphere, pests, forest diseases, extreme weather factors, self-regulation, regeneration.

Поступила 12.02.19 / Received on February 12, 2019

УДК 630*114.11+630*231

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.70

ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ НА ВЫРУБКАХ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАРАСТАНИИ*

А.С. Ильинцев, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [N-6286-2019](#),

ORCID: [0000-0003-3524-4665](#)

А.П. Богданов, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [A-8611-2019](#),

ORCID: [0000-0002-1655-7212](#)

Ю.С. Быков, мл. науч. сотр.

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: a.ilintsev@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru, y.bykov@inbox.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения закономерностей изменения физических свойств почвы для прогнозирования периода восстановления после антропогенного воздействия. Цель исследования заключалась в установлении пространственно-временных закономерностей изменения и восстановления физических свойств подзолистой почвы при естественном зарастании вырубок. Объекты исследования расположены в таежной лесорастительной зоне на мелкоконтурных сплошных вырубках с давностью рубки 5, 18 и 28 лет. Исходные участки представлены спелыми насаждениями черничного типа леса с преобладанием в составе сосны. Рубки проводились с использованием на валке деревьев бензомоторных пил, на трелевке – трелевочного трактора. Очистка лесосек осуществлялась одновременно с заготовкой древесины путем укладки порубочных остатков на волокни. Для установления современной характеристики исследуемых участков проведена оценка естественного лесовозобновления путем закладки 215 пробных площадок (5×5 м) по трансектам. Для определения физических свойств почвы на технологических элементах выруб (пасака, волок) и контроле отобрано 288 образцов: по 96 шт. лесной подстилки (О), подзолистого (Е) и иллювиального (ВФ) горизонтов почвы. Полученные на разновременных вырубках результаты показали, что физические свойства песчаной почвы динамичны во времени. Через 5 лет после рубки диагностируется уплотнение почвы, особенно на волокнах, которое сказывается на повышении плотности сложения (на 15...59 %) со снижением общей пористости (8...11 %) и пористости аэрации верхних горизонтов (8...23 %). Достоверное уплотнение наблюдается в лесной подстилке и подзолистом горизонте, в то время как в иллювиальном горизонте такое различие не доказано. Спустя 18 лет уплотнение почв диагностируется, но происходят процессы ее разуплотнения, которые связаны с активным естественным возобновлением древесных пород и периодом, прошедшим после рубки. Спустя 28 лет физические свойства почв восстановились до исходных показателей. Установлена умеренная корреляционная связь между плотностью сложения почвы и возрастом рубки ($r = -(0,44 \pm 0,11)$), а также между плотностью сложения и количеством экземпляров естественного лесовозобновления ($r = -(0,31 \pm 0,10)$), которые способствуют разуплотнению почвы после проведения рубки.

Для цитирования: Ильинцев А.С., Богданов А.П., Быков Ю.С. Динамика физических свойств подзолистой почвы на вырубках при естественном зарастании // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 70–82. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.70

* Авторы выражают искреннюю благодарность проф. Е.Н. Наквасиной и проф. С.В. Третьякову за обсуждение проблемы антропогенного воздействия на почвы и методическую помощь.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-34-0031) и РФФИ совместно с Архангельской областью (проект № 17-44-290127).

Ключевые слова: сплошные рубки, подзолистые почвы, песчаный гранулометрический состав, уплотнение почвы, естественное лесовозобновление.

Введение

В последние годы усиливается внимание научной общественности и экологических организаций к вопросам устойчивого лесопользования, а также к щадящим методам заготовки древесины [14, 32]. Основной причиной является то, что после антропогенного воздействия (вырубки леса) происходят существенные изменения в структурной организации и функционировании лесных экосистем. Одной из фундаментальных составляющих лесных экосистем, которая испытывает антропогенную нагрузку, является почва, играющая ключевую роль в биогеохимических циклах и формировании микробных, растительных и животных сообществ [5, 23, 27].

Особый интерес к вопросам экологизации лесозаготовок был вызван в 1980-х гг. с приходом валочно-пакетирующей техники (типа ЛП-49; МЛ-119; Timberjack 850) в связи с ее значительным негативным воздействием на почвы и естественное возобновление хвойных пород [15, 18]. Внедрение новой системы машин (харвестеров и форвардеров) в практику лесозаготовительной деятельности также не обеспечивает сохранение лесной среды [19].

В настоящее время лесозаготовительные работы в основном осуществляются по двум технологиям: скандинавской – сортиментная с использованием комплекса машин харвестер–форвардер; канадской – хлыстовая заготовка. Доля сортиментной заготовки увеличивается с каждым годом в связи с тем, что она более эффективна [29]. В Архангельской области остается популярным хлыстовой способ заготовки древесины – традиционный для региона.

Изменения условий почвообразования при лесозаготовительной деятельности в той или иной степени отражаются на физических, химических и биологических свойствах почв [25, 35, 36, 38, 41, 43]. Свойства почвы во многом зависят от технологии лесозаготовок и используемых лесозаготовительных операций. Рубка леса может привести к уплотнению почвы и, как следствие, ограничить рост деревьев и их естественное возобновление [7, 31, 33, 37, 40, 42]. Одной из причин плохого роста растений является нехватка питательных веществ и доступной влаги, вызванная увеличением плотности сложения почвы [39]. Все это угнетает рост корневых систем древесных растений [26].

В условиях таежной зоны заметные изменения физических свойств почв вырубок наблюдаются до глубины 50...60 см, на лесопогрузочных площадках – до 90 см [6]. Наибольшее уплотнение почвенного слоя отмечается на глубине до 30 см [21].

Многие авторы [21, 22, 24] утверждают, что уплотнение, вызванное лесозаготовительной техникой, служит одной из основных причин деградации почв.

Последствия нарушений почвенного слоя и лесного покрова носят долговременный характер, что проявляется на протяжении нескольких десятилетий после проведения рубок [16, 34]. В некоторых случаях имеют место

необратимые повреждения, когда восстановление свойств почвы не происходит [30]. Установлено [17], что на вырубках может наблюдаться три основных вида уплотнения: физическое (первичное), вторичное и экологическое. Причинами последнего, например, являются экологические факторы, а не прямое воздействие техники или технологии заготовки. Поэтому восстановление первоначальных свойств почв на вырубках происходит с неодинаковой скоростью. Для прогнозирования периода восстановления физических свойств в почвенном профиле после антропогенного воздействия необходимо изучать долгосрочную реакцию экосистем на усиливающиеся естественное и антропогенное нарушения.

Цель исследования – установить пространственно-временные закономерности изменения физических свойств подзолистой почвы в динамике естественного зарастивания вырубок и проследить процесс их восстановления.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на сплошных вырубках в Низовском участковом лесничестве Вельского лесничества Архангельской области. Территория района входит в таежную лесорастительную зону и относится к Двинско-Вычегодскому таежному району европейской части Российской Федерации [12]. На этой территории преобладают хвойные древесные породы (58 %) [1]. Она характеризуется умеренно-континентальным климатом с продолжительной холодной многоснежной зимой, короткой весной с неустойчивыми температурами, относительно коротким умеренно теплым летом, продолжительной и ненастной осенью, относится к Бореальному географическому поясу, Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной почвенно-климатической области, подзоне подзолистых почв, глееземов и подзолов средней тайги, фации холодно промерзающих почв, Онежско-Двинской (Г2) провинции, округу (30) с песчаными почвами [4].

В качестве экспериментальных участков были выбраны 3 мелкоконтурные рубки с различной давностью проведения сплошных рубок (1990, 2000 и 2013 гг.). Рубки проводились в летне-весенний период по традиционной технологии заготовки древесины с использованием на валке деревьев бензомоторных пил, на трелевке – трелевочного трактора ТДТ-55. Очистку лесосек осуществляли одновременно с заготовкой древесины путем укладки порубочных остатков на волокни. Исходные участки представлены насаждениями с преобладанием в составе сосны. Первое насаждение было вырублено в 1990 г., второе – в 2000 г. (8 га) и 2013 г. (9 га) (табл. 1).

Таблица 1

Краткая таксационная характеристика насаждений до проведения сплошных рубок

Состав древостоя, ед.	Площадь, га	Средние по главной породе			Относительная полнота, ед.	Запас древостоя, м ³ /га
		возраст, лет	высота, м	диаметр, см		
5С3Е2Б	11	90	22	24	0,7	240
8С2Б+Е	17	110	19	24	0,7	220

Исходный тип леса – сосняк черничный, местами черничный влажный. Класс бонитета – III-IV. Почва – подзол поверхностно-осветленный иллювиально-железистый песчаный на легком и среднем моренном суглинке (О-Е-BF-C), относится к отделу альфегумусовых почв [8]. Контролем служила площадь, не пройденная сплошными рубками, но расположенная в непосредственной близости к вырубкам.

Для установления современной характеристики исследуемых участков оценено естественное лесовозобновление в соответствии с рекомендациями [13, 28]. Учет проведен путем закладки пробных площадок (5×5 м) по ходовым линиям через 20 м. К подросту относили все древесные растения с диаметром меньше 6 см и при учете классифицировали по породам, онтогенетическому состоянию и категориям крупности (мелкий, средний, крупный). По материалам учета фиксировали количество подроста на 1 га, состав по породам, размещение по площади. Всего было учтено 215 площадок: по 35 шт. в пасаках и на контроле и по 25 шт. на волоках.

Для определения физических свойств почвы на технологических элементах выруб (пасака, волок) и контроле отбирали образцы лесной подстилки (О), подзолистого (Е) и иллювиального (BF) горизонтов почвы из 96 прикопок. Всего собрано 288 образцов. Для нахождения плотности сложения образцы лесной подстилки отбирали с помощью деревянной рамки-шаблона (площадью 144 см²), образцы минеральных горизонтов – с помощью почвенного бура (объемом 47,50 см³) после удаления лесной подстилки. Учитывая малую мощность подстильно-торфяного горизонта, его рассматривали вместе с лесной подстилкой (О) в соответствии с [8].

В лаборатории полевые образцы сушили при температуре 105 °С до абсолютно сухого состояния. Физические свойства исследуемых образцов определяли по общепринятым в лесном почвоведении методикам [10, 11]. Полевую влажность почвы вычисляли как отношение массы воды к массе абсолютно сухой почвы [9]. Плотность сложения почвы рассчитывали как массу абсолютно сухой почвы в единице объема почвы в ее естественном, ненарушенном состоянии [2]. Плотность твердой фазы устанавливали как отношение массы твердой фазы почвы к ее объему пикнометрическим методом в двух повторностях [3]. Общую пористость вычисляли по плотности сложения и плотности твердой фазы. Пористость аэрации (доля крупных пор, занятых воздухом) определяли через объемную влажность почвы [20].

Класс гранулометрического состава у верхнего минерального горизонта почвы (Е), определенный в полевых условиях [11], был подтвержден в лабораторных условиях методом лазерной дифрактометрии на приборе Lasentec D600L («Mettler Toledo», Германия). Классификацию почвы по гранулометрическому составу диагностировали по Н.А. Качинскому [20]. В результате лабораторного определения гранулометрического состава почвы (Е) установлено, что среднее содержание физической глины в полевых образцах изменяется от 8,13 до 9,85 % (табл. 2).

Схожие гранулометрический состав, тип почвы и условия произрастания древостоя на исследуемых вырубках позволяют сопоставить исследуемые физические свойства после проведения сплошных рубок.

Таблица 2

**Гранулометрический состав почв на контроле
и после проведения сплошных рубок**

Участок	Год рубки	Содержание фракции, %	
		Физическая глина	Физический песок
Контроль	–	9,75	90,25
Волоки	2013	9,44	90,56
Пасеки		8,65	81,35
Волоки	2000	9,08	90,92
Пасеки		9,85	90,15
Волоки	1990	9,20	90,80
Пасеки		8,13	91,87

Примечание. Почвы по гранулометрическому составу на всех участках – песок связный [20].

Для анализа данных рассчитали основные статистические показатели и проводили множественные сравнения, которые являются частью апостериорного анализа (Tukey's HSD test). Тест заключался в проведении попарных сравнений средних значений всех групп, включенных в дисперсионный анализ. Дополнительно рассчитали коэффициент корреляции (Pearson correlation coefficient) для установления тесноты связи между изучаемыми признаками. Для расчетов использовали статистические программы Minitab 17 и Statistica 12 (StatSoft).

Результаты исследования и их обсуждение

Спустя 5, 18 и 28 лет после сплошных рубок на вырубках наблюдаются активные процессы естественного возобновления хвойных и лиственных древесных пород. Характеристика подроста на сплошных мелкоконтурных вырубках и контроле представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика подроста на контроле и после проведения сплошных рубок

Участок	Год рубки	Видовой состав подроста, %	Количество подроста, шт./га			Коэффициент изменчивости, %
			M±m	M _{min}	M _{max}	
Контроль	–	83Е11Б6С	2 731±266 ^Е	0	6 400	57,65
Волоки	2013	41С21Е38Б	3 040±304 ^{В, Е}	0	6 000	50,10
Пасеки		43Е32С25Б	4 560±318 ^В	800	8 000	41,31
Волоки	2000	53С10Е37Б	10 448±601 ^В	5 600	17 200	28,78
Пасеки		38С30Е32Б	8 091±424 ^С	4 400	14 000	31,03
Волоки	1990	50С7Е43Б	14 848±824 ^А	4 800	24 400	27,76
Пасеки		40С24Е36Б	9 669±471 ^{В, С}	5 200	15 600	28,86

Примечание. Здесь и далее, в табл. 4, M±m – среднее значение показателя с основной ошибкой; M_{min(max)} – минимальное (максимальное) значение показателя; заглавные буквы в верхних индексах показывают статистически значимые различия между средними значениями после однофакторного дисперсионного анализа (Tukey's HSD test). Значения в одном столбце с последующей такой же буквой не различаются на 0,05 %-м уровне вероятности.

Под пологом материнского соснового древостоя отмечено самое низкое количество подроста с большой изменчивостью, при этом количество подроста сосны не превышает 6 %. По набору онтогенетических состояний в естественном сообществе преобладают имматурные особи второго порядка (im2) и виргильные особи (v1, v2) ели.

На вырубке 2013 г. отмечено увеличение подроста за счет возобновления сосны (32...41 %) и березы (25...38 %). Преобладают ювинильные особи (j) и имматурные особи первого порядка (im1). На технологических элементах количество подроста между собой значительно отличается, так как во время рубки большая часть подроста предварительной генерации на волоках повреждается и уничтожается, но за 5-летний период происходит заселение и возобновление нового поколения древесных пород последующей генерации.

На вырубке 2000 г. количество подроста на волоках значительно увеличивается по сравнению с пасаками. На этом этапе доминирующее положение занимали виргильные (v1) особи всех древесных пород.

На вырубке 1990 г. количество подроста на технологических элементах значительно выше по сравнению с предыдущими объектами, при этом участие подроста березы увеличилось до 36...43 %.

Активное естественное возобновление на мелкоконтурных рубках свидетельствует о том, что после рубки складываются благоприятные условия (почвенные и световые) для возобновления светолюбивых древесных пород, при этом однофакторный дисперсионный анализ показал, что при 5 %-м уровне значимости влияние технологического элемента на естественное возобновление леса доказано ($P < 0,05$).

Сплошная рубка леса оказывает влияние на физические свойства почвы в зависимости от технологических элементов рубки (волоки и пасаки), которое, прежде всего, связано с непосредственным проездом техники при трелевке леса по волокам во время выполнения лесозаготовительных операций (табл. 4).

Особенности восстановления физических свойств почвы на технологических элементах рубок зависят от давности проведения рубки. На свежих рубках четко идентифицируются технологические элементы (волок и пасака), что позволяет сравнивать физические свойства почв на них. На волоках местами видны следы проезда техники, при неоднократном проезде образованы колеи.

В первую очередь на волоках после проезда техники повреждается лесная подстилка, которая подвергается прямому воздействию движителей машин и несет основную нагрузку при изменении факторов среды в лесном насаждении.

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что при 5 %-м уровне значимости на волоках рубки 2013 г. выявлено достоверное изменение плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации лесной подстилки (горизонт О), т. е. спустя 5 лет после рубки прослеживается разница с контролем. По сравнению с контролем плотность сложения лесной подстилки выше на 59 %, общая пористость ниже на 11 %, пористость аэрации ниже на 23 %. В пасаках не выявлено достоверного изменения показателей плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации лесной подстилки по сравнению с контролем, хотя плотность сложения выше на 5 %, общая пористость ниже на 1 %, пористость аэрации ниже на 4 %.

Таблица 4

Динамика физических свойств горизонтов почвы на контроле и после проведения сплошных рубок

Участок	Год рубки	Плотность слоения, г/см ³		Общая пористость, %		Пористость аэрации, %				
		M±m	M _{min}	M _{max}	M±m	M _{min}	M _{max}			
		Лесная подстилка (O)								
Контроль Волоки Пасеки	—	0,095±0,03 ^{В,С}	0,055	0,129	92,15±0,48 ^А	84,01	93,70	76,80±0,91 ^А	60,10	81,84
	2013	0,151±0,17 ^А	0,065	0,250	80,99±1,74 ^В	70,07	88,51	53,04±4,19 ^С	21,20	73,99
		0,100±0,08 ^{В,С}	0,072	0,170	90,95±0,99 ^А	84,51	94,44	72,65±2,75 ^{А,В}	50,65	87,05
Волоки Пасеки	2000	0,125±0,09 ^{В,С}	0,082	0,195	88,22±1,55 ^А	73,92	92,59	66,82±2,55 ^В	49,60	77,67
	Пасеки	0,089±0,07 ^С	0,057	0,137	90,88±1,08 ^А	84,07	94,40	72,80±1,63 ^{А,В}	61,24	84,42
		0,111±0,01 ^{В,С}	0,078	0,145	89,29±1,02 ^А	83,18	92,81	74,95±1,53 ^{А,В}	64,58	80,82
Волоки Пасеки	1990	0,093±0,01 ^{В,С}	0,058	0,125	90,61±1,06 ^А	83,85	93,70	74,11±1,74 ^{А,В}	60,65	79,91
		Подзолистый горизонт (E)								
Контроль Волоки Пасеки	—	1,31±0,02 ^{В,С}	1,13	1,48	48,10±0,69 ^{А,В}	41,64	55,29	23,94±0,94 ^А	15,35	32,60
	2013	1,51±0,05 ^А	1,16	1,72	40,40±1,79 ^С	32,08	54,33	15,82±1,55 ^В	9,44	25,86
		1,37±0,03 ^{А,В,С}	1,14	1,49	45,78±1,23 ^{А,В,С}	40,98	54,87	20,72±1,80 ^{А,В}	11,26	31,76
Волоки Пасеки	2000	1,41±0,05 ^{А,В}	1,07	1,68	44,42±1,78 ^{В,С}	33,62	57,86	19,25±1,70 ^{А,В}	10,50	31,25
	Пасеки	1,33±0,03 ^{В,С}	1,14	1,54	47,52±1,38 ^{А,В}	39,00	54,87	20,47±1,65 ^{А,В}	11,91	30,50
		1,21±0,07 ^С	0,81	1,62	52,28±2,71 ^А	35,72	68,04	21,21±2,51 ^{А,В}	10,46	35,30
Волоки Пасеки	1990	1,28±0,03 ^{В,С}	1,10	1,40	49,29±1,28 ^{А,В}	43,66	56,13	22,23±1,51 ^{А,В}	15,48	30,65
		Иллювиальный горизонт (BF)								
Контроль Волоки Пасеки	—	1,25±0,03 ^А	1,02	1,54	53,80±1,08 ^А	42,78	62,08	21,95±1,17 ^А	13,33	30,92
	2013	1,32±0,06 ^А	1,04	1,82	50,96±2,20 ^А	32,57	61,37	19,39±1,38 ^А	12,19	31,11
		1,27±0,04 ^А	1,02	1,53	52,98±1,58 ^А	43,20	62,36	22,34±1,71 ^А	12,75	32,80
Волоки Пасеки	2000	1,24±0,04 ^А	0,95	1,38	54,17±1,49 ^А	48,64	64,95	20,43±1,62 ^А	12,85	30,50
	Пасеки	1,22±0,05 ^А	0,98	1,44	54,67±1,76 ^А	46,78	63,79	22,03±1,78 ^А	12,55	30,51
		1,28±0,03 ^А	1,11	1,43	52,47±1,06 ^А	47,18	59,05	22,35±1,39 ^А	13,12	31,15
Волоки Пасеки	1990	1,26±0,04 ^А	1,08	1,50	53,30±1,40 ^А	44,33	60,31	23,25±1,77 ^А	13,58	31,23

Влияние сплошных рубок на физические свойства минеральных горизонтов почвы проявляется менее заметно, что связано с буферной ролью лесной подстилки, принимающей на себя основную нагрузку при изменении факторов среды в лесном насаждении. Для подзолистого горизонта (Е) выявлено достоверное изменение показателей плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации по сравнению с контролем: плотность сложения подзолистого горизонта выше на 15,0 %, общая пористость ниже на 7,7 %, пористость аэрации ниже на 8,1 %. В пасаках не установлено достоверного изменения этих показателей для подзолистого горизонта (Е) по сравнению с контролем, хотя плотность сложения выше на 5,0 %, общая пористость ниже на 2,3 %, пористость аэрации ниже на 3,2 %.

В пасаках и на волоках вырубки 2013 г. не выявлено достоверного изменения плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации иллювиального горизонта (BF) по сравнению с контролем.

На 18-летней вырубке, несмотря на активное естественное возобновление, можно определить, где размещались волока и пасаки. На волоках еще можно установить следы проезда техники, но только в тех местах, где были образованы колеи.

Спустя 18 лет после проведения сплошной рубки на волоках и в пасаках плотность сложения, общая пористость и пористость аэрации лесной подстилки (О) достоверно не отличаются от контроля, кроме пористости аэрации на волоках. При этом на волоках прослеживается повышение плотности сложения по сравнению с контролем, который больше на 31 %, и понижение общей пористости на 4 %, но критерии различия не достигают доверительных интервалов. Пористость аэрации ниже на 10 %.

В пасаках и на волоках вырубки 2000 г. не выявлено достоверного изменения плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации подзолистого горизонта (Е). При этом на волоках плотность сложения выше на 7,6 %, общая пористость ниже на 3,7 %, пористость аэрации ниже на 4,7 %.

В иллювиальном горизонте (BF) в пасаках и на волоках вырубки 2000 г. не установлено достоверного изменения плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации по сравнению с контролем.

Спустя 28 лет после проведения сплошной рубки вырубка хорошо возобновилась древесными породами. Развитие живого напочвенного покрова сглаживает следы, оставленные техникой, но еще можно заметить места, где была колеиность.

На волоках вырубки 1990 г. не выявлено достоверного изменения показателей плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации лесной подстилки (О) по сравнению с контролем. При этом на волоках плотность сложения выше на 16,0 %, общая пористость ниже на 2,9 %, пористость аэрации ниже 1,9 %. В пасаках разница в этих показателях для лесной подстилки (О) не существенна.

В подзолистом и иллювиальных горизонтах (Е и BF) в пасаках и на волоках вырубки 1990 г. также не отмечено достоверного изменения плотности сложения, общей пористости и пористости аэрации по сравнению с контролем.

Для установления тесноты связи между плотностью сложения верхних горизонтов почвы, взятых на технологических элементах, возрастом вырубки и количеством экземпляров естественного лесовозобновления проведен корреляционный анализ. В первом случае коэффициент корреляции Пирсона

равен $-0,44 \pm 0,11$, что соответствует умеренной тесноте связи, а отрицательная корреляция свидетельствует о разуплотнении почвы с увеличением времени, прошедшего после рубки. Во втором случае коэффициент корреляции Пирсона равен $-0,31 \pm 0,10$, что также соответствует умеренной тесноте связи. Отрицательная корреляционная связь между исследуемыми признаками является статистически значимой ($P < 0,05$), т. е. можно утверждать, что естественное лесовозобновление способствует разуплотнению почв на технологических элементах вырубок, образовавшихся после проезда лесозаготовительной техники в процессе вырубki древесного яруса.

Заключение

На легких по гранулометрическому составу почвах изменение физических свойств после прохода лесозаготовительной техники не препятствует возобновлению древесных пород, что подтверждают результаты исследования процесса лесовосстановления на разновременных вырубках.

Установлено, что на вырубках физические свойства песчаной почвы динамичны во времени и зависят от технологического элемента (пасека, волок). После рубки возникает уплотнение почвы, особенно на волоках, которое сказывается на повышении плотности сложения со снижением общей пористости и пористости аэрации верхних горизонтов. Достоверное уплотнение наблюдается в лесной подстилке и подзолистом горизонте, в то время как в иллювиальном горизонте различие не доказано.

Спустя 18 лет уплотнение почв диагностируется, но отмечается процесс разуплотнения почвы, который связан с активным естественным возобновлением древесных пород и временем, прошедшим после рубки.

Спустя 28 лет физические свойства почвы восстановились до исходных показателей. На процесс восстановления физических свойств почвы влияет возраст вырубki и количество экземпляров естественного лесовозобновления, что подтверждается установлением умеренной отрицательной корреляционной связи между изучаемыми признаками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аналитический обзор о состоянии лесов, их количественных и качественных характеристиках по Двинско-Вычегодскому таежному району. М.: Рослесинфорг, 2018. 61 с. [*Analytical Review on the State of Forests, Their Quantitative and Qualitative Characteristics in Dvinsko-Vychegodskiy Taiga Region*. Moscow, Roslesinform Publ., 2018. 61 p.].
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с. [Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Methods of Studying the Physical Properties of Soils: Educational Textbook*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 416 p.].
3. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с. [*GOST 5180–2015. Soils. Laboratory Methods for Determination of Physical Characteristics*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 19 p.].
4. Добровольский Г.В., Урусевская И.С., Алябина И.О. Карта почвенно-географического районирования России масштаба 1:15 000 000 // Электрон. науч. журн. «Доклады по экологическому почвоведению». 2008. Вып. 8, № 2. С. 1–18. [Dobrovolsky G.V., Urusevskaya I.S., Alyabina I.O. The Soil-Geographical Zoning Map of Russia at a Scale 1:15 000 000. *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu* [Interactive Journal of Ecological Soil Science], 2008, iss. 8, no. 2, pp. 1–18].

5. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798. [Dymov A.A. The Impact of Clearcutting in Boreal Forests of Russia on Soils: A Review. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2017, no. 7, pp. 787–798]. DOI: [10.7868/S0032180X17070024](https://doi.org/10.7868/S0032180X17070024)

6. Дымов А.А., Лантева Е.М. Изменение подзолистых почв на двучленных отложениях при рубках // Лесоведение. 2006. № 3. С. 42–49. [Dymov A.A., Lapteva E.M. Changes in Podzolic Soils on Bilayered Deposits under the Influence of Felling. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2006, no. 3, pp. 42–49].

7. Засухин, Д.П., Серый В.С., Минин Н.С. Рекомендации по защите лесных почв от повреждения при проведении лесозаготовительных работ в Республике Коми / под общ. ред. Ю.А. Паутова. Сыктывкар, 2004. 17 с. [Zasukhin D.P., Seryy V.S., Minin N.S. *Recommendations on Protection of Forest Soils from Damage during Logging Operations in the Komi Republic*. Ed. by Yu.A. Pautov. Syktyvkar, 2004. 17 p.].

8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с. [Classification and Diagnosis of Soils in Russia. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 343 p.].

9. Козлова А.А. Учебная практика по физике почв: учеб.-метод. пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 81 с. [Kozlova A.A. *Academic Training in Soil Physics: Study Guide*. Irkutsk, ISU Publ., 2009. 81 p.].

10. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с. [Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Soil Science: Educational Textbook*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 146 p.].

11. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2007. 127 с. [Nakvasina E.N., Seryy V.S., Semenov B.A. *Field Workshop on Soil Science*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 127 p.].

12. Об утверждении Перечня лесорастительных зон и Перечня лесных районов Российской Федерации: приказ Минприроды России от 18.08.2014 г. № 367. Режим доступа: <http://rosleshoz.gov.ru/rosleshoz.gov.ru> (дата обращения: 15.12.2018). [On Approval of the List of Forest Plant Zones and the List of Forest Regions of the Russian Federation: Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation on August 18, 2014, no. 367].

13. Об утверждении Правил лесовосстановления: приказ Минприроды России от 29.06.2016 г. № 375. Режим доступа: <http://rosleshoz.gov.ru/rosleshoz.gov.ru> (дата обращения: 15.12.2018). [On Approval of the Reforestation Rules: Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation on June 29, 2016, no. 373].

14. Основы устойчивого лесопользования: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. А.В. Беляковой, Н.М. Шматкова. М.: WWF России, 2014. 266 с. [Framework of Sustainable Forest Management: Educational Textbook for Universities. Ed. by A.V. Belyakova, N.M. Shmatkov. Moscow, WWF Russia Publ., 2014. 266 p.].

15. Побединский А.В. Влияние механизированных лесозаготовок на лесную среду и возобновление леса // Лесн. хоз-во. 1982. № 11. С. 14–18. [Pobedinskiy A.V. The Impact of Mechanized Logging Operations on the Forest Environment and Reforestation. *Lesnoye khozyaystvo*, 1982, no. 11, pp. 14–18].

16. Рожков, В.А., Карпачевский Л.О. Лесной покров России и охрана почв // Почвоведение. 2006. № 10. С. 1157–1164. [Rozhkov V.A., Karpachevskii L.O. The Forest Cover of Russia and Soil Conservation. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2006, no. 10, pp. 1157–1164].

17. Сабо Е.Д., Кормилицына О.В., Бондаренко В.В. Виды и динамика уплотнения и разуплотнения почв на вырубках // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2012. № 3. С. 42–46. [Sabo E.D., Kormilitsina O.V., Bondarenko V.V. Types and Dynamics of Increase and Decrease of Soils Density on Felling. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 3(86), pp. 42–46].

18. Серый В.С., Аникеева В.А., Вялых Н.И., Кубрак Н.И. Изменение лесорастительных условий рубок при современных лесозаготовках // Экологические исследования в лесах Европейского Севера: сб. науч. тр. Архангельск: АИЛиЛХ, 1991.

C. 3–15. [Seryy V.S., Anikeyeva V.A., Vyalykh N.I., Kubrak N.I. Changing Forest Site of Cuttings in Modern Logging. *Environmental Studies in the Forests of the European North: Collection of Academic Papers*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1991, pp. 3–15].

19. Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Безгина Ю.Н. Развитие техники и технологий лесозаготовок на Урале // Лесн. журн. 2016. № 2. С. 81–90. (Изв. высш. учеб. заведений). [Terinov N.N., Gerts E.F., Bezgina Yu.N. Development of Logging Technology in the Urals. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2016, no. 2, pp. 81–90]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.2.81](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.2.81); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f46/terinov.pdf>

20. Шейн Е.В. Курс физики почв: учеб. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с. [Shein E.V. *Soil Physics Course: Textbook*. Moscow, MSU Publ., 2005. 432 p.].

21. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The Impacts of Ground-Based Logging Equipment on Forest Soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 371–376.

22. Bagheri I., Kalhori S.B., Akef M., Khormali F. Effect of Compaction on Physical and Micromorphological Properties of Forest Soils. *American Journal of Plant Science*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 159–163. DOI: [10.4236/ajps.2012.31018](https://doi.org/10.4236/ajps.2012.31018)

23. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-Term Impacts of Wildfire and Logging on Forest Soils. *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, iss. 2, pp. 113–118. DOI: [10.1038/s41561-018-0294-2](https://doi.org/10.1038/s41561-018-0294-2)

24. Brais S. Persistence of Soil Compaction and Effects on Seedling Growth in Northwestern Quebec. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, vol. 65, no. 4, pp. 1263–1271. DOI: [10.2136/sssaj2001.6541263x](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541263x)

25. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. DOI: [10.1016/j.foreco.2014.11.022](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022)

26. Cambi M., Hoshika Y., Mariotti B., Paoletti E., Picchio R., Venanzi R., Marchi E. Compaction by a Forest Machine Affects Soil Quality and *Quercus robur* L. Seedling Performance in an Experimental Field. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 384, pp. 406–414. DOI: [10.1016/j.foreco.2016.10.045](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045)

27. Cambi M., Paffetti D., Vettori C., Picchio R., Venanzi R., Marchi E. Assessment of the Impact of Forest Harvesting Operations on the Physical Parameters and Microbiological Components on a Mediterranean Sandy Soil in an Italian Stone Pine Stand. *European Journal of Forest Research*, 2017, vol. 136, iss. 2, pp. 205–215. DOI: [10.1007/s10342-016-1020-5](https://doi.org/10.1007/s10342-016-1020-5)

28. Evstigneev O.I., Korotkov V.N. Ontogenetic Stages of Trees: An Overview. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2016, vol. 1(2), pp. 1–31. DOI: [10.21685/2500-0578-2016-2-1](https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-2-1)

29. Goltsev V., Tolonen T., Syuney V., Dahlin B., Gerasimov Yu. Wood Harvesting and Logistics in Russia – Focus on Research and Business Opportunities. *Metlan työraportteja* [Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 2010]. 2011. 157 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp210.htm> (accessed 04.02.19).

30. Klaes B., Struck J., Schneider R., Schüler G. Middle-Term Effects after Timber Harvesting with Heavy Machinery on a Fine-Textured Forest Soil. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, iss. 6, pp. 1083–1095. DOI: [10.1007/s10342-016-0995-2](https://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2)

31. Kozłowski T.T. Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 6, pp. 596–619. DOI: [10.1080/02827589908540825](https://doi.org/10.1080/02827589908540825)

32. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A New Paradigm in a Changing World and Climate. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 634, pp. 1385–1397. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084)

33. Marchi E., Picchio R., Mederski P.S., Vusić D., Perugini M., Venanzi R. Impact of Silvicultural Treatment and Forest Operation on Soil and Regeneration in Mediterranean Turkey Oak (*Quercus cerris* L.) Coppice with Standards. *Ecological Engineering*, 2016, vol. 95, pp. 475–484. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.06.084](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.084)

34. Modrý M., Hubený D. Impact of Skidder and High-Lead System Logging on Forest Soils and Advanced Regeneration. *Journal of Forest Science*, 2003, vol. 49, no. 6, pp. 273–280. DOI: [10.17221/4701-JFS](https://doi.org/10.17221/4701-JFS)
35. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland, Springer, 2013. 217 p. DOI: [10.1007/978-3-319-02541-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4)
36. Powers R.F., Scott D.A., Sanchez F.G., Voldseth R.A., Page-Dumroese D., Elioff J.D., Stone D.M. The North American Long-Term Soil Productivity Experiment: Findings from the First Decade of Research. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 220, iss. 1-3, pp. 31–50. DOI: [10.1016/j.foreco.2005.08.003](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003)
37. Rab M.A. Recovery of Soil Physical Properties from Compaction and Soil Profile Disturbance Caused by Logging of Native Forest in Victorian Central Highlands, Australia. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 191, iss. 1-3, pp. 329–340. DOI: [10.1016/j.foreco.2003.12.010](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.010)
38. Standish J.T., Commandeur P.R., Smith R.B. *Impacts of Forest Harvesting on Physical Properties of Soils with Reference to Increased Biomass Recovery: A Review*. Information Report BC-X-301. Victoria, BC, Canadian Forestry Centre, 1988. 24 p.
39. Šušnjar M., Horvat D., Šešelj J. Soil Compaction in Timber Skidding in Winter Conditions. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 3–15.
40. Venanzi R., Picchio R., Piovesan G. Silvicultural and Logging Impact on Soil Characteristics in Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) Mediterranean Coppice. *Ecological Engineering*, 2016, vol. 92, pp. 82–89. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.03.034](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.034)
41. Worrell R., Hampson A. The Influence of Some Forest Operations on the Sustainable Management of Forest Soils – A Review. *Forestry*, 1997, vol. 70, iss. 1, pp. 61–85. DOI: [10.1093/forestry/70.1.61](https://doi.org/10.1093/forestry/70.1.61)
42. Zenner E.K., Fauskee J.T., Berger A.L., Puettmann K.J. Impacts of Skidding Traffic Intensity on Soil Disturbance, Soil Recovery, and Aspen Regeneration in North-Central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2007, vol. 24, iss. 3, pp. 177–183. DOI: [10.1093/njaf/24.3.177](https://doi.org/10.1093/njaf/24.3.177)
43. Zetterberg T., Olsson B.A., Löfgren S., von Brömssen C., Brandtberg P.-O. The Effect of Harvest Intensity on Long-Term Calcium Dynamics in Soil and Soil Solution at Three Coniferous Sites in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 302, pp. 280–294. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.03.030](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.030)

PHYSICAL PROPERTIES DYNAMICS OF PODZOLIC SOIL IN THE NATURALLY REGENERATED CUTOVER AREAS*

A.S. Ilintsev, Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665),
ORCID: [0000-0003-3524-4665](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665)

A.P. Bogdanov, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [A-8611-2019](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212), ORCID: [0000-0002-1655-7212](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212)

Yu.S. Bykov, Junior Research Scientist

Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: a.ilintsev@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru, y.bykov@inbox.ru

The research relevance is driven by the need to study the patterns of changes in the physical properties of soil for prediction the recovery period after anthropogenic impact. The aim of the research was to establish the space-time patterns of changes and restoration of the podzolic soil physical properties during natural regrowth after cuttings. The study objects are located in the taiga forest zone on small-scale clear cuttings with fellings of 5, 18 and 28 years

*The authors gratefully acknowledge prof. E.N. Nakvasina and prof. S.V. Tretyakov for discussing the issues of anthropogenic influence on soils, and methodological assistance.

old. The initial plots are represented by the mature stands of blueberry forest with pine domination. Cuttings were carried out with the use of gasoline chainsaws for trees felling, and a skidding tractor for skidding. Clearing of cutting areas was realized simultaneously with timber harvesting by laying slashes on the skidding trails. In order to establish current characteristics of the studied areas, the evaluation of natural reforestation was carried out by laying out 215 test sites (5×5 m) along the transects. In order to determine the soil physical properties on technological elements of cuttings (cutting strip, skidding trails) and control 288 samples were selected: 96 of forest litter (O), podzolic (E), illuvial (BF) soil horizons each. The results obtained at different times of cuttings have shown that the physical properties of sandy soils are dynamic over time. In 5 years after cutting soil compaction is detected, especially on the skidding trails, which affects the increase in bulk density (by 15–59 %) with a decrease in total porosity (8–11 %) and porosity of aeration of the upper horizons (8–23 %). Reliable compaction is observed in the forest litter and podzolic horizon, while in the illuvial horizon such difference is not proven. In 18 years soil compaction is detected. However, there are processes of soil decompression which are related to active reforestation of tree species and period passed after cutting. In 28 years the physical properties of soil were restored to their original values. We have established a moderate correlation between the bulk density of soil and cutting age ($r = -(0.44 \pm 0.11)$), as well as between the bulk density and the number of natural reforestation samples ($r = -(0.31 \pm 0.10)$), which contribute to soil decompression after cutting.

For citation: Ilintsev A.S., Bogdanov A.P., Bykov Yu.S. Physical Properties Dynamics of Podzolic Soil in the Naturally Regenerated Cutover Areas. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 70–82. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.70

Funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 18-34-0031) and the RFBR together with Arkhangelsk Region (Project No. 17-44-290127).

Keywords: clear-cuttings, podzolic soils, sand texture, soil compaction, natural reforestation.

Поступила 04.02.19 / Received on February 04, 2019

УДК 630*161.032.3:630*17:582.475.4
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.83

ВОДОУДЕРЖИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ХВОИ В ПОПУЛЯЦИЯХ ОСНОВНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ХВОЙНЫХ В ЛЕСАХ ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ СИБИРИ

*Н.А. Тихонова*¹, канд. биол. наук; ResearcherID: [R-4349-2019](#),
ORCID: [0000-0003-3922-5031](#)

*И.В. Тихонова*², канд. биол. наук; Researcher ID: [V-3735-2017](#),
ORCID: [0000-0001-6929-9491](#)

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: ntihonova@ksc.krasn.ru

²Западно-Сибирское отделение Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Жуковского, д. 100/1, а/я 45, г. Новосибирск, Россия, 630082; e-mail: selection@ksc.krasn.ru

Исследованы пределы индивидуальной изменчивости деревьев по водоудерживающей способности хвои в популяциях лесообразующих видов хвойных (сосны обыкновенной, сосны сибирской кедровой, ели сибирской, пихты сибирской), произрастающих в условиях горной, средней и северной тайги Средней и Восточной Сибири. Установлено, что из сравниваемых вечнозеленых видов сосна обыкновенная и сосна сибирская кедровая характеризуются наибольшей внутрипопуляционной изменчивостью по скорости дегидратации хвои, ель сибирская и пихта сибирская – по влагоемкости хвои. При этом в выборках двух последних видов доля деревьев с низкой скоростью потери воды достаточно велика даже во влажных местообитаниях. У более устойчивых к засухе видов сосен меньшую часть выборки составляют деревья, быстро испаряющие влагу, с высокой влагоемкостью хвои, у ели сибирской и пихты сибирской – менее устойчивые к обезвоживанию деревья с низкой влагоемкостью хвои. Выявлены существенные различия между видами в смешанных насаждениях и между географическими популяциями видов по водоудерживающей способности хвои. Самые высокие значения этого показателя получены для сосны обыкновенной и ели сибирской из Якутии, а также для старовозрастных деревьев сосны сибирской кедровой с Западного Саяна. Подчеркивается необходимость сохранения старовозрастных насаждений и деревьев, особенно влаголюбивых темнохвойных видов в условиях меняющегося климата, отличающихся наибольшей засухоустойчивостью хвои. Полученные данные и корреляции между использованными признаками позволяют примерно оценить одну из составляющих засухоустойчивости таежных популяций хвойных видов и их внутрипопуляционное разнообразие.

Для цитирования: Тихонова Н.А., Тихонова И.В. Водоудерживающая способность хвои в популяциях основных лесообразующих видов хвойных в лесах таежной зоны Сибири // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 83–94. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.83

Финансирование: Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ФГБНУ ЗСО ИЛ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (проект № 0346-2016-0301) при частичной финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-44-240002.

Ключевые слова: лесообразующие виды хвойных, смешанные леса, засухоустойчивость, Сибирь.

Введение

В условиях Сибири периодические засухи (не только летние, но и весенние, вызванные сочетанием высоких температур воздуха в феврале-марте при замерзшей почве) являются одним из основных абиотических факторов, снижающих устойчивость лесов к разным повреждающим воздействиям, в том числе к вредителям и болезням. В условиях нестабильного климата [3, 12] оценка потенциальной устойчивости популяций видов к засухе особенно важна для многолетних хвойных древесных видов, широко распространенных и являющихся основными лесообразователями бореальных лесов, участвующих в регуляции климата, водного режима рек [9, 10, 13, 20]. Как известно, в последние десятилетия наблюдается повсеместное усыхание хвойных лесов бореальной зоны в разных природно-климатических условиях, причины которого не выяснены (от климатических изменений, снижения уровня грунтовых вод, загрязнений воздуха, распространения вредителей и болезней до естественных сукцессий) [8, 16, 19]. В большей степени, предположительно от засухи и загрязненности воздуха, пострадали темнохвойные леса [6, 12, 14, 15, 18], особенно пихтарники в связи с ослаблением деревьев и распространением новых видов вредителей [1]. Данное исследование необходимо для оценки способности древесных видов адаптироваться к засухе, установления популяционно-биологических и экологических факторов устойчивости видов к изменениям условий произрастания. Поскольку исследуемые темно- и светлохвойные виды существенно различаются по экологическим характеристикам, определенный интерес представляет сравнение индивидуальной изменчивости деревьев в популяциях разных видов по устойчивости к засухе, произрастающих совместно на одном экологическом фоне в смешанных хвойных насаждениях таежной зоны.

Цель данной работы – сравнение пределов изменчивости нескольких ценопопуляций видов хвойных (сосны обыкновенной, сосны сибирской кедровой, ели сибирской, пихты сибирской) по водоудерживающей способности хвои и оценка возможности их селекции по данному показателю.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в четырех местообитаниях: на юге Средней и Восточной Сибири – в горно-таежном поясе Западного (хр. Ергаки) и Восточного (хр. Тункинские гольцы) Саяна; на севере – в северной (г. Туруханск) и средней (р. Оросу, Якутия) тайге. Координаты и характеристики мест сбора образцов приведены в табл. 1.

Материал собирали в 2014–2016 гг. Выборки составляли 30...40 деревьев в каждой ценопопуляции, всего обследовано 353 дерева четырех хвойных видов. Выбирали деревья старше 60 лет (до 100...120 лет, на хр. Ергаки – до 420 лет). Состояние всех деревьев оценивалось как хорошее и удовлетворительное. У каждого дерева отбирали в конце августа по 20 хвоинок (пар хвоинок, пучков) с побегов 2-летнего возраста с южной стороны кроны, образцы взвешивали с точностью $\pm 0,001$ г. Хвою перевозили в холодильнике. В двух пунктах (хр. Ергаки и г. Якутск) с помощью возрастного бурава сверлили керны для определения точного возраста деревьев.

Таблица 1

Краткая характеристика пунктов сбора образцов

Пункт	Тип леса	Состав древостоя	Высота над ур. м.	Координаты
Туруханск, р. Байкалиха	Смешанный лиственнично-березово-елово-кедрово-сосновый бруснично-моховый	3С2Б2К2Е1Л ед. Ос, полнота 0.7, в подросте ель, пихта А = 80...120 лет	50	65° 32' 25" с. ш. 87° 36' 36" в. д.
хр. Тункинские гольцы, Восточный Саян	Смешанный осиново-березово-лиственнично-сосново-кедровый рододендроново-осочково-разнотравный	3К3С 2Л1Б1Ос ед. Е, полнота 0.9, в подросте сосна, ель, кедр А = 60...90 лет	970	51° 55' 24" с. ш. 102° 25' 47" в. д.
р. Оросу, г. Якутск	Смешанный лиственнично-елово-березовый кустарниковый мохово-разнотравный Сосняк мертвopo-кровный местами мохово-бруснично-разнотравный	5Б4Е1Л, полнота 1.0, в подросте ель А = 50...170 лет 10С, полнота 0.7, в подросте сосна А = 40...150 лет	90	61° 50' 13" с. ш. 129° 30' 57" в. д.
хр. Ергаки, Западный Саян	Смешанный елово-кедрово-пихтовый бруснично-чернично-зеленомошный	5П4К1Е, полнота 0.7, в подросте кедр, ель, пихта А = 50...350 лет	1200	52° 45' 55" с. ш. 93° 21' 02" в. д.

Примечание. А – возраст деревьев.

Для оценки засухоустойчивости деревьев использовали методику М.М. Котова с соавторами [5]. С этой целью определяли водоудерживающую способность хвои (ВУС) – один из основных физиологических показателей, характеризующих устойчивость растений к обезвоживанию. Критериями количественной оценки ВУС служили время потери 50 % воды (t_{50}), близкое к критическому обезвоживанию [5], и скорость потери 50 % воды за 1 ч (V_{50}) [7]. Для этого образцы хвои высушивали при температуре 25 °С и взвешивали два раза в день в течение первых 5 дней, в последующем – 1 раз в день до полного высыхания. Также определяли влагоемкость хвои (ВЛ) – количество воды, которую способна поглотить хвоя (в процентах от массы хвои). Для этого хвою взвешивали сначала после 24 ч замачивания, затем после полного высыхания. В предыдущем нашем исследовании, проведенном в лесостепных популяциях сосны обыкновенной [11], была показана прямая зависимость признака t_{50} от размеров (площади) поверхности хвои (коэффициент корреляции $r = 0,59-0,62$), сухой массы хвои ($r = 0,43-0,59$) и массы воды в хвое ($r = 0,52-0,64$). При этом дополнительно был использован относительный показатель, исключаящий влияние различий по массе хвои, $t_{50\text{вер}}$ – время потери 50 % влаги образца хвои массой 1 г. На межвидовом уровне различия между размерами хвои еще заметнее, поэтому для уточнения различий между

видами, выявленных по абсолютным значениям t_{50} , были предложены относительные признаки (V_{50} и $t_{50\text{вер}}$). Последний рассчитывали по следующей формуле:

$$t_{50\text{вер}} = \frac{m_{\text{ср}} \cdot C}{(100 - C) \cdot 2V_{50}},$$

где $m_{\text{ср}}$ – средняя масса хвои; C – влажность хвои.

Данные анализировали в программах Excel и Statistica [2] с использованием критериев χ^2 и t , а также корреляционного и регрессионного анализов.

Результаты исследования и их обсуждение

Необходимо отметить, что исследуемые местообитания охватывают большой диапазон условий произрастания хвойных видов и существенно различаются по тепло- и влагообеспеченности территорий. Относительно теплые и умеренно влажные условия складываются для ценопопуляций с хр. Тункинские гольцы, прохладные и избыточно увлажненные – с хр. Ергаки, холодные и сухие – из г. Якутск. Анализ изменчивости климатических данных с ближайших к местам сбора образцов метеостанций (расстояние – от 3 км до 37 км) показал, что среднемноголетние (1960–2013 гг.) температуры хр. Тункинские гольцы (метеостанция Тунка) и Якутска различались на 9,3 °С, годовые суммы осадков по метеостанциям Якутск и Оленья Речка (хр. Ергаки) – на 1010 мм (рис. 1).

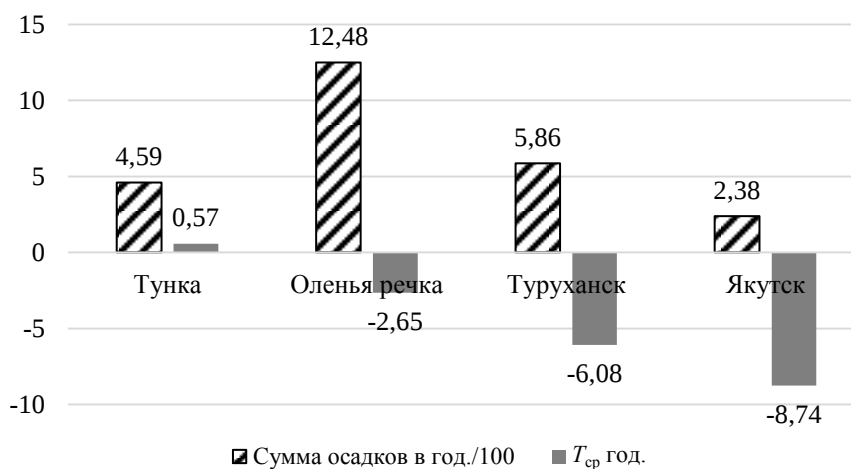


Рис. 1. Тепло- и влагообеспеченность сравниваемых местообитаний по среднемноголетней за 50 лет температуре воздуха $T_{\text{ср}}$ (°С) и годовой сумме осадков, деленной на 100 (мм)

Fig. 1. The heat and moisture supply of the compared habitats by the long-term average annual air temperature $T_{\text{ср}}$ (°C) over 50 years and the annual total precipitation divided by 100 (mm)

Например, в Якутске за последние 50 лет сумма осадков менее 250 мм за год наблюдалась 29 лет, в г. Туруханске за тот же период засушливыми были 4 года (1969, 1982, 2005, 2012 гг.), в Тунке – только один (1988 г.) с суммой осадков 164 мм, на хр. Ергаки засушливых сезонов не было. Таким образом, из перечисленных местообитаний влиянию засухи наиболее подвержены

популяции хвойных из Якутии. Условия вегетации в период проведения исследований были относительно благоприятными, на уровне среднесезонных значений. Поэтому засухоустойчивость хвои деревьев в данных условиях можно рассматривать не как потенциально возможную при постепенном развитии засухи и акклиматизации к ней деревьев, а преадаптивную для случаев внезапной сильной и длительной засухи, следовавшей за влажными и теплыми весной и началом лета.

Установлено, что в исследуемых местообитаниях в относительно благоприятные по увлажнению годы формирования и сбора образцов существенно больше времени требовалось для потери 50 % воды хвоей с деревьев сосны сибирской (средние значения 106...259 ч, индивидуальные пределы – 48...486 ч), на втором месте была сосна обыкновенная (соответственно 61...89 ч и 22...174 ч), затем ель сибирская (28...70 ч и 12...180 ч) и пихта сибирская (одна выборка, 41 ч и 20...76 ч).

Как было показано нами ранее [11], внутри популяций сосны обыкновенной по сочетанию используемых показателей выделяются 2 группы устойчивых к засухе деревьев: деревья, способные добывать влагу с помощью развитых корневых систем (у них больше длина хвои, показатели t_{50} и V_{50} , но меньше $t_{50\text{вер}}$), и деревья, лучше удерживающие влагу, с большим $t_{50\text{вер}}$ и меньшей V_{50} . После исключения влияния различий по массе хвоинок на ВУС хвои при расчете $t_{50\text{вер}}$ распределение видов по ВУС хвои осталось прежним (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения признаков ВУС хвои для ценопопуляций хвойных видов

Ценопопуляция	t_{50} , ч	ВЛ, %	V_{50} , мг/ч	$t_{50\text{вер}}$
<i>г. Туруханск, р. Байкалиха</i>				
Сосна обыкновенная	82,2±6,04***	66,2±0,63*	4,5±0,48**	42,9±3,48***
Ель сибирская	27,5±2,11***	63,4±1,29**	3,1±0,23**	16,6±2,45***
Сосна сибирская	106,3±7,30***	66,5±0,43	4,2±0,40	56,7±3,54***
<i>хр. Тункинские гольцы, Восточный Саян</i>				
Сосна обыкновенная	60,5±4,31***	59,9±0,59***	5,5±0,60***	33,2±2,88***
Ель сибирская	37,9±4,26***	63,5±1,08**	2,0±0,16***	19,9±1,91***
Сосна сибирская	159,4±9,48***	66,6±0,45***	3,3±0,23***	82,1±5,30***
<i>Якутия, р. Оросу</i>				
Сосна обыкновенная	89,0±4,42**	63,0±0,25***	4,4±0,34***	47,5±2,55
Ель сибирская	69,5±7,10**	66,3±0,99***	2,0±0,21***	43,5±6,96
<i>хр. Ергаки, Западный Саян</i>				
Сосна сибирская	258,7±15,93*** при A = 100 лет 168,4±14,51***	64,7±0,51 при A = 100 лет 67,4±0,46	2,7±0,23***	146,0±11,91***
Ель сибирская	60,8±5,49***	66,5±1,09	1,2±0,11*	35,1±3,98***
Пихта сибирская	40,7±2,37***	67,2±1,14	1,6±0,14*	22,8±1,82***

*Уровень достоверности при сравнении ценопопуляций видов внутри местообитаний – $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$.

При этом наименьшая скорость потери воды хвоей (с поправкой на массу хвои) отмечена у пихты и ели, средняя – у кедра, большая – у сосны. Следовательно, наименьшие значения признака t_{50} у ели и пихты в большей степени обусловлены не высокой скоростью испарения влаги, а меньшими размерами

хвои этих видов и большей суммарной испаряющей поверхностью образцов относительно их массы. Самыми высокими значениями показателей ВУС хвои отличались ценопопуляции сосны обыкновенной и ели сибирской из Якутии, что объясняется засушливостью климата. Необычайно высокие значения признаков ВУС хвои зафиксированы и для деревьев, выросших в гумидном климате на хр. Ергаки, особенно для сосны сибирской. Так как в этой ценопопуляции сосны сибирской большую часть выборки составляли деревья старше 120 лет, то во всех выборках с хр. Ергаки, особенно у сосны сибирской, для уточнения влияния возраста деревьев на исследуемые признаки был проведен регрессионный анализ (всего у 110 деревьев). Корреляции с возрастом были выявлены только в выборке деревьев сосны сибирской по признакам t_{50} и ВЛ (рис. 2) с довольно большим разбросом значений. С увеличением возраста деревьев сосны сибирской возрастала ВУС хвои и снижалась ВЛ.

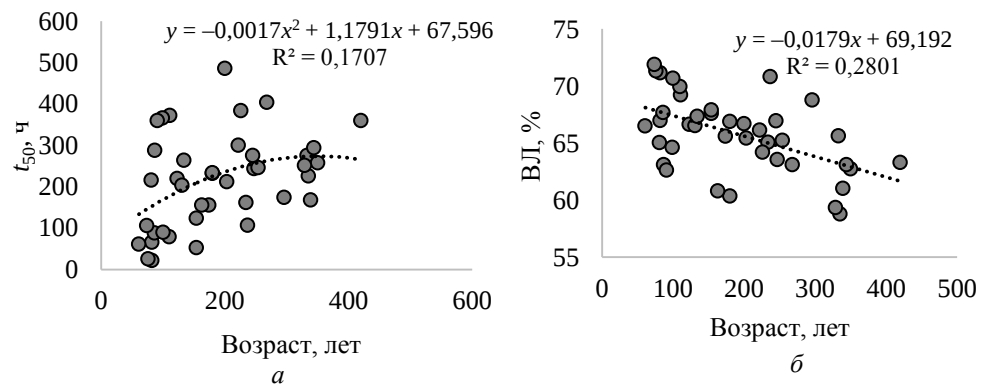


Рис. 2. Зависимость t_{50} (а) и ВЛ (б) хвои от возраста деревьев сосны сибирской в выборке с хр. Ергаки

Fig. 2. Dependence of needles dehydration (50 %) time t_{50} (а) and needles water capacity ВЛ (б) on age of Siberian pine trees in a sample from the Ergaki ridge

С учетом полученных зависимостей была рассчитана поправка по двум признакам на примерный средний возраст деревьев выборки – 100 лет (рис. 3). В результате индивидуальные пределы значений выборки по t_{50} составили 24...377 ч, по ВЛ – 61,7...73,5 %. Однако даже после исключения влияния возрастных различий ВУС хвои сосны сибирской с хр. Ергаки осталась самой высокой, хотя вид считается одним из особенно влаголюбивых [4], но при этом он сохраняет устойчивость хвои к засухе.

Как видно из табл. 2, внутри фитоценозов различия между всеми сительным признакам ВУС хвои, включая расчетные значения, с поправкой на возраст для сосны сибирской с хр. Ергаки. По влагоемкости хвои различия между видами менее заметны, но тоже достоверны в каждом из 3 пунктов. Необходимо отметить, что существенно различались по t_{50} и $t_{50\text{вер}}$ и ценопопуляции одного вида из разных местообитаний: все выборки сосны обыкновенной ($P < 0,001$ – $0,000$), ели сибирской ($P < 0,010$ – $0,000$), сосны сибирской ($P < 0,001$ – $0,000$). У всех видов большинство ценопопуляций достоверно различались по влагоемкости хвои, с максимальными индивидуальными пределами для ели сибирской (51...90 %) и пихты сибирской (55...81 %), с меньшими для сосны обыкновенной (55...75 %) и сосны сибирской (59...72 %). Достоверные различия получены также для ценопопуляций ели сибирской и сосны сибирской по скорости дегидратации хвои V_{50} .

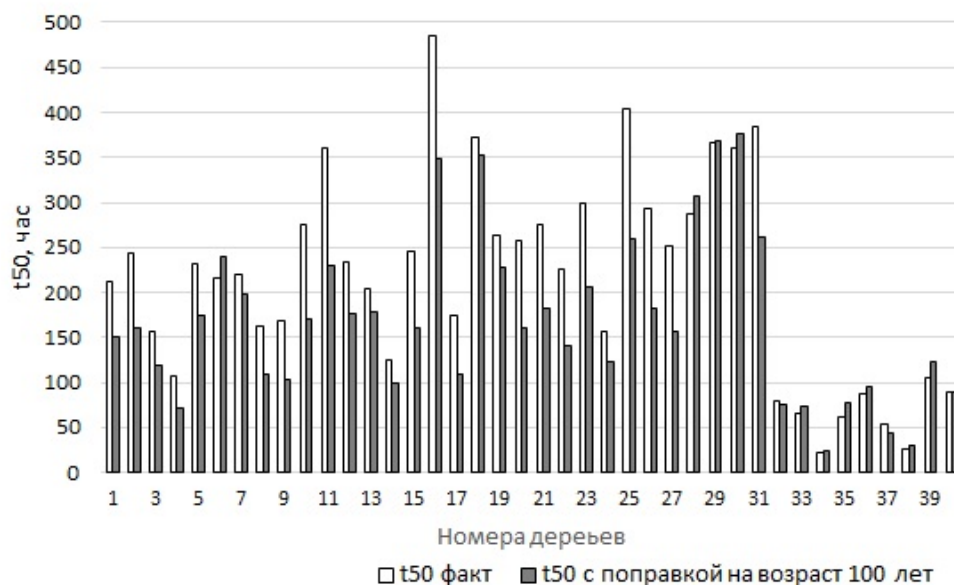


Рис. 3. Фактические и расчетные значения t_{50} для деревьев сосны сибирской с хр. Ергаки в их реальном возрасте (□) и с поправкой на возраст 100 лет (■)

Fig. 3. Actual and calculated values of t_{50} for Siberian pine trees from Ergaki ridge in their real age (□); and adjusted for the age of 100 years (■)

Для лучшего понимания полученных результатов был проведен корреляционный анализ взаимосвязей между всеми использованными признаками ВУС хвой. В большинстве выборок деревьев t_{50} и $t_{50\text{вер}}$, естественно, коррелированы со скоростью испарения воды V_{50} ($r = -0,74 \dots -0,88$), в выборках сосен обыкновенной и сибирской – с длиной и массой хвой ($r = 0,45-0,56$), в двух выборках ели сибирской и одной выборке пихты сибирской из влажных местообитаний (хр. Ергаки, г. Туруханск) – как с V_{50} ($r = -0,51; -0,63$), так и с полной ВЛ хвой ($r = 0,62-0,75$). В итоге абсолютное время потери 50 % воды (t_{50}), которое можно считать интегрирующим показателем разных (физиологических, анатомических и морфологических) механизмов засухоустойчивости хвой дерева, у сосен обыкновенной и сибирской больше связано со скоростью испарения воды с поверхности хвой и ее размерами, у ели сибирской – с полной влагоемкостью и массой поглощенной воды. Это свидетельствует о разных механизмах засухоустойчивости двух видов сосен, с одной стороны, и ели сибирской и пихты сибирской, с другой. В предыдущем нашем исследовании было показано, что в популяционных выборках известной своей высокой засухоустойчивостью сосны обыкновенной [17] встречаются деревья с разными способами адаптации к дефициту влаги: часть из них способна добывать ее с помощью развитой корневой системы (у них большие длина хвой, t_{50} и V_{50} , но меньше $t_{50\text{вер}}$), другие способны ее удерживать (у них большая $t_{50\text{вер}}$ и меньше V_{50}) [11], с непрерывным рядом переходов между ними. Подобный ряд можно составить для разных видов хвойных (от ксерофитов до гигрофитов), используя большее число признаков (ВУС и ВЛ хвой).

В результате анализа индивидуальной изменчивости признаков ВУС хвой было установлено, что в ценопопуляциях всех видов признаки t_{50} , $t_{50\text{вер}}$ и V_{50} варьируют на высоком и очень высоком уровнях (коэффициент вариации 27...89 %). Признак ВЛ оказался более стабильным в ценопопуляциях всех

сравниваемых видов (коэффициенты вариации более низкие для сосен сибирской и обыкновенной – 3...6 %, более высокие для выборок ели сибирской и пихты сибирской – 8...11 %). Внутри выборок деревья разных видов по ВУС хвой распределяются следующим образом (рис. 4).

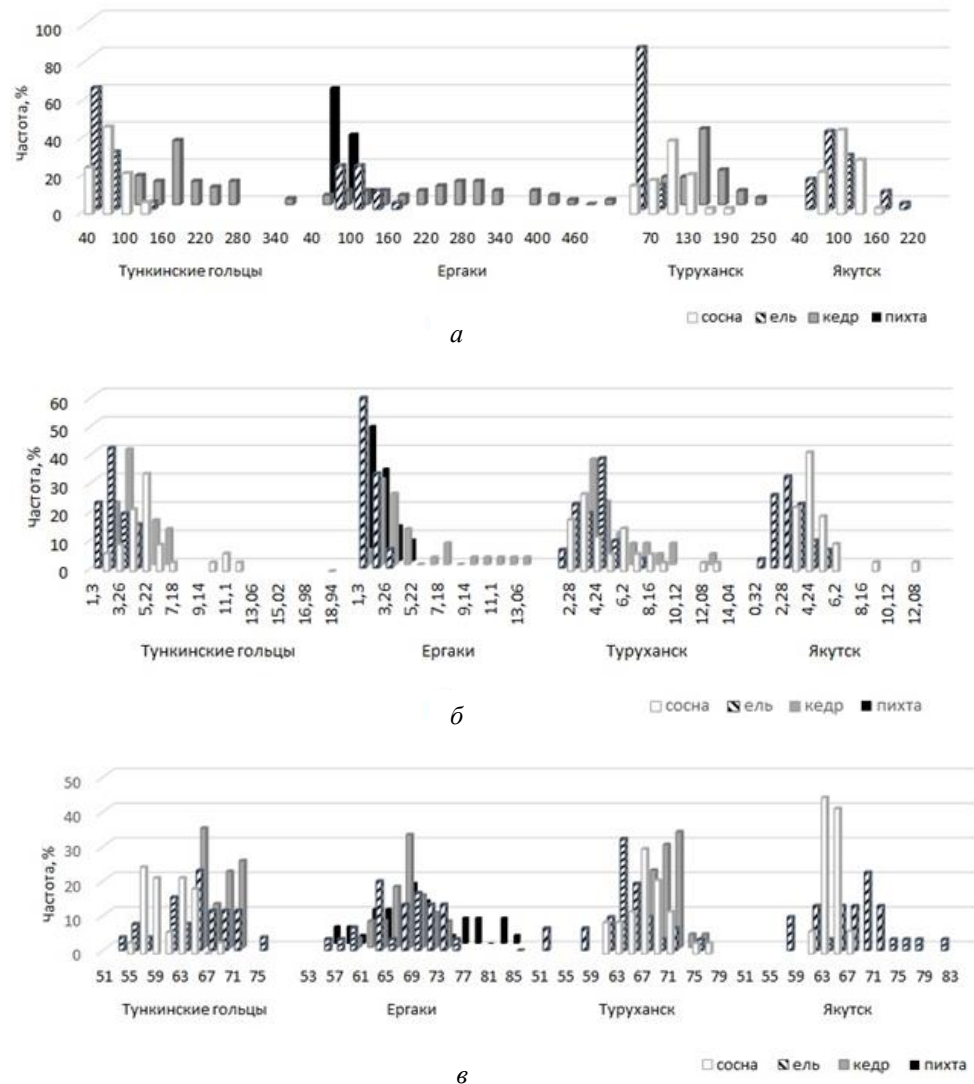


Рис. 4. Распределение деревьев в популяционных выборках по признакам t_{50} , ч (*а*), V_{50} , мг/ч (*б*), ВЛ, % (*в*)

Fig. 4. Distribution of trees in the population samples according to the characteristics t_{50} , h (*а*), V_{50} (needles dehydration (50 %) rate), mg/h (*б*), ВЛ, % (*в*)

В выборках максимальное значение превышало минимальное в 3,3–8,2 раза по t_{50} и $t_{50\text{вер}}$, в 3,8–10,1 раза по V_{50} и только в 1,1–1,8 раза по ВЛ. Среди сравниваемых видов наибольший размах значений внутри выборок по V_{50} был выявлен для сосен обыкновенной и сибирской, по ВЛ – для ели сибирской и пихты сибирской, по t_{50} – для отдельных ценопопуляций сосны сибирской, ели сибирской и сосны обыкновенной.

Заключение

В результате предварительных исследований, проведенных в смешанных древостоях горной, средней и северной тайги Средней и Восточной Сибири, были установлены индивидуальные пределы изменчивости в ценопопуляциях 4 вечнозеленых видов хвойных по водоудерживающей способности хвои. Отмечено, что сравниваемые виды характеризуются наибольшим размахом значений внутри выборок по скорости дегидратации хвои – у сосны обыкновенной и сосны сибирской, по влагоемкости хвои – у ели сибирской и пихты сибирской. При этом засухоустойчивость хвои у сосен обыкновенной и сибирской больше связана с размерами хвои и скоростью испарения воды с ее поверхности, у ели сибирской – с полной влагоемкостью и массой поглощенной воды. Поэтому можно предположить, что в целом более узкие пределы изменчивости хвойных видов по способности к поглощению воды хвоей (влагоемкости) по сравнению с водоудерживающей способностью могут быть одной из причин большей чувствительности ели сибирской и пихты сибирской к засухе.

Сведения о различиях по абсолютным и относительным значениям водоудерживающей способности хвои и их коррелированности позволяют примерно оценить относительное положение таежных ценопопуляций хвойных видов на шкале засухоустойчивости. Например, была выявлена высокая водоудерживающая способность хвои не только у известного ксерофита – сосны обыкновенной, но и у значительной части выборок влаголюбивых сосны сибирской и ели сибирской даже из влажных местообитаний. Это свидетельствует о способности части деревьев в популяциях видов гигрофитов и ксерофитов адаптироваться к нетипичным для них условиям водного режима. Однако эти данные получены хотя и для большого диапазона внешних условий произрастания, но в относительно благоприятные по увлажнению сезоны. Дальнейшие исследования в тех же местообитаниях в засушливые вегетационные сезоны позволят иметь более полные сведения о реакции хвойных видов на засуху.

Как показал анализ, признаки водоудерживающей способности хвои, особенно по верхнему и нижнему пределам значений, тесно коррелированы с возрастом деревьев, поэтому для проведения селекционного отбора на устойчивость к обезвоживанию в природных популяциях необходимо уточнять возраст дерева с точностью до 2-го классов возраста (40...50 лет). В связи с этим, к разрешению спора между лесоводами о необходимости рубки всех спелых древостоев в лесах бореальной зоны был сделан еще один важный вывод о необходимости сохранения старовозрастных насаждений и деревьев, особенно влаголюбивых темнохвойных видов, отличающихся наибольшей засухоустойчивостью хвои, на случай более резких колебаний климата. Поскольку доля высокоустойчивых деревьев в выборках относительно невелика, данные насаждения должны сохраняться на значительной площади во всех лесосеменных районах, учитывая также установленные существенные межпопуляционные различия внутри видов по водоудерживающей способности хвои. При этом необходимо отметить, что высокая способность хвои удерживать влагу является только одним из факторов устойчивости дерева к засухе наряду с развитием корневой системы и микоризы, с особенностями фенологии. Комплексной характеристикой устойчивости дерева к засухе может быть оценка состояния кроны дерева наряду со сведениями о водоудерживающей способности хвои в засушливые годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баранчиков Ю.Н., Петько В.М., Астапенко С.А., Акулов А.Н., Кривец С.А. Уссурийский полиграф – новый агрессивный вредитель пихты в Сибири // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2011. № 4. С. 78–81. [Baranchikov Y.N., Petko V.M., Astapenko S.A., Akulov E.N., Krivets S.A. *Polygraphus proximus* – A New Aggressive Invasive Pest of Firs in Siberia. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2011, no. 4, pp. 78–81].
2. Боровиков В.П. STATISTICA: Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2003. 688 с. [Borovikov V.P. *STATISTICA: The Art of Analyzing Data on a Computer*. Saint Petersburg, Piter Publ., 2003. 688 p.].
3. Изменение климата и биоразнообразие российской части Алтае-Саянского экорегиона / под ред. Н.Н. Михайлова. Красноярск: Город, 2013. 328 с. [*Climate Change and Biodiversity in the Russian Part of the Altai-Sayan Ecoregion*. Ed. by N.N. Mikhaylov. Krasnoyarsk, Gorod Publ., 2013. 328 p.].
4. Кедровые леса Сибири / отв. ред. А.С. Исаев. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с. [*Cedar Forests of Siberia*. Ed. by A.S. Isayev. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 256 p.].
5. Котов М.М., Лебедева Э.П., Прохорова Е.В. Вододерживающая способность хвои как диагностический признак для оценки объектов единого генетико-селекционного комплекса // Лесн. журн. 2002. № 4. С. 59–65. (Изв. высш. учеб. заведений). [Kotov M.M., Lebedeva E.P., Prokhorova E.V. Water-Retention Ability of Needle as Diagnostic Indication for Assessment of Objects of Common Genetic-Selection Complex. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2002, no. 4, pp. 59–65]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/339/33925062b51facaafc48ead21d5aa6f0.pdf>
6. Манько Ю.И., Гладкова Г.А. О факторах усыхания пихтово-еловых лесов на Дальнем Востоке // Лесоведение. 1995. № 2. С. 3–12. [Man'ko Yu.I., Gladkova G.A. On the Factors of Fir and Spruce Forests Drying in the Far East. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1995, no. 2, pp. 3–12].
7. Наквасина Е.Н. Дегидратация хвои сосны обыкновенной в географических культурах Архангельской области // Лесн. журн. 2002. № 6. С. 16–21. (Изв. высш. учеб. заведений). [Nakvasina E.N. Dehydration of Scots Pine Needles in Geographical Cultures of Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2002, no. 6, pp. 16–21]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/313/313440315a4bb5d54f2888a8d1d1de32.pdf>
8. Павлов И.Н. Биосферная роль дереворазрушающих грибов *Heterobasidion annosum* S.L. и *Armillaria mellea* S.L. (на примере кедровых лесов Западного Саяна) // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2013. Т. 18, вып. 4. С. 1270–1273. [Pavlov I.N. Biosphere Role of Tree Devastating Mushrooms *Heterobasidion annosum* S.L. and *Armillaria mellea* S.L. (On the Example of Cedrine Forests of West Sayana). *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences], 2013, vol. 18, no. 4, pp. 1270–1273].
9. Протопопов В.В. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука, 1975. 327 с. [Protopopov V.V. *The Habitat Forming Role of Dark Coniferous Forest*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 327 p.].
10. Рахманов В.В. Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 240 с. [Rakhmanov V.V. *Hydroclimatic Role of Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 240 p.].
11. Тихонова Н.А., Тихонова И.В. Индивидуальная изменчивость сосны обыкновенной по признакам засухоустойчивости в лесостепных борах Южной Сибири // Сиб. лесн. журн. 2016. № 5. С. 114–124. [Tikhonova N.A., Tikhonova I.V. Individual Variability of Scots Pine by the Drought Resistance Features in Forest-Steppe Pine Forests of South Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 5, pp. 114–124]. DOI: [10.15372/SJFS20160512](https://doi.org/10.15372/SJFS20160512)
12. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R.,

Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests. *Forest Ecology Management*, 2010, vol. 259, iss. 4, pp. 660–684. DOI: [10.1016/j.foreco.2009.09.001](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001)

13. Davin E.L., de Noblet-Ducoudré N. Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative Versus Nonradiative Processes. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, pp. 97–112. DOI: [10.1175/2009JCLI3102.1](https://doi.org/10.1175/2009JCLI3102.1)

14. *Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region*. Ed. by R.F. Huettl, D. Mueller-Dombois. Berlin, Springer, 1993. 366 p. DOI: [10.1007/978-3-642-76995-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-76995-5)

15. Gitlin A.R., Sthultz C.M., Bowker M.A., Stumpf S., Paxton K.L., Kennedy K., Muñoz A., Bailey J.K., Whitham T.G. Mortality Gradients within and among Dominant Plant Populations as Barometers of Ecosystem Change during Extreme Drought. *Conservation Biology*, 2006, vol. 20, iss. 5, pp. 1477–1486. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2006.00424.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00424.x)

16. Giuggiola A., Kuster T.M., Saha S. Drought-Induced Mortality of Scots Pines at the Southern Limits of Its Distribution in Europe: Causes and Consequences. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2010, vol. 3, iss. 4, pp. 95–97. DOI: [10.3832/ifer0542-003](https://doi.org/10.3832/ifer0542-003)

17. Kozłowski T.T., Kramer P.J., Pallardy S.G. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. London, Academic Press, 2012. 678 p.

18. Lebourgeois F., Rathgeber C.B.K., Ulrich E. Sensitivity of French Temperate Coniferous Forests to Climate Variability and Extreme Events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*, 2009, vol. 21, pp. 364–376. DOI: [10.1111/j.1654-1103.2009.01148.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01148.x)

19. Park Williams A., Allen C.D., Macalady A.K., Griffin D., Woodhouse C.A., Meko D.M., Swetnam T.W., Rauscher S.A., Seager R., Grissino-Mayer H.D., Dean J.S., Cook E.R., Gangodagamage C., Cai M., McDowell N.G. Temperature as a Potent Driver of Regional Forest Drought Stress and Tree Mortality. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 292–297. DOI: [10.1038/nclimate1693](https://doi.org/10.1038/nclimate1693)

20. Van Mantgem P.J., Stephenson N.L., Byrne J.C., Daniels L.D., Franklin J.F., Fulé P.Z., Harmon M.E., Larson A.J., Smith J.M., Taylor A.H., Veblen T.T. Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States. *Science*, 2009, vol. 323, iss. 5913, pp. 521–524. DOI: [10.1126/science.1165000](https://doi.org/10.1126/science.1165000)

WATER-RETAINING CAPACITY OF NEEDLES IN POPULATIONS OF THE MAIN FOREST-FORMING CONIFEROUS SPECIES IN THE FORESTS OF THE TAIGA ZONE OF SIBERIA

N.A. Tikhonova¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [R-4349-2019](https://orcid.org/0000-0003-3922-5031),
ORCID: [0000-0003-3922-5031](https://orcid.org/0000-0003-3922-5031)

I.V. Tikhonova², Candidate of Biology; ResearcherID: [V-3735-2017](https://orcid.org/0000-0001-6929-9491),
ORCID: [0000-0001-6929-9491](https://orcid.org/0000-0001-6929-9491)

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: ntikhonova@ksc.krasn.ru

²West-Siberian Branch of Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”, ul. Zhukovskogo, 100/1, Novosibirsk, 630082, Russian Federation; e-mail: selection@ksc.krasn.ru

The limits of individual variation of trees by the water-retaining capacity of needles in populations of forest-forming coniferous species (Scots pine, Siberian pine, Siberian spruce and Siberian fir) growing in the conditions of the mountainous, middle and northern taiga of Central and Eastern Siberia were studied. It is found that among the compared evergreen species, Scots pine and Siberian pine are characterized by the highest intrapopulation variation in the rate of needles dehydration; Siberian spruce and Siberian fir are characterized by greater

variability in the ability of needles to water absorption. However, in samples of the last two species, the share of trees with a low rate of water loss is quite large, even in wet habitats. In more drought-resistant pine species there is a smaller part of trees, which quickly evaporate moisture and have a high water capacity of needles. While a smaller part of trees of Siberian spruce and Siberian fir are less resistant to dehydration and differ by low water capacity of needles. While in Siberian spruce and Siberian fir a smaller part are trees less resistant to dehydration with low water capacity of needles. We revealed the significant differences between species in mixed stands and between geographic populations of species by water-retaining capacity of needles. The highest values of this indicator were obtained for Scots pine and Siberian spruce from Yakutia, as well as for old-growth trees of Siberian pine from the Western Sayan. The necessity of preserving old-growth stands and trees, characterized by the greatest drought resistance of needles, especially hygrophilous dark coniferous species in a changing climate is emphasized. The obtained data and correlations between the used features allow us to estimate one of the components of drought resistance of taiga populations of coniferous species and their intrapopulation diversity.

For citation: Tikhonova N.A., Tikhonova I.V. Water Retaining Capacity of Needles in Populations of the Main Forest-Forming Coniferous Species in the Forests of the Taiga Zone of Siberia. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 83–94. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.83

Funding: The research is carried out within the framework of the budget project No. 0346-2016-0301 of the West-Siberian Branch of Sukachev Institute of Forest SB RAS and the Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS” with the partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research, the Government of Krasnoyarsk Territory, and the Krasnoyarsk Regional Fund of Science in the framework of the research project No. 18-44-240002.

Keywords: forest-forming coniferous species, mixed forests, drought resistance, Siberia.

Поступила 26.03.19 / Received on March 26, 2019

УДК 674.031.632.13:634.0.265
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.95

АНОМАЛИИ ВЕТВЛЕНИЯ БЕРЕЗЫ (*Betula*) В ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОСАХ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ

А.Б. Захаров, канд. биол. наук; ORCID: [0000-0003-4082-3792](https://orcid.org/0000-0003-4082-3792)
*В.П. Бессчетнов, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [S-5889-2016](https://orcid.org/S-5889-2016),
ORCID: [0000-0001-5024-7464](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464)*

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; e-mail: alexeinn1@mail.ru, lesfak@bk.ru

Широкий спектр загрязняющих веществ может негативно отражаться на объектах растительного мира. Древесные виды активно аккумулируют поллютанты, образующиеся в результате антропогенной деятельности. Береза как распространенный вид в защитных посадках автомобильных дорог подвергается высокой нагрузке. Цель исследования – сравнительная оценка морфологии березы повислой и ее гибридных форм, подверженных влиянию факторов загрязнения среды выбросами автотранспорта, а также классификация признаков, несвойственных принятому таксономическому описанию вида. В процессе изучения обнаружены модификации вегетативных органов березы повислой вдоль автомагистрали Нижний Новгород–Москва. Морфология частей и органов березы вследствие несвойственных для этого вида экологических условий изменилась, появились различного рода морфозы и модификации. Отмечены выраженные изменения в виде активизации мутовчатости побегов, вариации формы и морфологии листовых пластин, увеличения толщины и структуры покровных тканей. Установлено, что измененные признаки возникают по закономерностям, зависящим от удаленности растений от источника загрязнения и пространственного расположения их вегетативных частей и органов. Выявленные закономерности могут быть использованы при селекции березы, устойчивой к химическому загрязнению, а также при совершенствовании методов дендроиндикации.

Для цитирования: Захаров А.Б., Бессчетнов В.П. Аномалии ветвления березы (*Betula*) в защитных лесных полосах автомагистралей // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 95–104. (Изн. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.95

Ключевые слова: береза повислая, морфология, поллютанты, модификации растений, изменчивость, дендроиндикация, защитные лесные полосы.

Введение

Развитие городов и транспортной инфраструктуры неразрывно связано с усилением их влияния на экологическую обстановку территорий. Урбанизированные районы оказывают многообразное воздействие на окружающую среду. Влияние очагов загрязнения сказывается и за их пределами. Распространение загрязняющих веществ канализируется по ветру, склону и течению. Это влечет за собой активизацию процессов деградации всех компонентов природной среды. Концентрация в окружающей среде поллютантов, образующихся в результате антропогенной деятельности, негативно отражается на растительном мире [11]. Древесные виды активно накапливают эти вещества и химические элементы.

Береза произрастает на всей территории России и во многих странах ближнего и дальнего зарубежья [6]. Встречается в виде чистых по составу популяций, а также как примесь к различным лесообразующим породам в хвойных и лиственных лесах. Она образует множество гибридных форм, которые

обладают высокой морозо- и засухоустойчивостью, нетребовательны к почвенным условиям [4]. Благодаря неприхотливости и разветвленной ажурной кроне данный вид широко используется в создании защитных лесных полос различного целевого назначения и конструкций, в том числе вдоль автомагистралей.

Анализ природных условий урбанизированной территории Балахнинской низменности показывает, что наряду с благоприятными почвенными и экологическими условиями произрастания березы имеются лимитирующие факторы техногенного происхождения. Одним из них выступает автомобильный транспорт. Согласно материалам доклада министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области «Состояние окружающей среды и природных ресурсов Нижегородской области в 2009 году» [14], на территории региона сосредоточено значительное количество единиц автомобильного транспорта. Вклад автотранспорта в суммарные выбросы составляет 69,2 % (в том числе: оксид углерода – 45,1 %, оксиды азота – 15,2 %, прочие поллютанты – 7,7 %). Продукты сгорания топлива, масел и истирания автомобильных шин попадают на прилегающие к дорогам территории, что определенным образом влияет на окружающую растительность. Воздействие загрязнителей имеет продолжительный во времени характер и контрастно проявляется в зоне, прилегающей к автодороге федерального значения Москва–Нижний Новгород (М7).

Несмотря на угнетающее воздействие поллютантов, у некоторых растений активируются ростовые процессы, приводящие к образованию частей и органов с морфологией, несвойственной их традиционному таксономическому описанию. Подобные изменения зафиксированы у березы повислой [1, 2, 10, 12, 16–23]. В частности, отмечено появление мутовчатости, изменение формы кроны и морфологии листовой пластины [7, 9]. В ряде работ представлены перечни видов, у которых были выявлены аномалии ветвления [3, 13, 14, 17]. В литературе, посвященной «ведьминым метлам», дискутируются причины их возникновения. Установлено, что активное ветвление является одной из распространенных неспецифических реакций на разнообразные воздействия, такие как влияние химических мутагенов, рентгеновского облучения и др. [15, 20–23]. Указанные изменения могут быть охарактеризованы зависимостями, которые в свою очередь позволят расширить наши представления о закономерностях возникновения морфозов. Данная проблема недостаточно изучена, ее решением могут быть новые комплексные подходы к анализу причин возникновения модификаций растений. Некоторые изменения, происходящие в морфологии березы, относятся к модификационной изменчивости, являясь эволюционно закрепленной реакцией генотипа растения на изменения условий внешней среды и возникая при неизменном генотипе. К особенностям данных изменений можно отнести их одинаковость и массовость. В то же время не исключается вероятность мутагенного действия поллютантов, индуцирующих соматические мутации и геномные перестройки. Модификации не наследуются, однако известны длительные модификационные изменения у некоторых бактерий, сохраняющиеся и в следующем поколении. У ряда организмов описаны модификации, которые закрепились на генетическом уровне в ходе продолжительного эволюционного процесса [5]. Наиболее распространены адаптивные модификации, способствующие выживанию организма в агрессивной среде [5, 11].

Цель исследования – сравнительная оценка морфологии березы повислой и ее гибридных форм, подверженных влиянию факторов загрязнения среды выбросами автотранспорта, а также классификация признаков, несвойственных принятому таксономическому описанию вида.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступали защитные лесные полосы с преобладанием в составе березой повислой, расположенные вдоль автомагистрали Нижний Новгород–Москва (высокая степень влияния автотранспорта). Координаты участков: 56°18'22" с. ш. 43°40'10" в. д.; 56°18'14" с. ш. 46°36'04" в. д. В качестве контрольного выбрано насаждение вдоль автомобильной дороги Богородск–Нижний Новгород (средняя степень влияния автотранспорта) с координатами 56°08'33" с. ш. 43°39'54" в. д.

В соответствии с целью исследования была выдвинута рабочая гипотеза о том, что при загрязнении почвы тяжелые металлы и другие элементы или соединения проникают в ткани растений через корневую систему и распространяются далее равномерно. Значит, и формирование узлов с аномальным ветвлением в верхней части кроны не может быть более интенсивным. Данное утверждение позволяет выдвинуть предположение о преимущественном воздействии на верхние части кроны поллютантов, образуемых выхлопными газами автомобилей, через воздушную среду.

Исследования проводили полевым стационарным и лабораторными методами. Биологические образцы отбирали после предварительного осмотра растений. Визуально определяли наличие нехарактерной для вида морфологии. Наиболее информативными для диагностики являлись части органов растений с повышенной мутовчатостью, измененной формой листовой пластины. Обследовались и те части растений, на которых нет видимых симптомов повреждения или поражения. Пробами для детального анализа служили видоизмененные и нормальные по фенотипу части растений. На каждом растении учитывали наличие вредных насекомых и признаков болезней. Отбирали 3–4 хорошо освещаемых побега взрослых растений или молодые растения целиком. Изъятие биологического образца проводили с наименьшим ущербом для растения. Образцы фотографировали, ткани растений подвергали гистологическому анализу с использованием микротомы (красители – фуксин, метиленовый синий) и микроскопа «МикМед-5». На каждом побеге определяли характер ветвления и длину, параметры листовых пластин и особенности их морфологии.

Результаты исследования и их обсуждение

При обследовании защитных лесных полос вдоль автомобильной дороги М7 зафиксировано массовое видоизменение вегетативных органов березы. Изменения в морфологии отмечены у более чем 457 деревьев на участке Нижний Новгород–пос. Северный (протяженность 14 км). Визуальный осмотр их кроны показал нехарактерную для вида мутовчатость побегов: наличие многочисленных узлов с большим количеством сухих ветвей разных вегетационных периодов, выросших из этих узлов (рис. 1).

Эти морфологические изменения были однотипными и проявлялись на всех учтенных деревьях, подверженных воздействию поллютантов. Установлено, что форма кроны по длине ствола неодинаковая, прослеживается достаточно четкая граница между кроной, соответствующей таксономическому описанию, и кроной с большим количеством ветвящихся узлов. Известно, что аномальная мутовчатость может вызываться некоторыми видами аскомицетов. Однако при изучении тканей и покровов растений под микроскопом с применением специфических красителей не было обнаружено микроорганизмов.



Рис. 1. Ветвление березы пушистой в зоне негативного влияния автотранспорта на участке автомагистрали М7 у пос. Северный

Fig. 1. Branching of white birch under the negative influence of vehicles on the site of the M7 highway near of the Severny village

Причиной возникновения изменений, которые вызвали нарушения морфогенеза и, как следствие, появление нетипичного для представителей вида фенотипа, может выступать повышенное содержание загрязняющих веществ в приземных слоях воздуха.

Исследования узлов на ветвях березы показали, что новообразование представляет собой одревеснение побега с активным нарастанием биомассы (зафиксированы в образцах длиной от 8,0 см до 10,5 см) с большим числом побегов текущих лет. Количество побегов в разных образцах изменялось от 35 шт. до 57 шт., при этом живыми из них являлись только побеги текущего года, в среднем 13 побегов (рис. 2).

На рис. 2 также видно наличие вегетативных почек, заложившихся в зоне формирования покровных тканей. Зеленые побеги, возникшие на узле, после отделения от дерева продолжительное время оставались в нормальном состоянии: тургор клеток сохранялся на протяжении 3 сут несмотря на свободное хранение образцов при комнатной температуре. Образцы, взятые с дерева на незагрязненной территории, в тех же условиях теряли это свойство уже через 4 ч.



Рис. 2. Внешний вид ветвящегося узла (слева) и его рассеченная часть (справа)

Fig. 2. The habit of a branching node (on the left) and its dissected part (on the right)

Исследование внутренней структуры узлов вскрыло увеличение толщины покровных тканей продольного среза узла и флоэмы ветвей, толщина которых в совокупности составляла в среднем $(3,5 \pm 0,5)$ мм. При этом естественная норма для основной ветви – $(1,5 \pm 0,5)$ мм. В одревесневших тканях узлов присутствуют многочисленные вросшие побеги прошлых лет. При ретроспективном анализе установлен их возраст – 7 лет, что свидетельствует о продолжительном антропогенном воздействии. Микроскопический анализ обнаружил увеличение толщины эпидермального слоя узлов по отношению к типичным побегам в 2,3 раза. Размер клеток также увеличен, что может свидетельствовать о повышении их жизнеспособности.

Отмечены отклонения формы листовых пластинок ветвей, сформированных на узлах, от типичного фенотипа листьев, развившихся в верхней части кроны, где нет признаков мутовчатости (рис. 3).



Рис. 3. Листовые пластины березы из верхней части кроны (слева) и с побегов на узлах (справа)

Fig. 3. Birch leaf lamina from the top of crown (on the left) and from shoots on nodes (on the right)

Как видно на рис. 3, зубчатость видоизмененных листьев отличается от таковой у типичных. Листья от ветвей с нормальным фенотипом очередные, цельные, по краю зубчатые, яйцевидно-ромбические, моносимметричные. Отличительной особенностью листовых пластин с узлов является их форма, при этом жилкование листовой пластинки также совершенное – основные жилки оканчиваются в зубцах. Количество зубцов варьируется от 5 до 14. Статистические данные параметров листовых пластин приведены в табл. 1.

Материалы статистического анализа, приведенные в табл. 1, вскрыли неодинаковый характер развития листовых пластин березы повислой на участках с разным уровнем загрязнения выбросами автотранспорта. Так, средние арифметические величины на более подверженном антропогенному влиянию участке автодороги по длине составляют $(7,0 \pm 0,05)$ см, по ширине – $(5,6 \pm 0,05)$ см, что на 20 % ниже параметров листовых пластин, отобранных с контрольной пробной площади. Установленная дифференциация преимущественно обусловлена разным уровнем концентрации поллютантов на указанных участках.

Таблица 1

**Статистические показатели листовых пластин березы повислой,
растущей вдоль автомагистралей с различным уровнем
интенсивности эксплуатации**

Статистический показатель	Богородск–Нижний Новгород		М7 (у пос. Северный)	
	Длина	Ширина	Длина	Ширина
Среднее арифметическое значение (М)	8,13	5,41	7,02	5,66
Стандартное отклонение (σ)	1,07	0,81	0,70	0,72
Коэффициент вариации (C_v), %	13,20	14,96	9,94	13,02
Ошибка среднего значения ($\pm m_x$)	$\pm 0,07$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
Точность опыта (Р), %	0,90	0,97	0,65	0,85
Дисперсия (D)	1,14	0,65	0,48	0,52
Ошибка коэффициента вариации ($\pm m_c$)	$\pm 0,0064$	$\pm 0,00687$	$\pm 0,0045$	$\pm 0,0059$
Ошибка стандартного отклонения ($\pm m_\sigma$)	$\pm 0,0518$	$\pm 0,03716$	$\pm 0,0320$	$\pm 0,0332$
Ошибка точности опыта ($\pm m_p$)	$\pm 0,0004$	$\pm 0,00045$	$\pm 0,0003$	$\pm 0,0003$
t_x	110,590	102,896	154,870	118,220
t_c	20,64	21,7715	21,771	21,771
t_σ	20,64	21,7715	21,771	21,7715

Отмечено, что дисперсия длины и ширины листьев увеличивается по мере удаления от источников загрязнения. Так, дисперсия по длине листовых пластин на менее нагруженном участке составляла 1,14, на учетной площади у пос. Северный – 0,48, а по ширине листа на автомобильной дороге Богородск–Нижний Новгород – 0,65, на автомагистрали М7 – 0,52. Данные фактические показатели дисперсии могут быть связаны с нормой реакции генотипа растений. На более загрязненных участках на фоне общего угнетения растений имеется диапазон минимальных значений длины и ширины листовых пластин, в связи с чем дисперсия биометрических показателей у угнетенных растений ниже по длине на 59 %, по ширине – на 20 %.

Анализ собранного материала позволил выявить закономерности ветвления березы повислой в различных условиях антропогенного влияния. В существенно угнетенных насаждениях отмирание побегов происходит еще на начальном этапе формирования, по мере роста их численность уменьшается. Так, среднее количество побегов длиной 5,0 см достигает 45 шт., 10,0 см – 35 шт., 50,0 см – не более 5 шт.

Чем ближе к источнику загрязнения находилось дерево, тем более активное ветвление наблюдалось. Статистические данные по формированию побегов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические показатели формирования длины побегов березы повислой вдоль автомагистралей с различным уровнем интенсивности эксплуатации

Статистический показатель	Богородск– Нижний Новгород	М7 (у пос. Северный)
Среднее арифметическое (М)	24,44	17,72
Стандартное отклонение (σ)	12,56	12,92
Коэффициент вариации (C_v), %	51,48	72,82
Ошибка среднего ($\pm m_x$)	$\pm 0,82$	$\pm 0,89$
Точность опыта (Р), %	3,34	2,80
Сумма квадратов отклонений (СКО)	157,87	166,88
Ошибка коэффициента вариации ($\pm m_c$)	$\pm 0,0241$	$\pm 0,0354$
Ошибка стандартного отклонения ($\pm m_\sigma$)	$\pm 0,5773$	$\pm 0,6262$
Ошибка точности опыта ($\pm m_p$)	$\pm 0,0021$	$\pm 0,0021$
t_x	29,91	20,04
t_c	21,77	20,64
t_σ	21,77	20,64

Расчеты указывают на значительные расхождения по количеству и длинам побегов в разных условиях. На участке с высокой автомобильной нагрузкой средняя арифметическая длина побегов составляет $(17,7 \pm 0,89)$ см, что на 27,4 % ниже контрольного значения $(24,4 \pm 0,82)$ см). Различен и уровень СКО: в экологически более чистых условиях он ниже и равен 157, в антропогенно загрязненных данный показатель равен 166. Коэффициенты вариации составляют 51,48 % в неугнетенных условиях и 72,82 % при повышенной антропогенной нагрузке, что соответствует очень высокому уровню изменчивости по шкале Мамаева. В целом заметно, что на участке с повышенным уровнем загрязнения среды выбросами автотранспорта отклонения от норм в морфологии вида встречаются значительно чаще, чем в зонах с менее напряженным фоном поллютантов. Следовательно, чем сильнее проявляется эффект угнетающего воздействия на растения, тем большее число нетипичных побегов и листьев образуется на нем. Указанная тенденция характерна для всех учтенных в опыте деревьев.

Заключение

Экстремальное загрязнение атмосферы ведет к гибели побегов березы. Ответной реакцией растения предположительно явился активный синтез кининов и, как следствие, образование нетипичных для вида узлов с многочисленным ветвлением. Выявлены модификации березы повислой, в частности образование большого количества узлов с интенсивным ветвлением, увеличение толщины флоэмы и покровных тканей, возникновение которых вызвано преимущественно влиянием загрязнения воздушной среды автотранспортом. Этот тип изменений является ненаследуемым морфозом, проявившимся в нижнем пределе нормы реакции генотипа (отмирание побегов). Увеличение протяженности и фитомассы кроны наряду с увеличением толщины покровных тканей в образовавшихся узлах является модификацией, несущей адаптационный характер. Изменение формы листовой пластинки – морфоз, возникший вследствие нарушения в тканях угнетенного растения обмена веществ,

который носит неадаптационный характер. Зафиксированный длительный период сохранения тургора клеток и жизнеспособности побегов, сформированных на узлах, может свидетельствовать об усилении их жизненных функций и повышении устойчивости к стрессовым ситуациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Амосова И.Б., Феклистов П.А. Асимметрия листовой пластинки березы повислой у особей разного возрастного состояния в пригородных лесах г. Архангельска // Лесн. журн. 2010. № 2. С. 60–66. (Изв. высш. учеб. заведений). [Amosova I.B., Feklistov P.A. Leaf Plate Asymmetry of Silver Birch of Various Age in Arkhangelsk Suburban Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2010, no. 2, pp. 60–66]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/599/59997e883ce455b8cbc903c1d12b0687.pdf>
2. Баранова Т.В. Цитогенетические изменения проростков березы повислой при загрязнении городской среды // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2(26). С. 77–82. [Baranova T.V. Cytogenetic Changes of *Betula pendula* Sprouts when Environment Pollution. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2015, no. 2(26), pp. 77–82].
3. Ванин С.И. Лесная фитопатология: учеб. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 416 с. [Vanin S.I. *Forest Phytopathology*: Textbook. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1955. 416 p.].
4. Ветчинникова Л.В. Береза: вопросы изменчивости (морфо-физиологические и биохимические аспекты). М.: Наука, 2004. 183 с. [Vetchinnikova L.V. *Birch: Variability Problems (Morpho-Physiological and Biochemical Aspects)*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 183 p.].
5. Гродницкий Д.Л. Эпигенетическая теория эволюции как возможная основа нового эволюционного синтеза // Журн. общей биологии. 2001. Т. 62, № 2. С. 99–109. [Grodnitsky D.L. The Epigenetic Theory of Evolution as a Basis for a New Evolutionary Synthesis. *Zhurnal obshchey biologii* [Biology Bulletin Reviews], 2001, vol. 62, no. 2, pp. 99–109].
6. Древесные породы мира: справ.. В 3 т. Т. 3. Древесные породы СССР / под ред. К.К. Калущкого. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 264 с. [Tree Species of the World: Handbook in 3 vol. Vol. 3. Tree Species of the USSR. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982, pp. 54–57].
7. Ерофеева Е.А., Сухов В.С., Наумова М.М. Двухфазная зависимость некоторых эколого-морфологических и биохимических параметров листовой пластинки березы повислой от уровня автотранспортного загрязнения // Поволж. экол. журн. 2009. № 4. С. 288–295. [Erofeeva E.A., Sukhov V.S., Naumova M.M. Biphasic Dependence of Some Biochemical and Morphogenetic Birch Leaf Lamina Parameters on the Motor-Transport Pollution Level. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* [Povolzhskiy Journal of Ecology], 2009, no. 4, pp. 288–295].
8. Кирпичников В.С. Модификационная изменчивость и ее роль в эволюции // Развитие эволюционной теории в СССР (1917–1970-е годы) / отв. ред. С.Р. Микулинский, Ю.И. Полянский. Л.: Наука, 1983. С. 155–164. [Kirpichnikov V.C. Modification Variability and Its Role in Evolution. *Development of the Theory of Evolution in the USSR (1917–1970s)*. Ed. by S.R. Mikulinskiy, Yu.I. Polyanskiy. Leningrad, Nauka Publ., 1983, pp. 155–164].
9. Колмогорова Е.Ю., Кайдорина В.А., Неворова О.А. Морфологическая оценка состояния березы повислой в условиях действия выбросов автотранспорта // Лесн. журн. 2012. № 2. С. 20–27. (Изв. высш. учеб. заведений). [Kolmogorova E.Y., Kaydorina V.A., Neverova O.A. Morphophysiological Assessment Indices of the Woody Plants

Sustainability and Pollution of Air in Kemerovo. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2012, no. 2, pp. 20–27]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/2b1/bxqa3.pdf>

10. Коровин В.В., Новицкая Л.Л., Курносоев Г.А. Структурные аномалии стебля древесных растений. М.: МГУЛ, 2001. 259 с. [Korovin V.V., Novitskaya L.L., Kurnosov G.A. *Stem Structural Anomalies of Woody Plants*. Moscow, MGUL Publ., 2001. 259 p.].

11. Неверова О.А., Позняковский В.М. Фитоиндикация загрязнения городской среды тяжелыми металлами (на примере г. Кемерово) // Лесн. журн. 2005. № 4. С. 92–95. (Изв. высш. учеб. заведений). [Neverova O.A., Poznyakovsky V.M. Phytomonitoring of Urban Environment by Heavy Metals (on the Example of Kemerovo). *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2005, no. 4, pp. 92–96]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/bba/bba093ad33dd3c6a0a2831b2df56a66a.pdf>

12. Никерова К.М., Галибина Н.А. Влияние нитратного азота на пероксидазную активность в тканях *Betula pendula* Roth var. *pendula* и *B. pendula* var. *carelica* (Mercklin) // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 15–24. [Nikeroва K.M., Galibina N.A. The Influence of Nitrate Nitrogen on the Peroxidase Activity in Tissues of *Betula pendula* Roth var: *pendula* and *B. pendula* var: *carelica* (Mercklin). *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2017, no. 1, pp. 15–24]. DOI: [10.15372/SJFS20170102](https://doi.org/10.15372/SJFS20170102)

13. Носков В.И., Негруцкий С.Ф. К вопросу о происхождении «ведьминых метел» на сосне // Науч. зап. Воронеж. ЛТИ. 1956. Т. 15. С. 207–210. [Noskov V.I., Negrutskiy S.F. To the Issue of the Origin of “Witch’s Brooms” on a Pine. *Nauchnyye zapiski Voronezhskogo LTI*, 1956, vol. 15, pp. 207–210].

14. Состояние окружающей среды и природных ресурсов Нижегородской области в 2009 году: докл. / под общ. ред. Ю.Н. Гагарина, Т.А. Косариковой. Нижний Новгород, 2010. 289 с. Режим доступа: <http://mineco-nn.ru/doklad-sostoyanie-okruzhayushhej-sredy-i-prirodnkh-resursov-nizhegorodskoj-oblasti-v-2009-godu/> (дата обращения 16.01.19). [The State of the Environment and Natural Resources of Nizhny Novgorod Region in 2009: A Report. Ed. by Yu.N. Gagarin, T.A. Kosarikova. Nizhny Novgorod, 2010. 289 p.].

15. Туровцев Я.И. Индукция тератологических уклонений у плодовых растений под влиянием мутагенных факторов // Проблемы онкологии и тератологии растений: итоговый сб. Первого Всесоюз. совещ. по проблемам патологии новообразований у растений [26–28 февр. 1974 г.] / под ред. Э.И. Слепяна. Л.: Наука, 1975. С. 283–287. [Turovtsev Ya.I. Induction of Teratological Deviations in Fruit Plants under the Influence of Mutagenic Factors. *Issues of Oncology and Teratology of Plants: Final Collection of the First All-Union Meeting on the Issues of Tumor Pathology in Plants, February 26–28, 1974*. Ed. by E.I. Slepian. Leningrad, Nauka Publ., 1975, pp. 283–267].

16. Black-Samuelsson S., Andersson S. The Effect of Nutrient Stress on Developmental Instability in Leaves of *Acer platanoides* (Aceraceae) and *Betula pendula* (Betulaceae). *American Journal of Botany*, 2003, vol. 90, iss. 8, pp. 1107–1112. DOI: [10.3732/ajb.90.8.1107](https://doi.org/10.3732/ajb.90.8.1107)

17. Boyce J.S. *Forest Pathology*. New York, McGraw-Hill, 1961. 572 p.

18. Jónsson T.H. Stature of Sub-Arctic Birch in Relation to Growth Rate, Lifespan and Tree Form. *Annals of Botany*, 2004, vol. 94, iss. 5, pp. 753–762. DOI: [10.1093/aob/mch200](https://doi.org/10.1093/aob/mch200)

19. Raatikainen O.J., Taipale H.T., Pelttari A., Lapinjoki S.P. An Electron Microscope Study of Resin Production and Secretion by the Glands of Seedlings of *Betula pendula* Roth. *New Phytologist*, 1992, vol. 122, iss. 3, pp. 537–543. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1992.tb00083.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb00083.x)

20. Rousi M., Tahvanainen J., Uotila I. A Mechanism of Resistance to Hare Browsing in Winter-Dormant European White Birch (*Betula pendula*). *The American Naturalist*, 1991, vol. 137, no. 1, pp. 64–82.

21. Thórsson Æ.Th., Pálsson S., Sigurgeirsson A., Ananthawat-Jónsson K. Morphological Variation among *Betula nana* (Diploid), *B. pubescens* (tetraploid) and Their Triploid Hybrids in Iceland. *Annals of Botany*, 2007, vol. 99, iss. 6, pp. 1183–1193. DOI: [10.1093/aob/mcm060](https://doi.org/10.1093/aob/mcm060)

22. Tinnin R.D., Knutson D.M. *How to Identify Brooms in Douglas-Fir Caused by Dwarf Mistletoe*. Research Note PNW-RN-426. Portland, OR, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1985. 8 p. DOI: [10.2737/PNW-RN-426](https://doi.org/10.2737/PNW-RN-426)

23. Valkama E., Salminen J.-P., Koricheva J., Pihlaja K. Comparative Analysis of Leaf Trichome Structure and Composition of Epicuticular Flavonoids in Finnish Birch Species. *Annals of Botany*, 2003, vol. 91, iss. 6, pp. 643–655. DOI: [10.1093/aob/mcg070](https://doi.org/10.1093/aob/mcg070)

ANOMALIES OF BIRCH (*Betula*) BRANCHING IN PROTECTIVE FOREST BELTS OF HIGHWAYS

A.B. Zakharov, Candidate of Biology; ORCID: [0000-0003-4082-3792](https://orcid.org/0000-0003-4082-3792)

V.P. Besschetnov, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [S-5889-2016](https://orcid.org/S-5889-2016),

ORCID: [0000-0001-5024-7464](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464)

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: alexeinn1@mail.ru, lesfak@bk.ru

A wide range of pollutants can reflect adversely on species of wild flora. Woody species actively accumulate pollutants formed as a result of anthropogenic activities. Birch as a widespread species in protection plantations of highways undergoes a high load. The research purpose is a comparative analysis of morphology of silver birch and its hybrid forms, which suffer from environmental pollution from vehicle emissions; as well as classification of parameters that are not usual for the accepted taxonomic description of the species. Modifications of vegetative organs of silver birch were found along the Nizhny Novgorod – Moscow highway during the research. Morphology of parts and organs of the birch has changed due to the environmental conditions unusual for this species; various morphoses and modifications have appeared. Marked changes in the form of increased whorled shoots, variations in the shape and morphology of leaf laminas, and an increase in thickness and structure of cover tissues were noted. It was found that modified parameters occur according to patterns that depend on the remoteness of plants from the pollution source and the spatial location of their vegetative parts and organs. The revealed regularities can be used in selection of birch resistant to chemical pollution, as well as in improvement of dendroindication methods.

For citation: Zakharov A.B., Besschetnov V.P. Anomalies of Birch (*Betula*) Branching in Protective Forest Belts of Highways. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 95–104. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.95

Keywords: silver birch, morphology, pollutants, plant modifications, variability, dendroindication, protective forest belts.

Поступила 16.01.19 / Received on January 16, 2019

УДК 634.24:58.02/581.192.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.105

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОБЕГОВ *Padus avium* ИЗ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЭКОТОПОВ

Ю.В. Загурская¹, канд. биол. наук; ResearcherID: [M-3233-2014](#),
ORCID: [0000-0001-8101-0945](#)

Т.И. Сиромля², канд. биол. наук; ResearcherID: [W-9101-2019](#),
ORCID: [0000-0002-0155-2283](#)

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН (Институт экологии человека), просп. Ленинградский, д. 10, г. Кемерово, Россия, 650065; e-mail: syjil@mail.ru

²Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН, просп. Академика Лаврентьева, д. 8/2, г. Новосибирск, Россия, 630090; e-mail: tatiana@issa.nsc.ru

Для наиболее рационального применения растительных ресурсов в настоящее время рассматривается возможность производства из древесной массы крон добавок для пищевых продуктов, обогащенных биологически активными веществами, а также комбинированных типов лекарственного растительного сырья. При использовании растений, произрастающих на антропогенно преобразованных территориях, решающими становятся вопросы накопления в них потенциально опасных для человека химических элементов. Изучены закономерности распределения их в плодах, листьях и стеблях *Padus avium* из техногенно нарушенных экотопов на юге Западной Сибири. Содержание химических элементов исследовали методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа после сухого озоления. Элементный химический состав почв исследованных местообитаний характеризуется высокой вариабельностью и отсутствием значимых различий. Количество химических элементов в плодах, листьях и одревесневших стеблях *P. avium* из экотопов с различной степенью техногенной нагрузки статистически значимо не отличается. Относительно стабильное содержание химических элементов в основном характерно для эссенциальных элементов – Ca, K, Mg, P, B, Cu, Zn, а также Pb, Sn, V. Для элементов, в значительной степени связанных с мелкодисперсными почвенными частицами (Al, Cr, Fe, Mn, Na, Sc, Si, Ti), наблюдается высокая вариабельность. Во всех изученных образцах отмечена более высокая концентрация Sr, характерная и для других растений на юге Западной Сибири. В исследованных органах выявлена существенная разница в концентрации химических элементов: минимальное содержание большинства элементов обнаружено в плодах (за исключением B) и стеблях (за исключением Zn), листья содержат в несколько раз больше химических элементов, что может быть связано с более высоким вкладом почвенных частиц. Отсутствие превышения предельно допустимых концентраций по содержанию потенциально опасных элементов и наличие биологически активных соединений в плодах и листьях свидетельствуют о возможности применения древесной массы из крон *P. avium* в пищевой и косметической промышленности в качестве источника биологически активных веществ и натуральных красителей.

Для цитирования: Загурская Ю.В., Сиромля Т.И. Сравнительный анализ элементного химического состава побегов *Padus avium* из техногенно нарушенных экотопов // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 105–114. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.105

Финансирование: Работа выполнена в рамках проектов № 0352-2019-0015 (ЕГИСУ НИОКТР № 171170414100531) и № 0313-2016-0001 (ЕГИСУ НИОКТР № 171170301100781).

Ключевые слова: *Padus avium* Mill., *Prunus padus* L., черемуха, элементный химический состав, органоспецифичность, растительные ресурсы, тяжелые металлы, биогенные элементы, эколого-гигиеническая оценка.

Введение

Черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill., в зарубежной литературе – *Prunus padus* L.) – широко распространенное в умеренной зоне естественных биоценозов лесных и лесостепных регионов древесное растение. Благодаря быстрому росту, высокой газоустойчивости и способности произрастать на бедных почвах [4], она является одной из культур, пригодных для расширения ассортимента кустарниковых пород, биологического этапа рекультивации земель, нарушенных горными работами [7], создания защитных лесополос в большинстве климатических зон России [17, 20], а также озеленения городских территорий [29].

Одна из актуальных проблем лесопользования – накопление запасов древесных отходов, в том числе при кронировании насаждений и рубках ухода, причем известно, что при переработке древесной массы из крон можно получить конкурентоспособную продукцию [1]. Для производства пищевых продуктов, обогащенных биологически активными веществами, предлагается использовать и листья плодовых деревьев [23, 33], в том числе *P. avium* [16]. Ведутся исследования по созданию комплексных и комбинированных типов лекарственного растительного сырья из побегов или цветков (плодов) с листьями древесных растений [10], а также по поиску натуральных красителей для косметической, пищевой и текстильной промышленности не только из плодов, но и листьев черемухи [24]. Следует отметить, что применение разных частей черемухи (плоды, листья, кора) и их сочетание могут обеспечивать различные результаты окрашивания.

Однако при использовании растительных ресурсов, произрастающих на антропогенно преобразованных территориях, зачастую решающими становятся вопросы накопления в них потенциально опасных для человека химических элементов (ХЭ) [28, 30, 34]. Загрязнение растений токсичными элементами и радионуклидами зависит от многих физических, химических и биологических факторов [22], в том числе физиологических и морфолого-анатомических особенностей таксона [21], что делает приоритетным изучение особенностей миграции ХЭ в различных органах и тканях растений, а не только получение фактических данных об их содержании. К потенциально опасным для человека ХЭ относятся не только те, содержание которых нормируется в лекарственном растительном сырье [8] и в биологически активных добавках (БАД) на растительной основе (СанПиН 2.3.2.1078–01) (As, Cd, Hg, Pb), но и ряд жизненно необходимых для организма компонентов (Fe, Cu, Zn, Mo, Cr, Ni) [25].

Несмотря на то, что *P. avium* – ценное пищевое и лекарственное растение, плоды которого включены в Российскую фармакопею [15], особенности элементного химического состава этого вида изучены недостаточно. В литературе приводятся некоторые данные об элементном химическом составе ее листьев [3, 5] и плодов [6, 18], но сведения о сравнительном составе ХЭ в различных органах отсутствуют.

Цель исследования – изучение содержания химических элементов и закономерности их распределения в плодах, листьях и стеблях *P. avium* из техногенно нарушенных экотопов на юге Западной Сибири.

Объекты и методы исследования

Объект изучения – группы по 4–8 плодоносящих (взрослых) растений *P. avium* на Кедровском угольном разрезе (г. Кемерово). Территория

представляет собой ненарушенный лугово-степной участок, расположенный примерно в 50 м от грунтовой дороги; зарастающий отвал угольного карьера (эмбриоземы); овраг под пологом березово-соснового леса, около 20 м от технологической дороги на разрез. Для фоновой территории выбраны земли в окрестностях Кузбасского ботанического сада и в Новосибирском Академгородке, менее 10 м от дороги IV категории. Среди изученных растений *P. avium* встречались как кустарниковые формы, так и низкорослые деревья.

Материал для исследования – зрелые, неповрежденные листовые пластины, плоды и одревесневшие стебли побегов возрастом 2–4 года (далее – стебли) *P. avium*, собранные в июне и июле 2015 г. со средней части (на высоте 1,5...2,5 м над землей) и разных сторон кроны. Каждый образец изучен в 3–5 повторностях. Данные приведены в пересчете на абсолютно сухое вещество.

Элементный химический состав образцов изучали после сухого озоления методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа (дуговой аргоновый двухструйный плазмотрон (Россия); спектрометр PGS-2 (Германия); многоканальный анализатор эмиссионных спектров (Россия)). Концентрацию As и Hg определяли по ГОСТ Р 51766–2001 и ГОСТ Р 53183–2008 (их содержание в пробах оказалось ниже предела обнаружения). В качестве стандартов использовали образцы травяной муки злаковой (гранулированной) (ТМЗг-01) ОСО № 10-176–2011, листа березы (ЛБ-1) ГСО 8923–2007 и элодеи канадской (ЭК-1) ГСО 8921–2007. Полученные результаты определения ХЭ в стандартах укладывались в их аттестованные значения.

Экспериментальные данные статистически обрабатывали с помощью пакета программ Statistica 6.1. Для нормально распределенных (критерий Уилка–Шapiro) однородных (критерий Кохрена) выборок были рассчитаны средние арифметические значения (M), среднеквадратические отклонения (σ), медианы (Med) и выполнен однофакторный параметрический дисперсионный анализ. В остальных случаях были рассчитаны Med и первый–третий квартили (Q_1 – Q_3), статистическую значимость разницы между анализируемыми группами оценивали по критериям Краскела–Уоллиса. Критический уровень значимости (p) во всех случаях принимался равным 0,05. Дополнительно в работе приведены минимальные и максимальные (min – max) значения выборок.

Результаты исследования и их обсуждение

При исследовании элементного химического состава почвенного покрова в местах произрастания *P. avium* каких-либо отличительных особенностей выявлено не было – даже в существенно нарушенных техногенным воздействием экотопах (зарастающие отвалы отработанных угольных карьеров и обочины дорог) валовое содержание и концентрация подвижных форм ХЭ статистически значимо не отличались от фоновых значений, что уже отмечалось и объяснялось ранее [2, 12, 13, 31, 32]. Отсутствие статистически значимых различий и высокая вариабельность элементного химического состава почв соответствующим образом отразились и на растительности.

Несмотря на то, что описанные выше экотопы в значительной степени качественно и количественно отличались по характеру и уровню антропогенного воздействия, статистически значимых отличий в элементном химическом составе исследуемых органов *P. avium*, отобранных на различных участках, выявлено не было. Обобщенные данные представлены в таблице, где ХЭ расположены в порядке уменьшения кларка [9].

Содержание ХЭ в органах *P. avium* на юге Западной Сибири

ХЭ	Кларк*	RP**	M±σ или Med (Q ₁ –Q ₃)		
			Плоды	Листья	Стебли
В процентах масс					
Ca	1,5	1,0	0,4±0,1	3,9±0,5	1,3±0,2
K	1,1	1,9	0,9±0,1	1,6±0,4	0,4±0,1
Mg	0,32	0,2	0,08±0,02	0,46±0,12	0,10±0,01
Si	0,3	0,1	0,022±0,004	0,74±0,19	0,07(0,06...0,12)
P	0,2	0,2	0,18±0,03	0,33±0,09	0,10±0,02
В микрограммах на килограмм					
Na	1200	150	22±6	110(90...220)	65(43–94)
Al	300	80	27±5	780(750...1080)	330(306...363)
Mn	240	200	5(4...24)	250(140...500)	45±14
Fe	200	150	22±6	300(260...580)	147±28
Zn	50	50	8,0±1,4	18,1±2,6	24,0±5,0
Sr	40	50	13(11...23)	170±50	101±29
Ti	32	5	1,9±0,5	37,2±11,1	17,1(16,7...29,1)
B	25	40	41±12	29±4	17±2
Ba	22	40	10±3	88±20	33±10
Cu	10	10	3,8±1,1	5,9±1,1	5,2±1,1
Zr	7,5	0,1	0,8±0,2	3,8±1,1	1,1±3,3
Pb	2,5	1,0	0,09±0,02	0,75±0,23	0,70±0,11
Ni	2,0	1,5	1,0±0,3	2,6±0,5	1,2±0,3
Cr	1,8	1,5	0,23±0,06	1,18(1,09...2,12)	0,55±0,16
V	1,5	0,5	0,19±0,05	1,08±0,27	0,46±0,13
Co	1,0	0,2	0,06±0,01	0,23±0,07	0,10±0,03
Y	0,8	0,2	0,07±0,01	0,49±0,10	0,18±0,05
Mo	0,6	0,5	0,11(0,09...0,19)	0,29±0,03	0,29±0,08
Sn	0,25	0,2	0,5±0,1	1,7±0,4	0,4±0,1
Be	0,10	0,001	0,018±0,003	0,071±0,011	0,028±0,007
Ga	0,05	0,1	0,03±0,01	0,15±0,03	0,06±0,01
Sc	0,008	0,02	0,007(0,004...0,011)	0,092±0,022	0,047(0,028...0,058)
Cd	0,005	0,05	0,19±0,05	0,58±0,17	0,21±0,05
Yb	0,0015	0,02	0,009±0,002	0,054±0,015	0,019±0,005

*В растительности суши [9].

** Reference Plant (обобщенное эталонное растение) [26].

В пробах листьев из Новосибирска было отмечено повышенное содержание олова (Sn), связанное с воздействием Новосибирского оловокомбината [3], при дальнейшей математической обработке полученных результатов эти значения были исключены; в пробах плодов и стеблей подобного явления не наблюдалось.

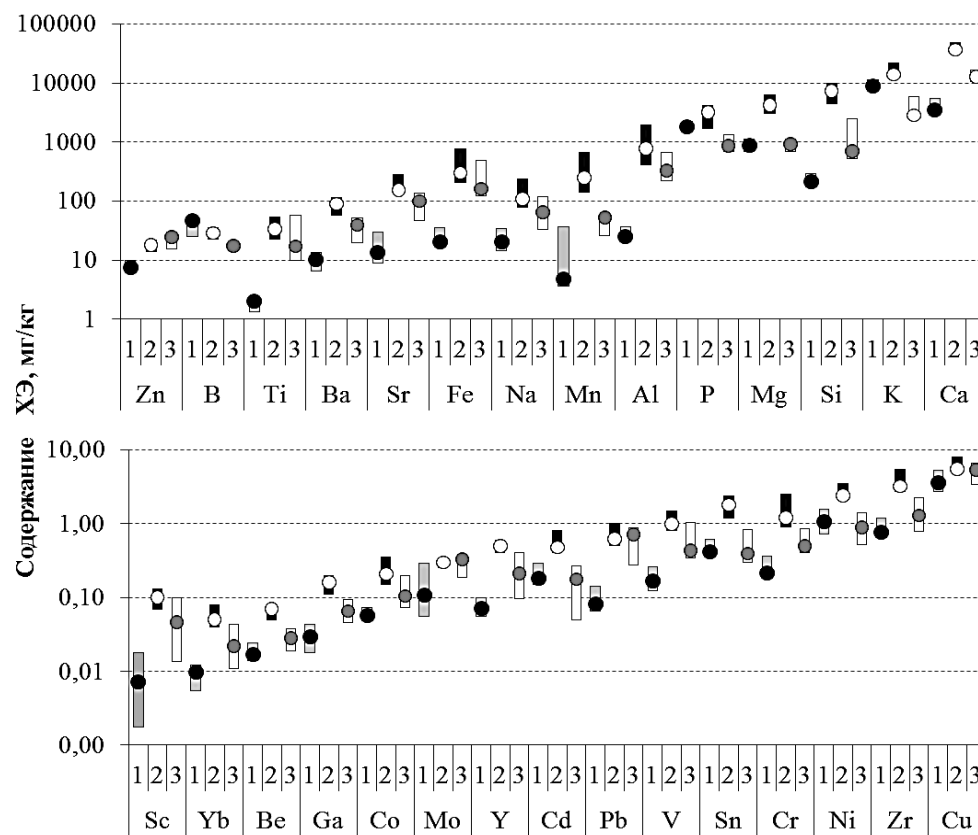
Содержание подавляющего большинства исследованных ХЭ в органах *P. avium* снижается в ряду листья > стебли > плоды, причем разница между листьями и плодами может составлять более одного порядка (Al, Mn, Fe, Cr, V). При этом в плодах было обнаружено наибольшее количество бора (B), в одревесневших стеблях – максимальное количество цинка (Zn), минимальное – двух из основных биофильных элементов: фосфора (P) и калия (K).

В литературе данные об элементном химическом составе *P. avium* практически отсутствуют, что весьма затрудняет проведение сравнительного анализа. Ранее в нашей работе [3] обсуждалось содержание ХЭ в листьях *P. avium*; концентрацию ХЭ в плодах можно сравнить с данными, представленными в монографии Ловковой и др. [6], а также с их количеством в растениях Дагестана [18]. Приведенные в работах [6] и [18] значения очень сходны у всех исследованных ХЭ, кроме бора – 0,90 и 33 мг/кг соответственно, к нашим данным ближе последняя величина. В целом образцы плодов в исследуемом регионе содержат близкие количества Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Ni и Zn, при этом на порядок ниже концентрация Cu, Pb и на два порядка – Co. Учитывая, что в работе [6] указано, что *P. avium* является концентратором Cu и Co (особенно Co), то этот вопрос требует дальнейшего рассмотрения. Намного более высокая (в 10–30 раз) концентрация стронция (Sr) в сибирских растениях связана, скорее всего, с региональными особенностями и уже отмечалась нами ранее для других видов растений, произрастающих на юге Западной Сибири [31].

Наблюдая подобную резкую разницу в элементном химическом составе различных органов растений одного вида, можно предположить, что весьма сложная и неоднозначная картина возникнет при их сравнении с кларками ХЭ в растительности суши и обобщенным эталонным растением (RP) [26], особенно учитывая их резкие отличия по содержанию Na, Ti, Zr, Co, Y, Be, Sc, Cd, Yb. Например, в плодах содержатся относительно близкие к кларкам и RP концентрации K, P, B, Ni и Sn, в листьях – K, Mg, Mn, B и Cr, в стеблях – Ca, Al, Fe, Ba и Sn, а сходные количества Pb, Ni, V, Ga находятся и в листьях, и в стеблях. При этом во всех органах *P. avium* содержится меньше Cu, Zn, Mo, а в стеблях и листьях – больше Sr.

При рассмотрении не только средних значений, но и полного диапазона встречающихся концентраций ХЭ в отдельных органах *P. avium*, весьма четко прослеживается как относительно стабильное содержание ХЭ (в основном макроэлементов и биофилов – Ca, K, Mg, P, B, Cu, Zn, но при этом также Pb, Sn, V), так и их высокая вариабельность (в основном «почвенных элементов», т. е. зачастую связанных с почвенными частицами [19] – Al, Cr, Fe, Mn, Na, Sc, Si, Ti) (см. рисунок).

Влияние мелкодисперсных почвенных частиц на элементный химический состав растений может быть весьма существенным [19] и уже обсуждалось нами ранее при исследовании листьев *P. avium* [3] и других видов растений [11]. Вполне естественно, что среди исследованных органов *P. avium* наибольшей запыленностью будут характеризоваться именно листья. Это подтверждают показатели зольности – (14,3±1,8) % (при (5,1±0,4) % у стеблей и (3,9±0,7) % у плодов), содержание Si (примерно в 10 раз больше, чем в стеблях, и в 35 раз – чем в плодах), хром-никелевое отношение [14], коэффициент обогащения [19] и т. д. Таким образом, необходимо принимать во внимание, что часть ХЭ в листьях *P. avium* может содержаться не в растительных тканях, а находиться на поверхности в составе мелкодисперсных почвенных частиц.



Диапазон концентраций ХЭ в органах *P. avium* на юге Западной Сибири Med (min–max):
1 – плоды, 2 – листья, 3 – одревесневшие стебли

Concentration range of chemical elements ХЭ in organs of *P. avium* in the south of Western Siberia Med (min–max): 1 – fruits, 2 – leaves, 3 – lignified stems

Эколого-гигиеническая оценка всех исследованных органов *P. avium* по требованиям Российской фармакопеи [8] для растительного лекарственного сырья и СанПиН 2.3.2.1078–01 для БАД на растительной основе показала отсутствие превышений допустимых значений (ПДК) содержания нормируемых ХЭ. Учитывая ранее полученные данные о достаточно высоком содержании биологически активных соединений фенольной природы в плодах и листьях [3, 27], применение древесной массы из крон *P. avium* в качестве растительного сырья допустимо.

Заключение

Элементный химический состав побегов *P. avium* (плодов, листьев и одревесневших стеблей) в экотопах с различной степенью техногенной нагрузки статистически значимо не различается. Значительные различия по содержанию ХЭ отмечены для органов: минимальное содержание большинства элементов обнаружено в плодах (за исключением В) и стеблях (за исключением Zn), листья содержат в несколько раз больше ХЭ, что может быть связано с большим вкладом почвенных частиц. Высокая вариабельность в образцах всех исследованных органов характеризует количество элементов, как правило, связанных с мелкодисперсными почвенными частицами, имеющими низкую биодоступ-

ность. Отсутствие превышения ПДК по содержанию нормируемых ХЭ и достаточно высокое содержание биологически активных соединений в плодах и листьях свидетельствуют о допустимости применения растительного сырья древесной массы из крон *P. avium* в пищевой и косметической промышленности в качестве источника биологически активных веществ и натуральных красителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гусева Л.М. Распределение запасов древесных отходов из крон на территории лесного фонда Нижегородской области // Лесн. журн. 2018. № 4. С. 79–86. (Изв. высш. учеб. заведений). [Guseva L.M. Distribution of Reserves of Wood Waste from Crowns in the Forest Fund of the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2018, no. 4, pp. 79–86]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.4.79](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.79); URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/71c/79_86.pdf
2. Динамика экосистем Новосибирского Академгородка / отв. ред. И.Ф. Жимулев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 438 с. [*Dynamics of Ecosystems of Novosibirsk Akademgorodok*. Editor-in-Chief I.F. Zhimulev. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2013. 438 p.].
3. Загурская Ю.В., Коцупий О.В., Сиromля Т.И. Листья *Padus avium* (Rosaceae) из техногенно нарушенных экотопов как источник биологически активных веществ // Растительный мир Азиатской России. 2018. № 4. С. 102–107. [Zagurskaya Yu.V., Kotsupiy O.V., Siromlya T.I. *Padus avium* (Rosaceae) Leaves from the Industrially Disturbed Ecotopes as a Source of Biologically Active Substances. *Rastitel'nyy Mir Aziatskoj Rossii* [Plant Life of Asian Russia], 2018, no. 4, pp. 102–107]. DOI: [10.21782/RMAR1995-2449-2018-4\(102-107\)](https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2018-4(102-107))
4. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002. 707 с. [Koropachinskiy I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of Asian Russia*. Novosibirsk, SB RAS, Geo Branch Publ., 2002. 707 p.].
5. Ларионов М.В. Содержание тяжелых металлов в листьях городских древесных насаждений // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 10. С. 71–75. [Larionov M.V. Heavy Metals Content in Urban Trees Plantation Leaves. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2012, no. 10, pp. 71–75].
6. Ловкова М.Я., Рабинович А.М., Пономарева С.М., Бузук Г.Н., Соколова С.М. Почему растения лечат. М.: URSS, 2014. 288 с. [Lovkova M.Ya., Rabinovich A.M., Ponomareva S.M., Buzuk G.N., Sokolova S.M. *Why Do Plants Treat?* Moscow, URSS Publ., 2014. 288 p.].
7. Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Лесн. журн. 2017. № 3. С. 22–30. (Изв. высш. учеб. заведений). [Merzlenko M.D. Relevant Aspects of Artificial Reforestation. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 22–30]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.3.22](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/620/merzlenko.pdf>
8. ОФС.1.5.3.0009.15. Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах // Гос. фармакопея Российской Федерации. XIV изд. Т. II. М., 2018. С. 2370–2382. [OFS.1.5.3.0009.15. Determination of Heavy Metals and Arsenic in Medicinal Plants and Herbal Medicinal Products. *State Pharmacopeia of the Russian Federation*. Vol. 2. Moscow, 2018, pp. 2370–2382].
9. Романкевич Е.А. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы) // Геохимия. 1988. № 2. С. 292–306. [Romankevich E.A. Living Matter of the Earth (Biogeochemical Sides of the Issue). *Geokhimiya* [Geochemistry International], 1988, no. 2, pp. 292–306].
10. Сагарадзе В.А., Бабаева Е.Ю., Уфимов Р.А., Загурская Ю.В., Трусов Н.А., Коротких И.Н., Маркин В.И., Пещанская Е.В., Можяева Г.Ф., Каленикова Е.И. Содержание флавоноидов в цветках с листьями боярышников (*Crataegus* L.) флоры РФ // Химия

растит. сырья. 2018. № 4. С. 95–104. [Sagaradze V.A., Babaeva E.Yu., Ufimov R.A., Zagurskaya Yu.V., Trusov N.A., Korotkikh I.N., Markin V.I., Peschanskaya E.V., Mozhaeva G.F., Kalenikova E.I. Total Flavonoids in Crataegus «Flowers with Leaves» Raw Material of Russian Flora. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* [Chemistry of plant raw material], 2018, no. 4, pp. 95–104]. DOI: [10.14258/jcprm.2018044039](https://doi.org/10.14258/jcprm.2018044039)

11. Сиромля Т.И. Влияние аэрогенного загрязнения на элементный химический состав растений // Почвы в биосфере: сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 50-летию Ин-та почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, 10–14 сент. 2018 г. Томск: Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2018. Ч. 1. С. 377–381. [Siromlya T.I. Effect of Aerogenic Contamination on the Chemical Elements Composition of Plants. *Soils in Biosphere: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation Dedicated to the Fiftieth Anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS, Novosibirsk, September 10–14, 2018*. Tomsk, TSU Publ., 2018, part 1, pp. 377–381].

12. Сиромля Т.И., Сысо А.И., Загурская Ю.В., Баяндина И.И. Эколого-агрохимическая оценка состава и свойств почв ботанических садов юго-востока Западной Сибири // Агрохимия. 2017. № 10. С. 16–23. [Siromlya T.I., Syso A.I., Zagurskaya Yu.V., Bayandina I.I. Ecological and Agrochemical Evaluation of Composition and Properties of Soils in Botanical Gardens of the South-East of Western Siberia. *Agrokhimiya* [Eurasian Soil Science], 2017, no. 10, pp. 16–23]. DOI: [10.7868/S0002188117100039](https://doi.org/10.7868/S0002188117100039)

13. Сысо А.И. Использование отношения Cr:Ni в мониторинге загрязнения природной среды // Агрохимия. 1998. № 4. С. 76–83. [Syso A.I. Applying of Cr:Ni Ratio for Environmental Pollution Monitoring. *Agrokhimiya* [Eurasian Soil Science], 1998, no. 4, pp. 76–83].

14. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с. [Syso A.I. *Patterns of Distribution of Chemical Elements in the Parent Rock Materials and Soils of Western Siberia*. Novosibirsk, SB RAN Publ., 2007. 277 p.].

15. ФС.2.5.0049.15. Черемухи обыкновенной плоды *Padi avii fructus* // Гос. фармакопея Российской Федерации. XIV изд. Т. IV. М., 2018. С. 6594–6598. [FS.2.5.0049.15. Fruit of Bird Cherry *Padi avii fructus*. *State Pharmacopeia of the Russian Federation*. Vol. 4. Moscow, 2018, pp. 6594–6598].

16. Черных Е.П., Мильшина Л.А., Гоголева О.В., Первышина Г.Г. Влияние экологических факторов и периода вегетации на содержание биологически активных веществ в некоторых видах растительного сырья Красноярского края // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 11. С. 128–131. [Chernykh E.P., Milshina L.A., Gogoleva O.V., Pervyshina G.G. Ecological Factors and Vegetation Period Influence on the Content of Biologically Active Substances in Some Vegetative Raw Material Types in Krasnoyarsk Territory. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2012, no. 11, pp. 128–131].

17. Чибрик Т.С. Основы биологической рекультивации: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 172 с. [Chibrik T.S. *Basics of Biological Recultivation: Educational Textbook*. Yekaterinburg, USU Publ., 2002. 172 p.].

18. Эмирбеков Э.З., Абдуразаков М.А., Исмаилов Х.М. Клинико-фармакологическая характеристика и содержание макро- и микроэлементов в лекарственных растениях Дагестана // Главный врач Юга России. 2007. № 3(11). С. 42–43. [Emirbekov E.Z., Abdurazakov M.A., Ismailov Kh.M. Clinical and Pharmacological Description and Content of Macro- and Microelements in Medical Plants of Dagestan. *Glavnyy vrach Yuga Rossii*, 2007, no. 3(11), pp. 42–43].

19. Bargagli R. *Trace Elements in Terrestrial Plants: An Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery*. Berlin, Springer, 1998. 324 p.

20. Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on Overburden Dumps in the Forest-Steppe and Mountain Taiga Zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, iss. 7, pp. 723–733. DOI: [10.1134/S1064229314050032](https://doi.org/10.1134/S1064229314050032)
21. Buksh E., Malik S.A., Ahmad S.S. Estimation of Nutritional Value and Trace Elements Content of *Carthamus oxyacantha*, *Eruca sativa* and *Plantago ovate*. *Pakistan Journal of Botany*, 2007, vol. 39, iss. 4, pp. 1181–1187.
22. Colle C., Madoz-Escande C., Leclerc E. Foliar Transfer into the Biosphere: Review of Translocation Factors to Cereal Grains. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, vol. 100, iss. 9, pp. 683–689. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2008.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.10.002)
23. Cvetković D., Stanojević L., Zvezdanović J., Savić S., Ilić D., Karabegović I. Aronia Leaves at the End of Harvest Season – Promising Source of Phenolic Compounds, Macro- and Microelements. *Scientia Horticulturae*, 2018, vol. 239, pp. 17–25. DOI: [10.1016/j.scienta.2018.05.015](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.015)
24. Grae I. *Nature's Colors: Dyes from Plants*. New York, Macmillan, 1979. 229 p.
25. Hu Y., Zhou J., Du B., Liu H., Zhang W., Liang J., Zhang W., You L., Zhou J. Health Risks to Local Residents from the Exposure of Heavy Metals Around the Largest Copper Smelter in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 171, pp. 329–336. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2018.12.073](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.073)
26. Markert B. Establishing of 'Reference Plant' for Inorganic Characterization of Different Plant Species by Chemical Fingerprinting. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, vol. 64, iss. 3-4, pp. 533–538. DOI: [10.1007/BF00483363](https://doi.org/10.1007/BF00483363)
27. Poonam V., Raunak V., Kumar G., Reddy L.C.S., Jain R., Sharma S.K., Prasad A.K., Parmar V.S. Chemical Constituents of the Genus *Prunus* and Their Medicinal Properties. *Current Medicinal Chemistry*, 2011, vol. 18, iss. 25, pp. 3758–3824. DOI: [10.2174/092986711803414386](https://doi.org/10.2174/092986711803414386)
28. Rosca C., Schoenberg R., Tomlinson E.L., Kamber B.S. Combined Zinc-Lead Isotope and Trace-Metal Assessment of Recent Atmospheric Pollution Sources Recorded in Irish Peatlands. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 658, pp. 234–249. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.12.049](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.049)
29. Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawronska H., Gawronski S.W. Plant Species Differences in Particulate Matter Accumulation on Leaf Surfaces. *Science of The Total Environment*, 2012, vol. 427-428, pp. 347–354. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2012.03.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084)
30. Shariati S., Pourbabaee A.A., Alikhani H.A., Rezaei K.A. Investigation of Heavy Metal Contamination in the Surface Sediments of Anzali Wetland in North of Iran. *Pollution*, 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 211–224. DOI: [10.22059/poll.2018.257276.438](https://doi.org/10.22059/poll.2018.257276.438)
31. Siromlya T.I. Group Composition Forms of Heavy Metals in the Anthropogen. *Environmental Science*, 2018, vol. 201, art. 012021. DOI: [10.1088/1755-1315/201/1/012021](https://doi.org/10.1088/1755-1315/201/1/012021)
32. Syso A.I., Syromlya T.I., Myadelets M.A., Cherevko A.S. Ecological and Biogeochemical Assessment of Elemental and Biochemical Composition of the Vegetation of Anthropogenically Disturbed Ecosystems (Based on the Example of *Achillea millefolium* L.). *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, vol. 9, iss. 5, pp. 643–651. DOI: [10.1134/S1995425516050164](https://doi.org/10.1134/S1995425516050164)
33. Teleszko M., Wojdyło A. Comparison of Phenolic Compounds and Antioxidant Potential between Selected Edible Fruits and Their Leaves. *Journal of Functional Foods*, 2015, vol. 14, pp. 736–746. DOI: [10.1016/j.jff.2015.02.041](https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.02.041)
34. Wang S., Wang W., Chen J., Zhao L., Zhang B., Jiang X. Geochemical Baseline Establishment and Pollution Source Determination of Heavy Metals in Lake Sediments: A Case Study in Lihu Lake, China. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 657, pp. 978–986. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.12.098](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.098)

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ELEMENTAL CHEMICAL COMPOSITION OF *Padus avium* SHOOTS FROM ANTROPOGENICALLY DISTURBED ECOTOPS

Yu.V. Zagurskaya¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [M-3233-2014](#),
ORCID: [0000-0001-8101-0945](#)

T.I. Siromlya², Candidate of Biology; ResearcherID: [W-9101-2019](#),
ORCID: [0000-0002-0155-2283](#)

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, SB RAS (Institute of Human Ecology), prosp. Leningradskiy, 10, Kemerovo, 650065, Russian Federation; e-mail: syjil@mail.ru

²Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS, prosp. Akademika Lavrent'yeva, 8/2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: tatiana@issa.nsc.ru

In order to use vegetative resources more efficiently nowadays a possibility to produce food supplements enriched with biologically active substances and also combined types of medical plant raw materials from wood pulp of crown is considered. When using plants growing on anthropogenically transformed territories, the issues of accumulation of chemical elements (CE) potentially hazardous for human in them become decisive. There have been studied mechanisms of CE distribution in *Padus avium* fruits, leaves and stems from anthropogenically transformed ecotopes in the south of Western Siberia. The content of CE has been studied by the atomic emission spectrometry after dry ashing. Element chemical composition of soils of studied habitats is characterized by high variability and absence of significant differences. The amounts of CE in fruits, leaves and lignified stems of *Padus avium* from anthropogenically transformed ecotopes with the different degree of environmental footprint do not differ significantly. Relatively stable content of CE is mainly peculiar to the essential elements of Ca, K, Mg, P, B, Cu, Zn and Pb, Sn, V as well. High variability is recorded for CE strongly associated with finely dispersed soil particles (Al, Cr, Fe, Mn, Na, Sc, Si, Ti). Higher concentration of Sr specific to other plants in the south of Western Siberia is observed in all studied samples. A sustainable difference was recorded in CE's concentration in the studied organs. The minimum percentage of the most part of the elements was found in fruits (apart from B) and stems (apart from Zn). Leaves contain several times more CE which may be due to a higher contribution of soil particles. The exceedence absence of maximum permissible concentrations of potentially hazardous CE and presence of biologically active compounds in fruits and leaves indicate the capability of usage crown wood pulp of *P. avium* in food and beauty industries as a source of biologically active substances and natural dyes.

For citation: Zagurskaya Yu.V., Siromlya T.I. Comparative Analysis of the Elemental Chemical Composition of *Padus avium* Shoots from Anthropogenically Disturbed Ecotops. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 105–114. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.105

Funding: The research was carried out within the framework of the projects No. 0352-2019-0015 (EGISU NIOKTR No. 171170414100531) and No. 0313-2016-0001 (EGISU NIOKTR No. 171170301100781).

Keywords: *Padus avium* Mill., *Prunus padus* L., bird cherry, chemical elements composition, organ-specificity, vegetative resources, heavy metals, biogenic elements, ecological-hygienic estimation.

Поступила 29.03.19 / Received on March 29, 2019

UDC [661.12:633.88](045)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.115

PHENOLIC COMPOUNDS IN BARBERRY AND WILD ROSE FRUITS**N.A. Kutakova¹**, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*; ORCID: [0000-0001-8195-2115](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115)**I.A. Morozkova¹**, *Postgraduate Student*; ORCID: [0000-0002-6705-7699](https://orcid.org/0000-0002-6705-7699)**N.N. Vasiljeva¹**, *Candidate of Agriculture, Head of the Laboratory*;ORCID: [0000-0002-7245-8120](https://orcid.org/0000-0002-7245-8120)**I.E. Bashkina²**, *External PhD Student*;**Yu.V. Aleksandrova¹**, *Postgraduate Student*; ORCID: [0000-0002-2802-1124](https://orcid.org/0000-0002-2802-1124)¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: n.kutakova@narfu.ru, i.morozik@live.ru, n.vasiljeva@narfu.ru

²Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, prosp. Vernadskogo, 82, Moscow, 119571, Russian Federation; e-mail: irina.b@bk.ru

The subjects of the study are samples of fruits of several species of barberry and wild rose. The aim of work is studying the chemical composition of phenolic compounds (PC) and comparative assessing the quantitative content of flavonoids as the most valuable PC group in different species of fruits. PC composition research was completed applying HPLC method in reverse-phase mode. Different concentrations of ethyl alcohol were employed to extract flavonoids while determining their total content. The extraction was carried out with the use of three methods: method of infusion (1, MI), in an ultrasonic extractor (2, US) and under the influence of super high frequencies electromagnetic field (3, SHF). Species differences were assessed on UV spectra of the colored complexes of PC extracts with aluminum chloride. 13 PC components content was quantified for fruits collected in 2014–2016. Dominating components were revealed: they are chlorogenic acid and hyperoside. Species of barberry with the most valuable PC sets were determined: Dark purple barberry (*Berberis vulgaris* f. *atropurpurea* Regel), Thunberg barberry (*Berberis thunbergii* DC) – samples of 2015 year of collection, Regel barberry (*Berberis regeliana* Kochne) – those of 2016. The total flavonoids (F) content measured by spectrophotometric method (with quercetin as a reference solution) while extracting them by infusion in three species of barberry fruits varies from 1,30 to 1,41 %. While defining the optimum extraction method maximum extent of F extraction from barberry fruits reached 39%, from wild rose fruits – 51,5 % (SHF-extraction). According to the results of the research there are recommendations given on using extracts as substances for producing medical and pharmaceutical herbal remedies and food additives with antioxidant properties.

For citation: Kutakova N.A., Morozkova I.A., Vasiljeva N.N., Bashkina I.E., Aleksandrova Yu.V. Phenolic Compounds in Barberry and Wild Rose Fruits. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 115–124. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.115

Keywords: extractives, phenolic compounds, flavonoids, UV spectra, HPLC (High performance liquid chromatography), quercetin, rutin.

Introduction

During the past 10 years Russian and foreign scientists have actively been exploring biologically active substances (BAS) of plants including phenolic compounds (PC), improving the methods of their extraction from vegetable raw materials and broadening the spheres of their application in different industries (food, medical, pharmaceutical, cosmetic) [7, 11, 19]. Interest to phenolic compounds is not occasional, it can be explained by the wide range of their biological activity and low toxicity (except phenol itself) [1].

PC of medical raw materials, fruits and berries include mainly hydroxybenzoic, hydrocinnamic acids (phenolic acids) and their derivatives; flavonoids and glycosides which aglycons are subdivided into flavones, isoflavones, flavanols, flavanones, flavanonols, flavans, flavan-3,4-diols and catechins and proanthocyanidins as well. All PC have aromatic (benzoic) nucleus with hydroxyl group in the molecule [3, 19, 20].

Chromatographic methods are employed to explore PC [7, 9, 14, 17]. Flavonoids quantification is completed applying spectrophotometric method [6, 8, 18]. Different methods such as sorption combined with flash-chromatography are used to purify PC [16].

Objects and Methods of Research

Objects of research are samples of three species of barberry fruits that are grown in NARFU's Dendrological Garden and were collected for three years from the same bushes in autumns (years 2014, 2015, 2016). All the fruits correspond to the type morphological features considered. Samples of two species of wild rose (rose) fruits were explored: those of the hybrid species (*Rosa hybrida*) grown in the Dendrological Garden (2 samples) and forest one (*Rosa canina* L.) (1 sample) laid in in the Primorsky district of the Arkhangelsk region. The samples were collected in September 2016. All the samples were refrigerated, stored at the temperature of 18 °C above zero, reduced to the fragments of the same size before exploring.

40 %, 70 % and 96 % concentrations of ethyl alcohol (EA) were used in order to extract flavonoids (F) in the process of determining their total content. The extraction was carried out applying three methods: infusion at the boiling point of the extragent (MI), in an extractor with ultrasound treatment in pulsating mode at a frequency of 27 kHz at a temperature of 70 degrees above zero and under the influence of the super high frequencies (SHF) electromagnetic field at short-term boiling of the extract. Such a choice of extraction methods is due to the elaboration of recommendations on express-method of F extraction. Extraction terms correspond to the literary data, for instance, to the method used to extract polyphenols from rose, described in [4].

F quantitation is based on the formation of colored F complexes with aluminum chloride III and comparison of their colorings with the coloring of standard quercetin and rutin samples in similar conditions [11, 12]. For quercetin: working solution contained 2,5 ml of extract, 5 ml of 2 % AlCl₃ and 17,5 ml of 96 % EA. Reference solution – 2,5 ml of extract and 22,5 ml of EA without diluting. For rutin: working solution – 5 ml of extract, 1 ml of 2 % AlCl₃, 1 drop of glacial acetic acid and 19 ml of 70 % EA. Reference solution – 5 ml of extract and 20 ml of 70 % EA without diluting.

UV-spectra of barberry and wild rose fruits extracts were obtained on the spectrograph model Unico 2800 UV/Vis in the range of 200–500 nm.

Chromatographic analysis of the fruits on 13 components was conducted with the use of HPLC system LC-30 «Nexera» (Shimadzu, Japan) in reverse-phase mode with the column Zorbax SB-Aq (Agilent, USA), particle size 3,5 mcm, size 150×3,0 mm. Volume of the sample injected into the column – 5 mcl, eluent flow-rate – 0,7 ml/min. Thermostat temperature – 40 °C above zero. Detection was carried out at a wavelength 280 nm. Managing chromatograph, collecting and processing the information included the use of software LabSolutions.¹

Water with 0,5 % formic acid (solution A) and acetonitrile with 0,5 % formic acid (solution B) were used as eluent for chromatographic division. Gradient elution

¹ Analyses completed in the Shared Use Equipment Center “Arktika” for Collective Usage of NARFU

was conducted according to the following program: 0-20 min – 5 % B, 25-30 min – 20 % B, 35 min – 40 % B. Total analysis time – 35 min.

Extractions obtained by the method of infusion of fruits reduced to fragments with 96 % EA were used for HPLC analysis. Preventive calibration of the mixed-standard PC solution in methanol was conducted. Limits of spotting were set to the level 0,01...0,05 and detection limits were in general from 0,05 to 0,10 mg/ml. Standards of the company «Sigma-Aldrich» with content of main substance not less than 97 % were conformed to. PC analytes choice is completed according to the literary data of the barberry, wild rose and other bushes fruits chemical composition [13]. An example of an extraction chromatogram of barberry fruits is given in the fig. 1, wild rose fruits – in the fig. 2.

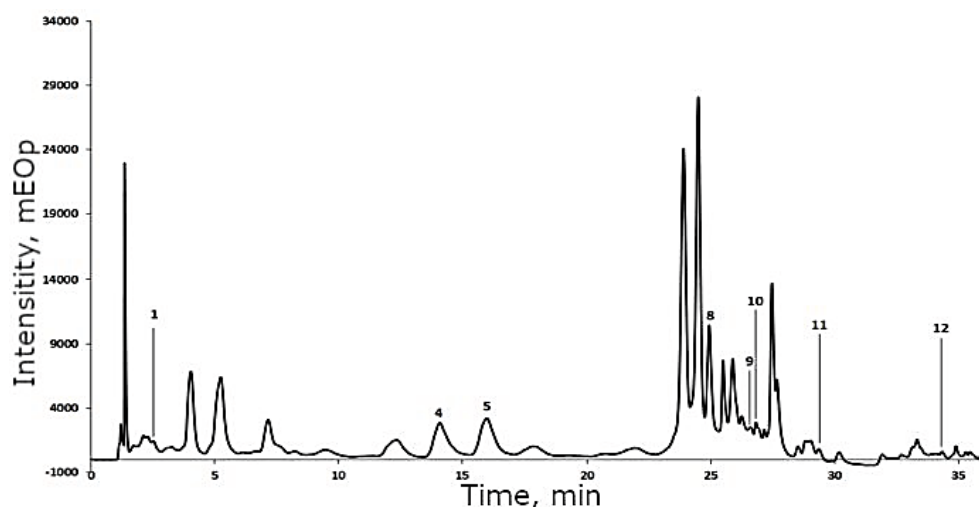


Fig. 1. Barberries extract chromatogram: 1-gallic acid, 4-chlorogenic acid, 5-epicatechin, 8-ferulic acid, 9-rutin, 10-hyperoside, 11-hesperidin, 12-quercetin

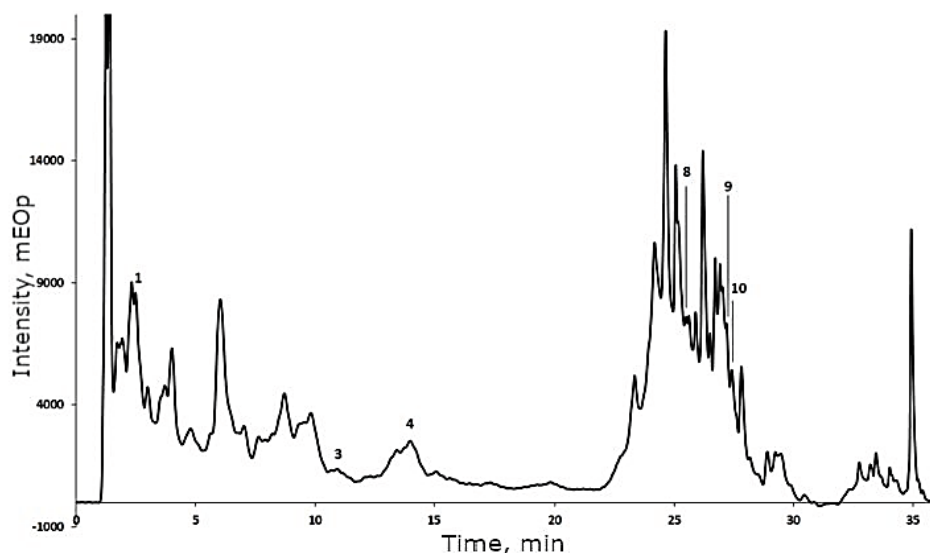


Fig. 2. Wild rose hips extract chromatogram: 1-gallic acid, 3-caffeic acid, 4-chlorogenic acid, 8-ferulic acid, 9-rutin, 10-hyperoside

RESULTS OF RESEARCH AND DISCUSSION

The majority of detectable components in different quantities are present in the fruits of Thunberg, Regel and Dark purple barberry of 2014 and 2015 years of collection, the total content of the components is shown in the table 1. Quantitation of PC content in the material is completed regarding the humidity of the fruits and the concentration of obtained extracts extractives considered. PC content barberry, wild rose hybrid and forest fruits of 2016 year of collection is shown in the table 2.

Table 1

PC content in barberry fruits of 2014-2015 years of collection, g/kg

Component	Thunberg barberry 2014	Regel barberry 2015	Dark purple barberry 2015
Gallic acid	0,024	0,085	0,109
Vanillic acid	*	–	–
Caffeic acid	0,481	1,067	0,913
Chlorogenic acid	50,714	72,990	120,737
Epicatechin	3,460	–	6,608
Syringic acid	–	–	–
Coumarin	0,730	2,218	2,851
Ferulic acid	0,319	0,376	3,574
Rutin	0,069	0,204	1,808
Hyperoside	0,815	8,696	10,455
Hesperidin	0,440	0,620	0,921
Quercetin	0,226	-	-
Luteolin	0,177	0,226	0,061

*Below detection limits.

In barberry fruits extracts chlorogenic acid is dominating, it exceeds 1-2 times other phenolic acids content (up to 120 g/kg). In flavonoids group hyperoside and rutin (both refer to glycosides) prevail in quantity reaching up to 10 g/kg. Species diversity of barberry based on PC composition in fruits becomes apparent both from the set of the components and from their quantity. Content of chlorogenic acid, epicatechin, caffeic acid in dark purple barberry fruits is at least twice higher than their content in Thunberg barberry fruits. Rutin, hyperoside, ferulic acid, coumarin content differences in fruits of these two types of barberry are shown even clearer. Regel barberry fruits contain more than 1g/kg of caffeic acid and flavonoid luteolin. Luteolin is one of the most effective anticarcinogenic agents [19].

A high content of chlorogenic acid and hyperoside was also noticed in barberry fruits collected in 2016, vanillic and syringic acids are absent. In these samples contrary to those of 2014-2015, ferulic acid, epicatechin, coumarin, hesperidin are absent, content of quercetin is lowered against the background of increasing in gallic and caffeic acids content.

Phenolic compounds set in wild rose fruits corresponds to the one in barberries. In the group of phenolic acids chlorogenic and gallic acids were detected in quantities from 0,43 to 4,21 g/kg, while other acids content remained under 0,10 g/kg; hyperoside prevails in the group of flavonoids. Significant differences between explored samples on the grounds of quality and quantity content were not revealed, but forest wild rose hyperoside content is twice higher. In the work [2] there are results presented that confirm species differences in BAS substances in wild rose fruits.

Table 2

PC content in barberry and wild rose fruits of the year 2016, g/kg

Component	Barberry			Rose		
	Thunberg	Regel	Dark-purple	Hybrid 1	Forest	Hybrid 2
Gallic acid	0,801	1,518	1,100	0,636	0,434	0,698
Vanillic acid	–	–	–	–	–	–
Caffeic acid	2,010	2,798	1,280	0,052	0,106	0,069
Chlorogenic acid	110,95	127,27	112,963	4,211	0,858	1,891
Epicatechin	–	–	–	–	–	–
Syringic acid	–	–	–	–	–	–
Coumarin	–	–	–	–	–	–
Ferulic acid	–	–	–	0,021	–	0,021
Rutin	0,062	0,281	2,641	0,091	0,075	0,333
Hyperoside	4,182	16,545	7,784	0,618	1,298	0,329
Hesperidin	–	–	–	–	–	–
Quercetin	0,059	0,020	0,148	0,008	0,412	–
Luteolin	0,024	–	0,063	–	–	–

Phenol carboxylic acids including gallic, vanillic, syringic acids are widely spread in plants [17], particularly as a component of tannins. The majority of acids refer to phenolic compounds of C_6-C_1 structure, are contained in plant tissues in bound form and are released after hydrolysis. Gallic acid is capable of self-condensation and forms depsides (esters) [20]. High biological activity, antiseptic and keratolytic properties are typical for all representatives of hydroxycinnamic acids. They have tonic, immunostimulating, anti-inflammatory, choleric, antiallergic, vasodilatory and antioxidant impact on organism [10]. Caffeic and chlorogenic acids are the most vivid representatives of cinnamic acids [20]. Peculiarity of caffeic acid is its capability to form esters [14]. Analyzed barberry samples correspond to the literary data [5] caffeic acid content compared, are in the lead chlorogenic acid content compared.

Considering PC of $C_6-C_3-C_6$ structure (flavonoids) and their glycosides quercetin should be noted as one of the most wide spread flavanols as well as quercetin glycoside rutin (3-rutinoside quercetin) [20]. Namely these substances are used as standards when determining total F content in flowers and fruits of different plant species [9]. F have crucial properties: antitumor and anti-inflammatory effects, ability to reduce the risk of ischemia and blood clots [18].

BAS of phenolic content have antidepressant and anti-inflammatory effect that is why they are widely used in pharmacology [6, 8]. Particularly barberry and wild rose fruits show physiological activity of such action spectrum.

Barberry fruits are not included in Pharmacopoeia, therefore F total content was determined by available spectrographic method (quercetin was used as a standard) [13]. The method is based on the methods of detecting flavonoids in haws described in GOST 3852–93 [21].

As it is known, EA of different concentrations can be used to extract F. We were using 96 % EA to quantify F total content in fruits. To define optimum extraction method 40 % and 70 % concentrations of EA were used as the most widespread ones to make potions in pharmaceuticals. Extraction duration is accepted to be 120 min

for MI, US and 5 min for SHF extraction basing on the results of previously conducted experiments. Results of F quantitation in several samples of fruits and their extracts received by different methods with quercetin as a standard reference sample are presented in the table 3 (% from a. d. r. m.). Sample choice for research is connected with the results of phenolic compounds detection (tables 1, 2).

Table 3

Flavonoids content in barberry and wild rose fruits and in their extracts

Species	Fruits	Extracts obtained in conditions			
		SHF, 40 % EA, 5 min	SHF, 70 % EA, 5 min	US, 70 % EA, 120 min	MI, 70 % EA, 120 min
Regel barberry, year 2015	1,32	0,41	0,17	0,23	0,24
Dark purple barberry, year 2015	1,30	0,51	0,36	0,53	0,43
Regel barberry, year 2016	1,41	–	0,61	0,54	0,45
Forest wild rose, year 2016	1,36	–	0,70	0,49	0,36

F total content in barberry fruits fluctuates from 1,30 to 1,41%. In extracts F content composes from 0,17 to 0,61 % counting from a. d. r. m. Extraction extent of all extraction variants does not exceed 39 %. F extraction from rose fruits by US treatment was more effective than by infusion method and SHF. For Regel barberry and forest rose fruits SHF method with 70 % EA on the contrary showed the best results. Extent of F-extraction from rose fruits SHF-method applied is 51,5 %. This result is indicative of the prospects of short term SHF-extraction realization in order to extract PC. Difference in F output from different species of barberry fruits is not significant. Years of collection compared, 2016 was more favorable for F biosynthesis, their content increased.

Obtained spectra of colored products are depicted in fig. 3,4. Peaks of UV-spectra of colored complexes of extracts of barberry fruits with aluminum chloride III with quercetin as a standard are situated mainly in diapason 350-365 nm which is typical exactly for flavonoids (fig. 3), species differences are displayed by peaks displacement. Optical density of Regel barberry fruits and Dark purple barberry fruits extracts obtained by infusion method is much higher than other barberry species fruits extracts optical density (fig. 3, a).

UV-spectra of barberry and rose fruits of 2016 year of collection extracts were obtained with 2 reference solutions: quercetin and rutin. Peaks of UV-spectra of colored extract products are also situated in the diapason typical exactly for flavanoids (fig. 4).

Peak of 355 nm and wide peak in the diapason 410–455 nm were revealed in reference solution spectrum of rutin (not shown). In the fig. 4, a spectra peaks of Dark purple barberry fruits extracts – 350, Regel barberry – 350, Thunberg barberry – 360 nm, i.e. in the same diapason. Those for extract spectra of wild rose hybrid (1) – 280, hybrid (2) – 275 and wild rose forest – 260 nm (fig. 4, a). Peak in reference solution spectrum of quercetin – 350 nm, it is low and smooth. For forest wild rose fruits extracts for the same standard spectra peaks are 325 nm (MI) and 325 nm (US) (fig. 4, b). For Regel barberry fruits extracts spectra – 340 nm (MI) and 340 nm (US) (not shown).

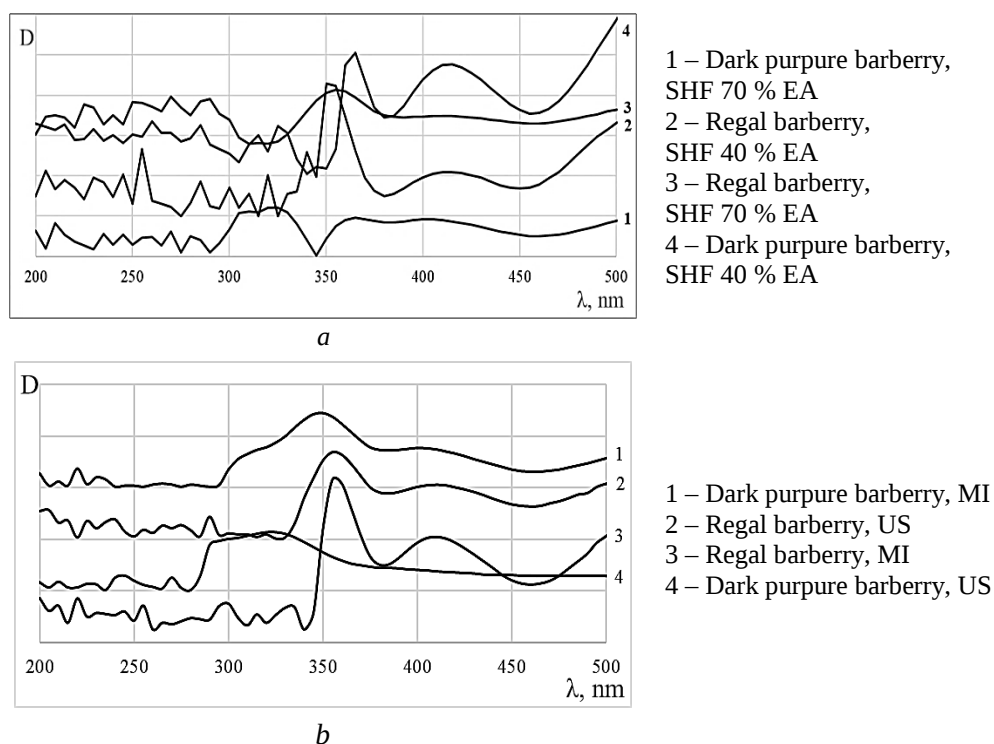


Fig. 3. Spectra of barberry fruits extracts with AlCl_3 obtained in different extraction conditions: SHF, 40 and 70 % EA (a); MI и US, 70 % EA (b)

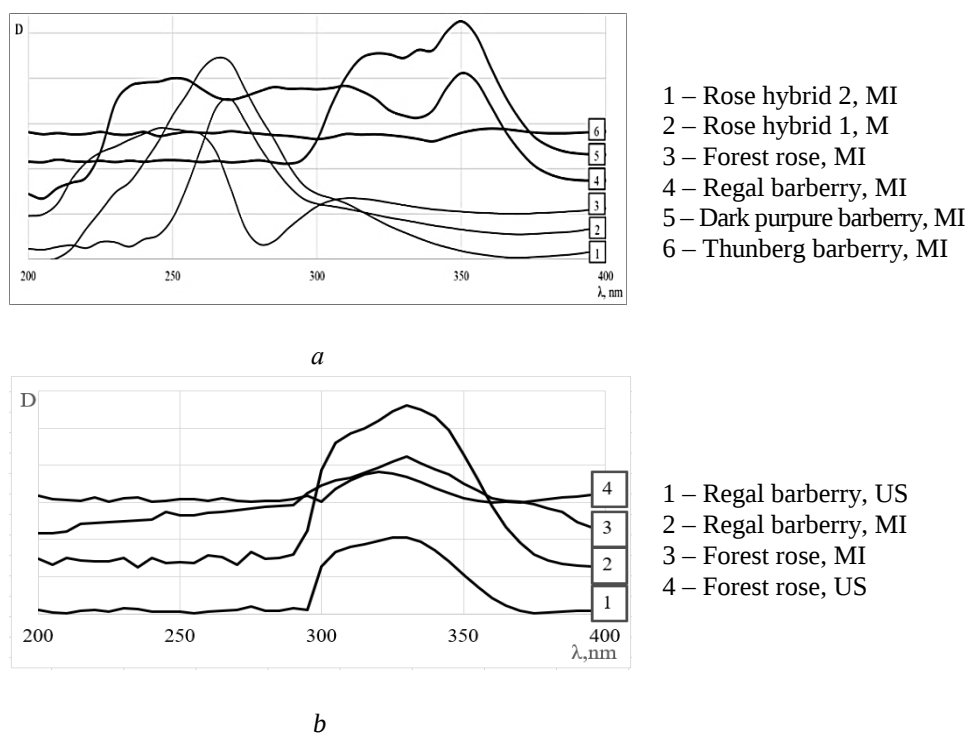


Fig. 4. Spectra of barberry and rose fruits extracts obtained with AlCl_3 with different reference solutions: rutin (a); quercetin (b)

Considering the spectra the following conclusion can be made. To determine total flavanoids content in terms of rutin the recommended interval is $\lambda_{\max}$ 320–330 nm. For the extracts which maximum absorption is in the diapason 325–415 nm, quercetin should be used as a standard.

While studying flavonoids method of qualitative reactions with different reagents was approbated [11,12]. Qualitative color reactions show the presence of certain flavonoids groups. Basing on the results of these qualitative reactions the conclusion comes that main flavonoid groups (flavanols, flavanones, flavones, anthocyanin pigments, chalcones or aurones, anthocyanins, leucoanthocyanidins, catechins) are present in all samples explored. The only difference is in the catechins presence in Thunberg barberry and dark-purple barberry collected in 2015, 2016.

Conclusion

Biologically active substances are vital and necessary compounds, each of them plays irreplaceable and very important role in the organism's lifecycle. It is a scientific fact that barberry and wild rose fruits grown in the north are rich in chlorogenic acid and flavones. Spectrophotometric method of flavonoids total content detection in fruits should be applied only with the standard substance of which is dominating in phenolic compounds. It was revealed that dark-purple and Regel barberry fruits are of maximum valuable components content, they should be recommended to be spread in the north conditions. Obtained extracts can be used as pharmaceutical substances or food additives with antioxidant properties.

REFERENCES

1. Averianova E.V. Shkolnikova M.N. *Physiologically Active Substances of Vegetable Raw Materials*. Biysk, Altay.GTU Publ., 2010. 105 p.
2. D'Angiolillo F., Mammano M.M., Fascella G. Pigments, Polyphenols and Antioxidant Activity of Leaf Extracts from Four Wild Rose Species Grown in Sicily. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2018, vol. 46, iss. 2, pp. 402–409. DOI: [10.15835/nbha46211061](https://doi.org/10.15835/nbha46211061)
3. Buchanan B., Gruissem W., Jones R. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. 2nd edition. Wiley, 2015. 1283 p.
4. Choi J.K., Lee K.H., Lee Y. B. Im H.C., Kim Y.B., Choi E.K., Joo S.S., Jang S.K., Han N.S., Kim C.H. Extraction Conditions for Phenolic Compounds with Antioxidant Activities from White Rose Petals. *Journal of Appl. Biol. Chemistry*, 2015, vol. 58, iss. 2, pp. 117–124. Available at: <https://doi.org/10.3839/jabc.2015.021>
5. Deineka V.I., Khlebnikov V.A., Sorokopudov V.N., Anisimovich I.N. The Chlorogenic Acid in Fruits and Leaves of Some Plants of the Family BERBERIDACEAE. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2008, no. 1, pp. 57–61.
6. *European Pharmacopoeia 7.0*. Strasbourg: Council of Europe, 2007. 2 vol. 3308 p. Available at: <https://www.worldcat.org/title/european-pharmacopoeia/oclc/170932841> (accessed 11.02.2018).
7. *Phenolic Compounds: Fundamental and Applied Aspects*. Ed. by N. Zagorskina, E. Burlakova. Moscow, Nauchnyy Mir Publ., 2010. 400 p.
8. *RF State Pharmacopoeia. 13th edition. Vol. I-III*. Moscow: Medgiz, 2015. (GF 13 online). Available at: <http://femb.ru/femb/> (accessed 01.02.2019).
9. Heim K.E., Tagliaferro A.R., Bobilya D.J. Flavonoid Antioxidants: Chemistry, Metabolism and Structure-Activity Relationships. *Journal of Nutr. Biochemistry*, 2002, vol. 13, p. 572.
10. Kirina I.B., Ivanova I.A., Samigullina N.S. *Medical Gardening: Textbook*. Michurinsk State Agrarian University Publ., 2014. 182 p.

11. Korulkin D.Y., Abilov Z.A., Muzychkina R.A., Tolstikov G.A. *Natural Flavonoids*. Novosibirsk, Teo Publ., 2007. 232 p.
12. Kutakova N.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B., Koptelova E.N., Korovkina N.V. *Laboratory Workshop on the Technology of Biologically Active Substances and Carbon Adsorbents: Part 2. Analysis of Biologically Active Substances*: Textbook. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 114 p.
13. Lobanova A.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V. Investigation of Biologically Active Flavonoids in Extracts from Plant Raw Materials. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2004, no. 1, pp. 47–52.
14. Petersen M., Simmonds M.S.J. Rosmarinic Acid. Molecules of Interest. *Phytochemistry*, 2003, vol. 62, p. 121.
15. Petrik V.V., Drozdov I.I., Vasilyeva N.N., Kutakova N.A. Biologically Active Substances Content in Fruits of Different Barberry Species Grown in The European North Conditions. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2012, no. 5, pp. 57–71.
16. Pitsyn A.V., Kaplun A.P., Mukhtarov E.I., Shvets V.I. Extraction and Purification of Anthocyanins from Grape *Vitis vinifera* L. of Isabella Sort. *Biotekhnologiya* [Biotechnology], 2007, no. 2, pp. 13–20.
17. Robbins R.J. Phenolic Acids in Foods: An Overview of Analytical Methodology. *Journal of Agric. Food Chemistry*, 2003, vol. 51, p. 2866–2887.
18. Silva B.A., Malva J.O., Dias A.C.P. St. John's Wort (*Hypericum perforatum*) Extracts and Isolated Phenolic Compounds are Effective Antioxidants in Several *in vitro* Models of Oxidative Stress. *Food Chemistry*, 2008, vol. 110, p. 611.
19. Tarahovskii Y.S., Kim Y.A., Abdrasilov B.S., Musafarov J.N. *Flavanoids: Biochemistry, Biophysics, Medicine*. Pushchino: Synchrobook Publ., 2013. 310 p.
20. Zaprometov M.N. *Basis of Phenolic Compounds Chemistry*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974. 214 p.
21. GOST 3852–93. *Fruits of Hawthorn. Specifications*. Moscow, Standard Publishing House, 2003. 13 p.

ФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПЛОДОВ БАРБАРИСА И ШИПОВНИКА

Н.А. Кутакова¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: [0000-0001-8195-2115](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115)

И.А. Морозкова¹, аспирант; ORCID: [0000-0002-6705-7699](https://orcid.org/0000-0002-6705-7699)

Н.Н. Васильева¹, канд. с.-х. наук, зав. лаб.; ORCID: [0000-0002-7245-8120](https://orcid.org/0000-0002-7245-8120)

И.Е. Баикина², соискатель;

Ю.В. Александрова¹, аспирант; ORCID: [0000-0002-2802-1124](https://orcid.org/0000-0002-2802-1124)

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: n.kutakova@narfu.ru, imorozik@live.ru, n.vasiljeva@narfu.ru

²Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, просп. Вернадского, д. 82, Москва, Россия, 119571;

e-mail: irina.b@bk.ru

Предметом исследования являются образцы плодов барбариса и шиповника (розы) нескольких видов. Цель работы – изучение состава фенольных соединений и сравнительная оценка количественного содержания флавоноидов как наиболее ценной группы фенольных соединений в плодах растений различных видов. Исследования выполнены методом ВЭЖХ в обращенно-фазовом режиме. Для извлечения флавоноидов при определении их суммарного содержания использовали этиловый спирт различной концентрации. Экстракция проведена тремя методами: методом настаивания, в экс-

тракторе с обработкой ультразвуком и под воздействием электромагнитного поля сверхвысоких частот. Оценка видовых различий выполнена по УФ-спектрам окрашенных комплексов фенольных соединений экстрактов с хлоридом алюминия. Определено количественное содержание 13 компонентов фенольных соединений в плодах, собранных в 2014–2016 гг. Выявлены доминирующие компоненты – хлорогеновая кислота и гиперозид. Установлены виды барбариса с наиболее ценным набором фенольных соединений в плодах: барбарис темно-пурпуровый (*Berberis vulgaris* f. *atropurpurea* Regel) и барбарис Тунберга (*Berberis thunbergii* DC) – образцы 2015 г., барбарис Регеля (*Berberis regeliana* Kochne) – 2016 г. сбора. Суммарное содержание флавоноидов, определенное спектрофотометрическим методом (раствор сравнения – кверцетин) при их извлечении методом настаивания, составляет от 1,30 до 1,41 %. Максимальная степень извлечения флавоноидов из плодов барбариса наиболее эффективным методом составила 39,0 %, из плодов шиповника – 51,5 % (СВЧ-экстракция). На основании полученных данных подготовлены рекомендации по использованию экстрактов в качестве субстанций для получения фармацевтических фитопрепаратов и пищевых добавок с антиоксидантными свойствами.

Для цитирования: Kutakova N.A., Morozkova I.A., Vasilieva N.N., Bashkina I.E., Aleksandrova Yu.V. Phenolic Compounds in Barberry and Wild Rose Fruits // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 115–124. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.115

Ключевые слова: экстрактивные вещества, фенольные соединения, флавоноиды, УФ-спектры, ВЭЖХ, кверцетин, рутин.

Поступила 11.02.19 / Received on February 11, 2019



ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*228.7:62.7

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА ПОДБОРА СИСТЕМЫ МАШИН ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИЙ*Р.В. Воронов¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [D-7841-2014](#),**ORCID: [0000-0003-0104-6409](#)**О.Б. Марков¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: [0000-0002-2467-9607](#)**И.В. Григорьев², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](#),**ORCID: [0000-0002-5574-1725](#)**А.Б. Давтян³, аспирант; ORCID: [0000-0002-4175-7996](#)*¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: rvoronov@petsu.ru, markovob@yandex.ru²Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru³Братский государственный университет, ул. Макаренко, д. 40, г. Братск, Иркутская область, Россия, 665709; e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru

Лесные плантации успешно создаются и эксплуатируются во многих странах с середины прошлого века. Более 50 % всей заготавливаемой и перерабатываемой древесины в мире является продукцией целевого лесовыращивания, созданной на лесных плантациях. В Российской Федерации в результате многолетнего, экстенсивного лесопользования, несмотря на огромные лесные запасы и далеко не полное использование расчетной лесосеки, лесоперерабатывающие предприятия начинают ощущать нехватку сырья. Стоимость древесного сырья постоянно растет, что связано с повышением ставок платы за лес на корню, увеличением расходов на эксплуатацию и обслуживание лесных машин импортного производства, ростом курсов доллара и евро. Прежде всего начинающийся сырьевой голод лесоперерабатывающих предприятий и рост стоимости древесного сырья обусловлены постепенным истощением доступных эксплуатационных спелых лесов. При этом среднее расстояние вывозки заготавливаемой в естественных лесах древесины постоянно растет, ежегодно увеличиваются затраты на создание и эксплуатацию лесовозных дорог, а длительный оборот рубки, особенно хвойных пород, усугубляет складывающуюся ситуацию. Одной из проблем, препятствующих в настоящее время эффективному созданию лесных плантаций, является отсутствие в нашей стране научно обоснованной системы машин, способной выполнять весь цикл работ, начиная с посадки (посева) древесных растений и заканчивая сбором древесного урожая и подготовкой территории под новую сукцессию. Очевидно, что данная система машин должна базироваться на модульном принципе построения, включать возможный минимум машин и механизмов, иметь высокий коэффициент технической готовности и низкие удельные эксплуатационные затраты. В статье приведена математическая модель, основанная на модульном принципе подбора системы машин для лесных плантаций.

Для цитирования: 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 // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 125–134. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

Ключевые слова: лесные плантации, системы машин, модульный принцип построения систем машин.

Введение

В мире потребность в древесном сырье удваивается каждые 25 лет. С середины прошлого века все больше древесины выращивается с использованием плантационного лесоводства [12, 22–36].

В Лесном кодексе Российской Федерации (РФ) записано, что лесные плантации могут создаваться на землях лесного фонда и землях иных категорий [13]. Российское лесное законодательство не содействует появлению плантационного лесовыращивания на землях лесного фонда. Например, нельзя сокращать оборот рубки даже в случае целевого выращивания быстрорастущих форм и клонов лесных культур. Лесотехнические регламенты не позволяют высаживать на землях лесного фонда породы по выбору производителя [4].

В РФ существует большое количество земель сельскохозяйственного назначения, в разное время выведенных из хозяйственного оборота, зарастающих кустарниками и малоценными породами деревьев [1]. Причем эти земли зачастую имеют развитую сеть дорог и находятся близко к потребителям древесины. Лесные плантации являются наиболее перспективным путем повышения эффективности лесного комплекса РФ наряду с разработкой и внедрением новых технологий и оборудования для заготовки и переработки древесины. Однако практически полное отсутствие лесных плантаций в стране свидетельствует о том, что требуется решить ряд законодательных, технических и технологических вопросов для создания условий, стимулирующих их появление.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в России отсутствует научно обоснованная система машин для плантационного лесоводства.

Цель исследования – разработка математической модели модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций.

Объекты и методы исследования

Существуют различные виды классификации лесных плантаций по циклам созревания (оборотам рубки) [5, 12, 20]. Ориентировочно плантации можно разделить на коротко- (менее 20 лет), средне- (20–50 лет) и длинноточные (более 50 лет) [11]. Энергетические плантации, которые относятся к короткоцикловым, могут быть классифицированы на мини (возраст рубки 1–3 года), миди (4–9 лет), короткие (10–15 лет), средние (16–20 лет), длинные (20–25 лет) [2].

Отсутствие в стране научно обоснованной системы машин, способной выполнять весь цикл операций, начиная с подготовки участка и посадки и заканчивая сбором урожая и очисткой плантации под новую сукцессию, является большой проблемой при оценке эффективности процесса лесопользования при плантационном лесовыращивании [5].

Существуют различные пути выбора критериев эффективности для систем машин. Один из них – анализ энергозатрат [6, 8, 21]. Ю.А. Ширниным был предложен набор сменяемых за короткое время энергетических, технологических модулей и разработана методика анализа энергозатрат при проведении лесосечных работ с использованием адаптивно-модульных систем машин. Модульная система машин рассматривается и в работах Е.М. Онучина [19].

Другой путь – экономический, критерием эффективности эксплуатации лесной плантации в этом случае, как и любого коммерческого предприятия, является прибыль – разница между затратами на производство и суммарными доходами [14].

Требуется создать систему принятия решений, позволяющую подбирать агрегаты для эксплуатации плантации лесных древесных пород таким образом, чтобы при завершении цикла выращивания иметь максимальную прибыль. Задача заключается в подборе такой технологии, которая после продажи урожая позволит получить не только средства на покрытие эксплуатационных расходов при выращивании и подготовке площади под новые посадки, но и прибыль.

Кроме того, при создании лесной плантации необходимо принятие оптимальных решений по выбору целевой породы, оборота рубки, состава и количества вносимых удобрений, технологии подготовки семян или саженцев [9, 17, 19, 20].

Для решения поставленных задач предлагается применить методы математического моделирования и оптимизации, для обоснования технологий и выбора параметров работы машин на лесопромышленных предприятиях [3, 23, 26, 31–33].

Результаты исследования и их обсуждение

Технологический цикл эксплуатации лесной плантации можно разделить на следующие этапы (см. рисунок):

первый этап – подготовка почвы участка к посадке (посеву) древесных пород, в ряде случаев предварительная расчистка площадки от пней; используемое технологическое оборудование: корчеватели, мульчеры, плуги, бороны, покровосдиратели, рыхлители, почвенные фрезы и т. д.;

второй этап – посадка (посев) древесных культур в зависимости от выбранной для целевого лесовыращивания породы используемое оборудование: посадочные машины, сеялки, катки и т. д. [15];

третий этап – уход за посадками, заключающийся в создании оптимальных условий для роста целевых древесных пород; используемое оборудование: культиваторы, машины для дополнительного внесения удобрений, машины для борьбы с вредителями древесных пород (опрыскиватели, ручные кусторезы [2, 20] и т. д.);

четвертый этап – сбор выращенного урожая, или заготовка древесины, при достижении заданного оборота рубки; в зависимости от целевого назначения и размеров выращенной древесины используемое технологическое оборудование: при выращивании конструкционной или балансовой древесины – система машин для лесосечных работ (харвестер и форвардер или валочно-пакетирующая машина, скиддер и процессор); для небольших участков и запасов – бензиномоторные пилы и харвестер или бензиномоторные пилы, харвестер и процессор на верхнем складе; при выращивании энергетической древесины (тонкомерной) – валочно-рубительно-трелевочная машина, мульчерно-трелевочная машина).

Последним этапом в технологической цепочке является очистка плантации от остатков растительности, сбор порубочных остатков, корчевка или измельчение пней, корней, рекультивация земли для передачи под другие виды пользования или возвращение к первому этапу подготовки участка под новый цикл целевого выращивания лесонасаждений.



Блок-схема цикла создания и эксплуатации лесной плантации

Flowchart for creation and operation of a forest plantation

На каждом этапе требуется выполнить определенный набор операций с помощью различных агрегатов, имеющих разные стоимость, производительность, энергоэффективность, техническую готовность [5, 7, 16, 20]. Под агрегатом будем понимать совокупность машин и оборудования, предназначенных для выполнения определенной операции. Например, машина для срезания пней агрегируется с трактором класса тяги 30 кН.

В зависимости от вида почвогрунта, засоренности и целевой породы для каждого этапа назначается состав технологических операций. Для выполнения каждой операции задается набор возможных агрегатов и оборудования.

Часть технологических операций носит сезонный характер (например, посадка), поэтому оборудование для производства этих операций простаивает длительное время. Другие операции, в соответствии с погодными условиями, могут быть востребованы большую часть года. Соответственно, может быть несколько вариантов подбора и использования машин и оборудования. Таким образом, отношения вида «технологическая операция – агрегат» имеют тип «много ко многим», т. е. одна операция может быть выполнена различными агрегатами и одна машина с установленным оборудованием может использоваться для разных операций. Например, на трактор можно устанавливать различные

виды навесного оборудования: плуги, корчеватели, машины для срезания пней, опрыскиватели, манипуляторы, мульчеры и т. д. [10, 18].

Для описания математической модели введем следующие обозначения:

n – число этапов технологического цикла эксплуатации лесной плантации;

N – множество номеров технологических операций;

N_t – множество номеров технологических операций этапа t , $N_t \subset N$, $t = 1, \dots, n$;

M – множество номеров всех возможных используемых агрегатов;

Q – множество номеров применяемых машин и оборудования (далее – оборудования);

R_{MN} – отношение, определяющее связи между технологическими операциями и выполняющими их агрегатами, $R_{MN} \subset M \times N$;

A – матрица отношения R_{MN} , состоящая из элементов a_{ij} , $i \in M, j \in N$, где $a_{ij} = 1$, если технологическая операция j может быть выполнена агрегатом i , и $a_{ij} = 0$, если не может;

R_{QM} – отношение, определяющее связи между видами оборудования и агрегатами, $R_{QM} \subset Q \times M$;

B – матрица отношения R_{QM} , состоящая из элементов b_{qi} , $q \in Q, i \in M$, где $b_{qi} = 1$, если агрегат i включает в себя оборудование q , и $b_{qi} = 0$, если не включает.

Экзогенные переменные (входные параметры модели):

S – площадь участка, га;

w_{ij} – производительность агрегата $i \in M$ при выполнении технологической операции $j \in N$, га/ч;

T_t – предельное время, отводимое на этап t , $t = 1, \dots, n$;

c_q – стоимость одной единицы оборудования $q \in Q$.

Эндогенные переменные (неизвестные модели):

x_q – число единиц оборудования типа i , используемого в технологическом цикле, $q \in Q$;

y_{ij} – логическая переменная, равная 1, если агрегат i используется для технологической операции $j \in N$, и равная 0, если не используется, $i \in M$;

z_{ij} – число агрегатов типа i , используемых для технологической операции $j \in N$, $i \in M$.

Представим постановку оптимизационной задачи.

Целевая функция – минимум расходов на оборудование:

$$\sum_{q \in Q} c_q x_q \rightarrow \min.$$

Ограничения модели следующие:

объем работ на каждом этапе должен быть полностью выполнен:

$$\sum_{i \in M} w_{ij} z_{ij} T_t \geq S, j \in N_t, t = 1, \dots, n;$$

для каждой технологической операции должен применяться только один тип агрегата:

$$\sum_{i \in M} y_{ij} = 1, j \in N;$$

все технологические операции должны быть выполнены только на предназначенном для их исполнения агрегате:

$$0 \leq y_{ij} \leq a_{ij}, i \in M, j \in N;$$

количество используемых агрегатов – целое число:

$$y_{ij} - \text{целое, } i \in M, j \in N;$$

агрегаты комплектуются только при условии их применения:

$$0 \leq z_{ij} \leq D y_{ij}, i \in M, j \in N,$$

где D – достаточно большая константа (число, которое больше, чем любое возможное значение переменной z_{ij});

число единиц оборудования зависит от числа используемых агрегатов:

$$x_q \geq b_{qj} z_{ij}, q \in Q, i \in M, j \in N.$$

Например, имеется участок – земля сельскохозяйственного назначения, выведенная из оборота относительно недавно и заросшая малоценными породами древесины. Требуется подобрать систему машин для осуществления плантационного лесоводства на данном участке.

В зависимости от состояния участка выбирается технология подготовки плантации к посадке. Бывшие земли сельскохозяйственного назначения, как правило, не засорены камнями и не требуют планировки.

Технологические операции первого этапа подготовки плантации к посадке: удаление древесной поросли, пней и корней, подготовка почвы.

Удаление лесной поросли по выбранной технологии осуществляется мульчерами. Существуют мульчеры на собственном самоходном шасси и навесные. Для навесных мульчеров определяем связи между видами оборудования и агрегатами. Получаем множество агрегатов с различными производительностью и стоимостью, которые можно использовать для данной операции. Если количество вариантов мульчеров, тракторов и экскаваторов равно 20, то множество агрегатов для мульчирования больше 50.

Удаление пней и корней по выбранной технологии производится роторами. Определяем связи между видами оборудования и агрегатами. Получаем множество агрегатов для данной операции.

Подготовка почвы по выбранной технологии осуществляется плугами. На рынке достаточно много машин, имеющих различные классы тяги, и плугов, что позволяет формировать множество агрегатов для выполнения данной операции.

По такому же принципу выбирается оборудование для других этапов создания и эксплуатации лесной плантации.

На основании выбранной технологии и выбранного оборудования формируются: A – матрица отношения R_{MN} ; B – матрица отношения R_{QM} .

При решении оптимизационной задачи стоимость оборудования является ключевым параметром, но производительность и ограничение по времени не позволяют выбирать дешевое (малопроизводительное) оборудование. Модульность в свою очередь дает возможность использовать машины на разных этапах эксплуатации лесной плантации.

Представленная математическая модель предполагает, что целевая порода для лесной плантации уже задана и, соответственно, известно количество выращиваемой на участке древесины. После решения поставленной оптимизационной задачи необходимо выполнить сравнение стоимости выращенной древесины и расходов на эксплуатацию плантации.

Таким образом, представленная в статье математическая модель, конечно, не полностью учитывает все факторы создания и эксплуатации лесных плантаций, но интересна в качестве примера модульного принципа подбора системы машин и может служить основой для его дальнейшего развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота / под ред. Г.А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 64 с. [*Agroecological State and Prospects for Use of Lands Withdrawn from the Active Agriculture in Russia*. Ed. by G.A. Romanenko. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2008. 64 p.].
2. Вагвелди А., Фехер Ш., Хорват Б., Коман С., Ковач Г., Сабо Л., Цупи И., Григорьев И., Григорьева О., Данилов Д., Куницкая О., Криваш Е. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций: моногр. Ужгород: МПП «Гражда», 2016. 132 с. [Vagveldi A., Fehér Sh., Horvath B., Coman S., Kovács G., Sabó L., Copi I., Grigorev I., Grigoreva O., Danilov D., Kunitskaya O., Krivas E. *Cultivation and Exploitation of Forest Plantations: Monography*. Uzhgorod, MPP “Grazhda” Publ., 2016. 132 p.].
3. Воронов Р.В., Косицын Д.П., Шабаетов А.И., Воронова А.М., Щеголева Л.В. Математическая модель задачи планирования многопереходного производства в лесопромышленном комплексе // Уч. зап. Петрозав. гос. ун-та. 2013. № 4(133). С. 101–104. [Voronov R.V., Kositsyn D.P., Shabaev A.I., Voronova A.M., Shchegoleva L.V. *Mathematical Model for Multistage Production Planning in Forest Industry Complex*. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University], 2013, no. 4(133), pp. 101–104].
4. Григорьев И. Runko Group наращивает темпы производства // Леспромформ. 2018. № 8(138). С. 94–97. [Grigorev I. Runko Group Ramps up Production. *LesPromInform*, 2018, no. 8(138), pp. 94–97].
5. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 5(31). С. 438–443. [Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Werner N.N. *The Machinery for the Creation and Operation of Forest Plantations*. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2017, vol. 5, iss. 5(31), pp. 438–443].
6. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 6(69). С. 72–77. [Grigoryev I.V., Grigoryeva O.I., Nikiforova A.I., Kunitskaya O.A. *Substantiation of the Technique for the Forest Management Ecological Efficiency Estimation*. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasSAU], 2012, no. 6(69), pp. 72–77].
7. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Куницкая О.А. Технология и машины лесосечных работ: учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 132 с. [Grigorev I.V., Tikhonov I.I., Kunitskaya O.A. *Technology and Machines of Logging Operations: Educational Textbook*. Saint Petersburg, SPbGLTU Publ., 2013. 132 p.].
8. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2014. Т. 19, вып. 5. С. 1499–1502. [Grigoryev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigoryeva O.I., Kunitskaya O.A. *Determination of Energy Intensity of Forest Products within Methodology for Assessing Eco-Efficiency of Forest Management*. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences], 2014, vol. 19, iss. 5, pp. 1499–1502].
9. Григорьева О.И. Влияние сильных разреживаний и удобрений на компоненты лесной экосистемы // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск: БГИТА, 2006. № 13. С. 157–160. [Grigoreva O.I. *The Influence of Strong Thinning out and Fertilizers on the Unites of the Forest Ecosystem*. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 13, pp. 157–160].
10. Григорьева О.И. Новая машина для проведения рубок ухода за лесом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2(13-2). С. 116–119. [Grigoreva O.I. *A New Machine for Carrying out the Thinning of the Forest*. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2015, vol. 3, no. 2-2(13-2), pp. 116–119]. DOI: [10.12737/11046](https://doi.org/10.12737/11046)

11. Желдак В.И. Лесные плантации в системе лесоводства // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 3(35). С. 5–25. [Zheldak V.I. Forest Plantations in Forestry System. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2017, no. 3(35), pp. 5–25]. DOI: [10.15350/2306-2827.2017.3.5](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.3.5)
12. Коман С., Молнар Ш., Сабов В.В. Исследование свойств древесины тополя, ее роль и использование // Леса России в XXI веке: материалы третьей междунар. науч.-практ. интернет-конф. СПб.: СПбГЛТА. 2010. С. 11–16. [Koman S., Molnar Sh., Sabov V.V. The Study of Poplar Wood Properties, Its Role and Use. *Forests of Russia in the 21st Century: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2010, pp. 11–16].
13. Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ (ред. от 03.08.2018). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс» [Forest Code of the Russian Federation: Federal Law of December 04, 2006 No. 200-FZ]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
14. Макуев В.А. Научно-методологические основы формирования парка лесосечных машин предприятия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 384 с. [Makuyev V.A. *Scientific and Methodological Foundations for the Formation of the Logging Machines Park of an Enterprise*: Dr. Eng. Sci. Diss. Moscow, 2010. 317 p.].
15. Марков О.Б. Обоснование параметров рычажно-кулачкового механизма динамического лункообразователя для посадки лесных культур: дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2006. 163 с. [Markov O.B. *Substantiation of the Parameters of the Cam-and-Lever Arrangement of a Dynamic Dredger for Planting Forest Crops*: Cand. Eng. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2006. 163 p.].
16. Марковский А.В., Родионов А.В. Рубки ухода в молодняках: как построить лесохозяйственное предприятие: практ. руководство ООО «Лесная территория». М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2018. 51 с. [Markovskiy A.V., Rodionov A.V. *Improvement Thinning in Young Stands: How to Build a Forestry Enterprise: A Practical Guidance*. Moscow, WWF Russia Publ., 2018. 51 p.].
17. Мартынов А.Н., Беляева Н.В., Григорьева О.И. Современные проблемы лесовыращивания. Химический и комплексный уход за лесом: учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 79 с. [Martynov A.N., Belyayeva N.V., Grigoreva O.I. *Modern Issues of Forest Cultivation. Chemical and Integrated Care of Forest*: Educational Textbook. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 79 p.].
18. Мохирев А.П., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Войнаш С.А. Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах // Строительные и дорожные машины. 2018. № 6. С. 43–49. [Mokhirev A.P., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I., Vainas S.A. Improving the Design of Full Revolving Logging Machines on Excavating Bases. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and Road Building Machinery], 2018, no. 6, pp. 43–49].
19. Онучин Е.М. Перспективный комплекс лесных машин // Науч. журн. КубГАУ. 2013. № 91(07). С. 621–632. [Onuchin E.M. Forecast Center Forest Machine. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 91(07), pp. 621–632].
20. Титов Е.В. Плантационное лесоводство: учеб. пособие. Воронеж: ВГЛТА, 2012. 101 с. Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/4078?category_pk=945 (дата обращения: 20.12.2018). [Titov E.V. *Plantation Forestry*: Educational Textbook. Voronezh, VGLTA Publ., 2012. 101 p.].
21. Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю. Моделирование энергозатрат адаптивно-модульных систем машин при комбинированной трелевке древесины // Вестн. МГУЛ.–Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 166–175. [Shirnin Yu.A., Shirnin A.Yu. Simulation of Energy Consumption of Adaptive Modular Systems of Machines in Combined Skidding of Wood. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 3, pp. 166–175].

22. Bemann A., Knust C. *AGROWOOD. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Berlin, Weißensee, 2010. 340 S.
23. Borges J.G., Diaz-Balteiro L., McDill M.E., Rodriguez L.C.E. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2016. 543 p.
24. Borovics A. Energetikai célú nyárfatermesztés. *Erdészeti lapok cxlii*. 2007, Évf. 4, pp. 110–113.
25. Czupy I., Vágvolgyi A., Horváth B. The Biomass Production and Its Technical Background in Hungary. *Proceedings of 45th International Symposium on Forestry Mechanisation: "Forest Engineering: Concern, Knowledge and Accountability in Today's Environment"*, Dubrovnik, Croatia, October 8–12, 2012. Dubrovnik, Croatia, FORMEC, 2012, pp. 1–9. DOI: [10.13140/2.1.4711.5207](https://doi.org/10.13140/2.1.4711.5207)
26. Diaz-Balteiro L., Romero C., Rodriguez L.C. E., Nobre S.R., Borges J.G. Economics and Management of Industrial Forest Plantations. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 121–170. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_5)
27. Evans J., Turnbull J.W. *Plantation Forestry in the Tropics: The Role, Silviculture, and Use of Planted Forests for Industrial, Social, Environmental, and Agroforestry Purposes*. Oxford, Oxford University Press, 2004. 488 p.
28. Fiala M., Bacenetti J. Economic, Energetic and Environmental Impact in Short Rotation Coppice Harvesting Operations. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 42, pp. 107–113. DOI: [10.1016/j.biombioe.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.004)
29. Hansen E.A. Poplar Woody Biomass Yields: A Look to the Future. *Biomass and Bioenergy*, 1991, vol. 1, iss. 1, pp. 1–7. DOI: [10.1016/0961-9534\(91\)90046-F](https://doi.org/10.1016/0961-9534(91)90046-F)
30. Horváth Z., Marosvolgyi B., Idler C., Pecenka R., Lenz H. Storage Problems of Poplar Chips from Short Rotation Plantations with Special Emphasis on Fungal Development. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2012, vol. 8, iss. 1, pp. 123–132. DOI: [10.2478/v10303-012-0010-7](https://doi.org/10.2478/v10303-012-0010-7)
31. Karlsson J., Rönqvist M., Bergström J. An Optimization Model for Annual Harvest Planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 8, pp. 1747–1754. DOI: [10.1139/x04-043](https://doi.org/10.1139/x04-043)
32. McDill M.E. An Overview of Forest Management Planning and Information Management. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 27–59. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_2)
33. Murach D., Murn Y., Hartmann H. Ertragsermittlung und Potenziale von Agrarholz. *Forst und Holz*, 2008, vol. 6, pp. 18–23.
34. Rodriguez L.C.E., Pasalodos-Tato M., Diaz-Balteiro L., McTague J.P. The Importance of Industrial Forest Plantations. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 3–26. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_1](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_1)
35. Sargent C., Bass S. *Plantation Politics: Forest Plantations in Development*. London, Routledge, 2013. 196 p. DOI: [10.4324/9781315066882](https://doi.org/10.4324/9781315066882)
36. Weiskittel A.R. Forest Growth and Yield Models for Intensively Managed Plantations. *The Management of Industrial Forest Plantations*. Dordrecht, Springer, 2014, pp. 61–90. DOI: [10.1007/978-94-017-8899-1_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_3)

MATHEMATICAL MODEL OF THE MODULAR APPROACH FOR SELECTION OF A SYSTEM OF MACHINES FOR CREATION AND OPERATION OF FOREST PLANTATIONS

R.V. Voronov¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [D-7841-2014](https://orcid.org/0000-0003-0104-6409),
ORCID: [0000-0003-0104-6409](https://orcid.org/0000-0003-0104-6409)

O.B. Markov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-2467-9607](https://orcid.org/0000-0002-2467-9607)

I.V. Grigorev², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),
ORCID: [0000-0002-5574-1725](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725)

A.B. Davtyan³, Postgraduate Student; ORCID: [0000-0002-4175-7996](https://orcid.org/0000-0002-4175-7996)

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: rvoronov@petrsu.ru, markovob@yandex.ru

²Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye, 3, 3 km, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru

³Bratsk State University, ul. Makarenko, 40, Bratsk, Irkutsk region, 665709, Russian Federation; e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru

Forest plantations have been successfully established and operated in many countries since the middle of the past century. More than 50 % of all harvested and processed wood in the world are the products of targeted forest cultivation grown on forest plantations. At the same time, in the Russian Federation, lumber enterprises are running out of raw materials as a result of long-term ongoing extensive forest management in spite of huge forest reserves and hardly full use of the annual cut. The cost of wood raw materials is constantly rising, which is due to an increase in rates for standing timber, expenses for operation and maintenance of forest machines of foreign production, and stronger dollar and euro. First of all, the beginning pressure for raw materials of lumber enterprises and rise in the cost of wood raw materials are driven by the gradual exhaustion of available operational mature forests. Herewith, the average distance of removal of wood harvested in natural forests is constantly increasing; the costs for creation and operation of logging roads has increased year on year; and a long cutting period, especially of coniferous wood, worsens the unfolding situation. One of the problems that currently prevents the effective development of forest plantations is the lack of a scientifically grounded system of machines in our country, capable of performing the entire operation cycle from planting (sowing) of woody plants to wood harvesting and preparing the territory for a new succession. It is evident that this system of machines should be based on the modular approach for its construction, include a probable minimum of machines and mechanisms, have a high coefficient of mechanical availability and low operating costs per unit. The article presents a mathematical model based on the modular approach for constructing systems of machines for forest plantations.

For citation: 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* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 125–134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

Keywords: forest plantations, systems of machines, modular approach for construction of systems of machines.

Поступила 21.01.19 / Received on January 21, 2019

УДК 627.142.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЪЯРУСНОЙ ПАКЕТНОЙ СПЛОТОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ТВЕРДОМ ОСНОВАНИИ

С.В. Посыпанов, д-р техн. наук, проф.; ORCID: [0000-0003-0600-7089](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Двухъярусные пакетные сплотночные единицы играют ключевую роль в реализации концепции экологически щадящей лесотранспортной эксплуатации сети средних и малых рек, обеспечивающей экономическую доступность древесного сырья удаленных лесных массивов России и рациональное использование ресурсов. Применение двухъярусных пакетных сплотночных единиц предполагает необходимость проведения инженерных расчетов, в частности по обоснованию их геометрических характеристик в случае формирования этих сплотночных единиц на твердом основании – на плотбищах. Набор геометрических параметров должен быть достаточным и для корректной оценки их прочностных характеристик. В результате анализа литературных данных предложено провести дополнительное исследование, цель которого – получение зависимостей для определения геометрических характеристик двухъярусных пакетных сплотночных единиц, расположенных на твердом основании. Метод исследования – теоретический. Пакеты рассматривали как невесомые гибкие оболочки, наполненные сыпучей средой одного вида. Обосновали возможность применения для описания поперечного сечения пакетов параметрических уравнений бесперегибных эластиков второго рода. Выведена система уравнений, связывающих между собой искомые геометрические характеристики. Аналитическое решение полученной системы оказалось неосуществимым. Разработали и реализовали на компьютере алгоритм решения численным методом. Задачу представили в безразмерном виде. Расчеты выполняли, оперируя удельными характеристиками, соответствующими единичной площади отдельного пакета. Аппроксимируя результаты расчетов, получили зависимости удельных геометрических характеристик двухъярусных пакетных сплотночных единиц, расположенных на твердом основании, от коэффициента формы отдельно лежащего пакета. Переход к абсолютным значениям высоты, ширины сплотночных единиц и длины рабочей части внешней обвязки предусмотрен посредством умножения удельных характеристик на квадратный корень из площади поперечного сечения пакета. Также получено аппроксимирующее выражение для расчета абсолютного значения длины рабочей части внешней обвязки по коэффициенту формы и высоте отдельно лежащего пакета. Для решения вопросов, связанных с прочностными характеристиками сплотночной единицы в рассматриваемых условиях, предложены аппроксимирующие зависимости, позволяющие определять по коэффициенту формы отдельно лежащего пакета положение плоскостей нулевого давления сыпучей среды для нижних и верхних пакетов и соотношение высот этих пакетов. Коэффициенты детерминации предложенных аппроксимирующих зависимостей имеют значения не менее 0,99. Достоверность полученной информации подтверждена экспериментально с помощью физических моделей.

Для цитирования: Посыпанов С.В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплотночной единицы, расположенной на твердом основании // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 135–147. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135

Ключевые слова: лесосплав, лесоматериалы, пакет, сплоточная единица, геометрические параметры лесотранспортных единиц, обвязка, эластика, алгоритм решения, физическая модель.

Введение

Для рационального использования лесных ресурсов и устранения дефицита древесного сырья необходимо обеспечить экономическую доступность удаленных спелых и перестойных массивов основных лесных регионов Российской Федерации. Реалии таковы, что выполнить это условие можно лишь при задействовании густой сети малых и средних рек. Эффективная экологически щадящая лесотранспортная эксплуатация этих рек возможна при реализации концепции поставок древесного сырья по ним, базирующейся на принципе единого транспортного пакета [8]. Значительная роль в концепции отведена двухъярусным пакетным сплоточным единицам (ДПСЕ), формируемым из пакетов небольшого объема (микрпучков). Внедрение в производство ДПСЕ и связанных с ними технологий [8] подтверждает перспективность предлагаемых разработок.

При использовании ДПСЕ необходимо выполнение технологических, а также прочностных расчетов, предполагающих определение геометрических характеристик лесотранспортных единиц. Вопросы определения геометрических характеристик плавающей ДПСЕ и отдельных плавающих пакетов, из которых формируются ДПСЕ, освещены нами ранее [5, 6]. Однако ДПСЕ предполагается формировать как на воде, так и на опорном основании – на плотбище. Использование ДПСЕ позволяет осуществлять сплотку на плотбище без применения специализированной техники, которую могут заменить погрузчики относительно небольшой грузоподъемности, имеющиеся практически у всех лесозаготовительных предприятий. После завершения сплотки эти погрузчики не будут простаивать, а найдут применение в других технологических процессах. Такая замена должна заинтересовать в первую очередь мелких лесозаготовителей, количество которых существенно возросло, а также предприятия, утратившие возможность осуществления традиционной сплотки в связи с износом специализированной техники и невозможностью ее приобретения.

Известно, что геометрические характеристики одной и той же ДПСЕ, находящейся на плаву и лежащей на твердом основании, различаются, т. е. ранее полученные нами для плавающей ДПСЕ зависимости [5] в рассматриваемом случае не применимы. К наиболее значимым относятся различия, связанные с плоскостями нулевого давления сыпучей среды (ПНДСС) [2], от положения которых существенно зависит прочность ДПСЕ.

Анализ работ других авторов не обнаружил информации о геометрических характеристиках ДПСЕ, хотя публикации об указанных характеристиках отдельных пакетов круглых лесоматериалов многочисленны. Большинство работ посвящено пакетам, лежащим на твердом основании. Получение более точных геометрических характеристик таких пакетов обеспечивается при использовании так называемой эластиковой теории [7]. Наиболее полезна информация, представленная в работах [1, 2, 4, 7]. Более поздние исследования выполнялись в развитие ранних. В итоге для отдельно лежащих пакетов получены выражения, дающие достаточно точные для инженерных расчетов ре-

ультаты. В работе [7] отражены результаты исследования пакетов, уложенных в штабеля. Сомнения по корректности аналитических выражений, полученных в результате этого, вносят некоторые противоречия. Например, согласно формуле (78) в работе [7] периметр поперечного сечения пакета, лежащего в нижнем ярусе штабеля, больше означенного периметра отдельно лежащего пакета на весьма значительную величину, которая равна удвоенной ширине поверхности контакта между пакетами верхнего и нижнего ярусов. При этом автором изначально было принято допущение, что рабочая длина обвязки пакета не меняется при его деформациях. Там же приведена формула (номер отсутствует) для вычисления ширины пакета в штабеле, согласно которой указанная ширина больше ширины отдельно лежащего пакета на значительную величину, равную ширине упомянутой выше поверхности контакта. На практике это не подтверждается. Однако информация оказалась полезной, но недостаточной для определения геометрических характеристик ДПСЕ.

Цель нашего исследования – получение зависимостей для определения геометрических характеристик ДПСЕ, лежащей на твердом основании.

Объекты и методы исследования

При исследовании использован теоретический метод с последующей проверкой полученных зависимостей на физических моделях.

Учтено, что пакеты во время сплотки ДПСЕ деформируются в результате взаимодействия между ними, форма их поперечного сечения существенно отличается как от эллипса, так и от других простейших геометрических фигур (см. рисунок). Также учтено, что получение корректных теоретических

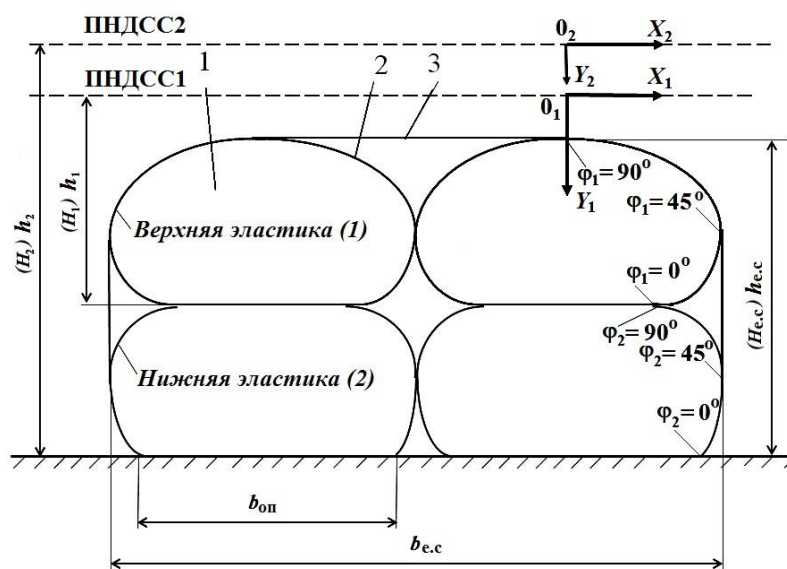


Схема ДПСЕ, расположенной на твердом основании: 1 – пакет;
2 – обвязка пакета; 3 – внешняя обвязка ДПСЕ

Scheme of a two-storied package rafting unit (TPRU) placed on a solid basement: 1 – bundle; 2 – package strapping; 3 – external strapping of a TPRU

решений по определению характеристик прочности ДПСЕ возможно только при наличии информации о местоположении соответствующих ПНДСС. Ее можно получить, используя эластиковую теорию. Прием аналогий поперечного сечения пакета и фигур правильной формы не позволяет установить это местоположение. Важно, что применение эластиковой теории дает возможность более точно определять геометрические характеристики сплочных единиц.

В условиях отсутствия воды все пакеты ДПСЕ в соответствии с эластиковой теорией рассматриваем как невесомые гибкие оболочки, заполненные сыпучей средой одного вида [10]. Роль оболочек здесь выполняют обвязки либо обвязочные комплекты. Очевидно, что форма поперечного сечения пакета соответствует форме его оболочки. В результате действия силы тяжести происходит вертикальное сжатие сыпучей среды, что приводит к возникновению горизонтальных усилий распора. Их уравнивают реакции в обвязках.

Приняли к сведению нецелесообразность чрезмерного утягивания при сплотке ДПСЕ ее внешних обвязок, так как это может привести к ослаблению обвязок пакетов и, соответственно, к ослаблению противодействия продольному смещению лесоматериалов в них. По этой же причине не рекомендуется излишне прижимать один пакет к другому в одном ярусе. На практике убедились [8], что пакеты в ДПСЕ удерживаются при транспортировке вполне надежно при утяжке внешних обвязок, не вызывающей существенного изменения формы пакетов. Поэтому влияние внешних обвязок, а также влияние взаимодействия между пакетами одного яруса на их размеры и форму сочли несущественными.

Контактную поверхность между верхними и нижними пакетами считали горизонтальной и плоской, т. е. приняли допущение, что между верхним и нижним ярусами находится горизонтальная плоская жесткая прокладка бесконечно малой толщины. Это дало возможность не усложнять и так уже нелегкую задачу и получить достаточно точные результаты (судя по данным экспериментальной проверки).

В ходе наиболее успешных исследований, выполненных с использованием эластиковой теории, было установлено, что внутреннее трение сыпучей среды, весьма существенно влияя на силовые характеристики пакета, практически не сказывается на его геометрических параметрах в диапазоне значений угла внутреннего трения, соответствующих круглым лесоматериалам [7]. В таком случае форма поперечного сечения пакетов может быть описана параметрическими уравнениями бесперегибных эластик второго рода [12]:

$$x_i = 0,25H_i \left[(2 - \sin^2 \Theta_i) (K(\Theta_i) - F(\Theta_i, \varphi_i)) - 2(E(\Theta_i) - E(\Theta_i, \varphi_i)) \right]; \quad (1)$$

$$y_i = H_i \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_i \sin^2 \varphi_i}, \quad (2)$$

где x_i и y_i – координаты данной точки элаستي, м; i – номер элаستي и ее системы координат; H_i – модулярная высота, м; Θ_i – модулярный угол, ...°; $K(\Theta_i)$ и $F(\Theta_i, \varphi_i)$ – полный и неполный эллиптические интегралы первого рода; $E(\Theta_i)$ и $E(\Theta_i, \varphi_i)$ – полный и неполный эллиптические интегралы второго рода [14, 15]; φ_i – параметр элаستي, ...° [9, 13].

Модулярная высота характеризует размер полной эластике. Это расстояние по вертикали от основания эластике до ПНДСС ее сыпучей среды (см. рисунок). Модулярный угол задает форму эластике. Между этим углом и коэффициентом формы пакета однозначная связь. Параметр эластике φ_i – величина, изменяющаяся вдоль нее.

В рассматриваемом случае обвязкам и нижних, и верхних пакетов соответствует только по одной разновидности эластик второго рода. Верхней эластике присвоен номер 1, нижней – 2. ПНДСС верхних (ПНДСС1) и нижних (ПНДСС2) пакетов находятся выше ДПСЕ. $X_1O_1Y_1$ – система координат эластике 1, $X_2O_2Y_2$ – 2. Начала этих систем расположены в соответствующих ПНДСС.

Использование формул (1) и (2), а также сопутствующих зависимостей дало возможность получить систему уравнений, отражающих связи между геометрическими характеристиками ДПСЕ в рассматриваемых условиях. Уравнения упомянутой системы представлены ниже. Аналитическое решение ее оказалось невозможным. В уравнениях означенной системы характеристики, интересующие нас, определяются факторами Θ_i , H_i и φ_i . Измерение этих факторов в практической деятельности проблематично. Используемые в практике геометрические характеристики невозможно выразить через иные общепринятые параметры преимущественно из-за эллиптических интегралов, входящих в уравнения. Поэтому воспользовались численным методом решения.

При решении задачи численным методом определение значений эллиптических интегралов по таблицам [11] усложняет программирование. Кроме того, значения интегралов в указанных таблицах даны для Θ и φ , меняющихся дискретно с определенным шагом. При Θ и φ , имеющих промежуточные значения, линейная интерполяция приводит в нашем случае к значительным погрешностям. Поэтому эллиптические интегралы вычисляли, применяя различные ряды [3]. Например, для вычисления неполных эллиптических интегралов второго рода использовали следующий ряд:

$$E(\varphi, k) = A_0 - \frac{1}{2} A_1 k^2 - \frac{1}{8} A_2 k^4 - \frac{1}{16} A_3 k^6 - \frac{5}{128} A_4 k^8 - \frac{7}{256} A_5 k^{10} - \dots - \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-3)}{2 \cdot 4 \dots 2n} A_n k^{2n} - \dots,$$

где $A_0 = \varphi$; A_n – величина, определяемая по формуле

$$A_n = \frac{2n-1}{2n} A_{n-1} - \frac{1}{2n} \cos \varphi \sin^{2n-1} \varphi,$$

$n = 0, 1, 2, \dots$; k – модуль эллиптического интеграла, численно равный $\sin \Theta$.

При расчетах оперировали удельными линейными характеристиками, соответствующими пакету с единичной площадью поперечного сечения. Приведение решения к безразмерному виду дало возможность значительно уменьшить количество вычислений, обеспечив требуемую универсальность результатов. Связь безразмерных линейных характеристик (обозначены строчными буквами) и соответствующих размерных параметров (обозначены прописными буквами) отражает формула

$$z = \frac{Z}{\sqrt{\omega}}, \quad (3)$$

где Z – размерная линейная характеристика, м; z – соответствующая безразмерная или удельная линейная характеристика; ω – площадь поперечного сечения пакета, м².

При нахождении ДПСЕ на суше относительная плотность лесоматериалов ρ_0 не является фактором, определяющим ее геометрические характеристики. Формы поперечных сечений пакетов, а значит и всей ДПСЕ, в рассматриваемых условиях зависят от соотношения рабочей длины обвязок пакета и площади его поперечного сечения. Указанное соотношение однозначно определяется коэффициентом формы пакета, размещенного отдельно. Упомянутый коэффициент – в данном случае единственный определяющий фактор в задаче. Однако при применяемом математическом аппарате невозможно непосредственное варьирование значения указанного определяющего фактора, так как коэффициент формы не является аргументом действующих функций. Приходится варьировать модулярный угол, таким образом меняя форму эластичности и, соответственно, форму поперечного сечения пакетов одного из ярусов. Для каждого значения означенного угла подбираются значения модулярного угла и модулярной высоты эластичности, соответствующей пакетам другого яруса. Выбор останавливается на паре значений подбираемых величин, при которой площадь поперечного сечения пакетов и рабочая длина обвязок будут такими же, как у первой пары пакетов. Из изложенного следует, что решение задачи, рассматриваемой здесь, выполняется по алгоритму, отличающемуся от использованных нами в работах [5, 6].

Вначале расчеты выполняются по пакетам верхнего яруса. Задается значение угла Θ_1 для верхней эластичности. Эта величина варьируется в диапазоне 45°...87°. Результаты расчетов пробного характера за пределами указанного диапазона не принимали во внимание, поскольку значения коэффициентов формы пакетов получались при этом либо меньше 1,25 либо больше 3,00.

При площади поперечного сечения пакета ω , принятой равной единице, модулярная высота для верхней эластичности определяется по формуле

$$h_1 = \sqrt{\frac{1}{K(\Theta_1)(2 - \sin^2 \Theta_1) - 2E(\Theta_1)}}.$$

Заметим, что зависимости площадей, ограниченных эластичностями и их фрагментами, а также их длин от модулярных высот, углов и параметров эластичности были установлены с помощью уравнений (1), (2) и известных из математики приемов, связанных с плоскими фигурами, имеющими криволинейные очертания [14].

Далее вычисляются высота ($h_{в.п}$) и ширина ($b_{в.п}$) пакетов верхних ярусов:

$$h_{в.п} = h_1(1 - \cos \Theta_1);$$

$$b_{в.п} = h_1[(2 - \sin^2 \Theta_1)(K(\Theta_1) - F(\Theta_1, 45^\circ) - 2(E(\Theta_1) - E(\Theta_1, 45^\circ)))].$$

В результате деления $b_{в.п}$ на $h_{в.п}$ определяется значение коэффициента формы пакетов $C_{в.п}$.

С помощью выражения

$$l_{в.п} = 2h_1(K(\Theta_1) - E(\Theta_1))$$

вычисляется длина рабочей части обвязки пакета верхнего яруса.

По формуле

$$h_{б.в} = h_1 \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_1 \sin^2 45^\circ} \right)$$

рассчитывается высота расположения крайних боковых точек верхних пакетов над поверхностью их контакта с нижними.

Расчеты по нижним пакетам выполнялись для разных сочетаний модулярных характеристик соответствующей элаستي: угла Θ_2 и высоты h_2 . Диапазоны их варьирования: соответственно $31,721^\circ \dots 52,980^\circ$ и $1,460 \dots 6,589$, минимальные шаги: соответственно $0,001^\circ$ и $0,001$. Вычисления, описанные далее, осуществляются по всем рассматриваемым сочетаниям Θ_2 и h_2 .

Нагрузка на твердое основание от ДПСЕ равна действующей на нее силе тяжести. Для одного из вертикальных рядов пакетов нагрузка, приходящаяся на 1 м длины сплочной единицы, может быть определена как

$$G = 2\eta\omega\rho_{\text{л}}g, \quad (4)$$

где η – коэффициент полнодревесности пакетов; $\rho_{\text{л}}$ – плотность лесоматериалов, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Указанная нагрузка может быть выражена и через давление на основание сыпучей среды:

$$G = \rho_{\text{л}}gh_2\eta b_{\text{о.п}}, \quad (5)$$

где h_2 – модулярная высота второй элаستي; $b_{\text{о.п}}$ – ширина площади контакта нижнего пакета с основанием.

Из выражений (4), (5) имеем:

$$b_{\text{о.п}} = 2\omega/h_2.$$

По данной формуле и рассчитывается в программе $b_{\text{о.п}}$.

С помощью выражения (2) вычисляется в координатной системе нижней элаستي ордината поверхности контакта между нижним и верхним пакетами. Отметим, что ордината указанной поверхности равна ординате точки, соответствующей значению $\varphi_2 = 90^\circ$ на нижней эластике (см. рисунок). Посредством вычитания означенной ординаты из модулярной высоты h_2 определяется высота нижних пакетов $h_{\text{н.п}}$.

Далее рассчитывается суммарная длина составляющих величины $b_{\text{о.п}}$, находящихся под криволинейными фрагментами поперечного сечения пакета нижнего яруса:

$$b_{\text{к}} = h_2 \left((2 - \sin^2 \Theta_2) K(\Theta_2) - 2E(\Theta_2) \right).$$

Путем вычитания $b_{\text{к}}$ из $b_{\text{о.п}}$ находится ширина верхней контактной поверхности нижнего пакета $b_{\text{к.н}}$.

Определяется суммарная длина криволинейных фрагментов ($l_{\text{к.н.п}}$) и длина рабочей части ($l_{\text{н.п}}$) обвязки пакета нижнего яруса:

$$l_{\text{к.н.п}} = h_2 K(\Theta_2) \sin^2 \Theta_2 ;$$

$$l_{\text{н.п}} = b_{\text{о.п}} + b_{\text{к.н}} + l_{\text{к.н.п}} .$$

Вычисляется площадь прямоугольной составляющей поперечного сечения нижнего пакета:

$$\omega_{\text{п.с}} = h_{\text{н.п}} b_{\text{к.н}}.$$

По формуле

$$\omega_2 = ((2 - \sin^2 \Theta_2) K(\Theta_2) - 2E(\Theta_2)) h_2^2$$

рассчитывается суммарная площадь двух фрагментов поперечного сечения пакета нижнего яруса, примыкающих с боков к прямоугольной составляющей. В результате суммирования $\omega_{\text{п.с}}$ и ω_2 вычисляется площадь ω рассматриваемого сечения в целом.

Значение $l_{н.п}$ сравнивается с длиной рабочей части обвязки, ранее полученной для пакета верхнего яруса, значение ω – с единицей. При сравнении по известным формулам находятся в процентах величины относительных различий, их модули суммируются. Из всех рассчитанных вариантов с различными сочетаниями Θ_2 и h_2 отбирается тот, у которого сумма модулей минимальна.

Для отобранного варианта в соответствии с выражением

$$b_{н.п.к} = h_2 \left[(2 - \sin^2 \Theta_2) (K(\Theta_2) - F(\Theta_2, 45^\circ)) - 2(E(\Theta_2) - E(\Theta_2, 45^\circ)) \right]$$

определяется суммарная ширина криволинейных фрагментов поперечного сечения пакета нижнего яруса.

Полная ширина нижнего пакета

$$b_{н.п} = b_{н.п.к} + b_{к.н}.$$

Путем деления этой ширины на высоту пакета нижнего яруса вычисляется соответствующий ему коэффициент формы $C_{н.п}$.

С использованием формулы

$$h_{б.н} = h_2 \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_2 \sin^2 45^\circ} \right)$$

находится высота расположения крайних боковых точек пакетов нижнего яруса над основанием.

Затем задается очередное значение угла Θ_1 для верхней эластички и вновь выполняются вычисления по описанному выше алгоритму. Такие действия повторяются, пока не будет получено достаточное количество значений коэффициента формы для выбранного ранее диапазона.

Расчеты, описанные ниже, проводятся по отобранному вариантам. В результате суммирования высот нижних $h_{н.п}$ и верхних $h_{в.п}$ пакетов определяется высота ДПСЕ – $h_{е.с}$. Ее ширина находится из выражения

$$b_{е.с} = 2b_{п.мах},$$

где $b_{п.мах}$ – большая из $b_{н.п}$ и $b_{в.п}$ в данном варианте ширина пакета (отличаются незначительно).

Путем деления $b_{е.с}$ на $h_{е.с}$ определяется коэффициент формы $C_{е.с}$ ДПСЕ в рассматриваемых условиях.

Составляющие длины рабочей части внешней обвязки и длина указанной части в целом $l_{е.с}$ вычисляются в следующей последовательности.

По формуле

$$l_{к.н.с} = h_2 \sin^2 \Theta_2 (K(\Theta_2) - F(\Theta_2, 45^\circ))$$

находится общая длина криволинейных фрагментов внешней обвязки ДПСЕ, прилегающих к пакетам нижнего яруса.

С помощью выражения

$$l_{к.в.с} = h_1 \sin^2 \Theta_1 (K(\Theta_1) - F(\Theta_1, 45^\circ))$$

вычисляется общая длина криволинейных фрагментов рассматриваемой обвязки, прилегающих к пакетам верхнего яруса.

Анализируя результаты расчетов, реализованных по приведенному алгоритму, установили, что длины прямолинейных боковых фрагментов внешней обвязки, определенные с учетом их незначительного наклона, обусловленного разницей ширины пакетов нижнего и верхнего ярусов, почти равны длинам вертикальных отрезков соответствующей высоты. Причина этого – незначительная разница ширины пакетов нижнего и верхнего ярусов. В связи

с этим боковые фрагменты обвязки ДПСЕ условно считаем вертикальными. Их общая длина вычисляется по формуле

$$l_{б.с} = 2(h_{н.п} - h_{б.н} + h_{б.в}).$$

В соответствии с уравнением

$$l_{г.с} = 2b_{п.мах}$$

находится общая длина горизонтальных фрагментов внешней обвязки ДПСЕ.

С использованием выражения

$$l_{е.с} = b_{о.п} + l_{г.с} + l_{б.с} + l_{к.н.с} + l_{к.в.с}$$

определяется длина рабочей части внешней обвязки.

Далее вычисляются значения относительных модулярных высот верхней $h_{о.1}$ и нижней $h_{о.2}$ эластик в результате деления h_1 и h_2 на $h_{в.п.}$. В предполагаемых прочностных расчетах удобнее оперировать относительными модулярными высотами.

Рассчитываются относительные высота $h_{о.н.п}$ и ширина $b_{о.н.п}$ пакетов нижнего яруса:

$$h_{о.н.п} = h_{н.п}/h_{в.п};$$

$$b_{о.н.п} = b_{н.п}/b_{в.п}.$$

Этими характеристиками удобно пользоваться при сопоставлении размеров пакетов в разных ярусах. Они наглядно отражают степень деформации нижних пакетов.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация описанного алгоритма на компьютере и выполнение расчетов по нему позволили получить данные, по которым были подобраны аппроксимирующие выражения, предназначенные для определения основных геометрических характеристик ДПСЕ, размещенной на твердом основании.

Для вычисления удельных высоты и ширины ДПСЕ, находящейся в рассматриваемых условиях, предложены следующие уравнения:

$$h_{е.с} = 0,162C^2 - 1,10C + 3,05;$$

$$b_{е.с} = 0,709C + 1,64, \quad (6)$$

где C – коэффициент формы пакета, лежащего отдельно на твердом основании.

В случае необходимости получения более точных результатов, например при научных исследованиях, вместо зависимости (6) предлагается формула с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,999$:

$$b_{е.с} = -0,0463C^2 + 0,900C + 1,46.$$

Рассчитать удельную длину рабочей части внешней обвязки можно с помощью выражения

$$l_{е.с} = 0,720C + 6,98. \quad (7)$$

При необходимости получения повышенной точности результатов предлагается формула с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,999$:

$$l_{е.с} = 0,125C^2 + 0,188C + 7,50. \quad (8)$$

Чтобы перейти от удельных величин к абсолютным следует воспользоваться формулой (3).

Для определения абсолютной величины длины рабочей части обвязки ДПСЕ по коэффициенту формы C и высоте $H_{п.с}$ отдельно лежащего пакета предложено выражение

$$L_{е.с} = (3,795C + 3,30)H_{п.с}.$$

Анализ полученных значений $h_{o,n,l}$ показал, что в отличие от плавающей ДПСЕ [5] здесь высота пакетов в нижнем ярусе меньше, чем в верхнем. Различия по высоте пакетов не превышают 6,6 %. Указанное значение имеет место в случаях формирования ДПСЕ из пакетов с большими коэффициентами формы. С уменьшением этого коэффициента снижается и рассматриваемая разница, достигая минимального значения, равного 3,0 % при коэффициенте формы 1,33. При дальнейшем уменьшении коэффициента формы разница по высоте опять возрастает, интенсивно приближаясь к максимальному значению.

Относительную высоту пакетов нижнего яруса можно вычислить по формуле

$$h_{o,n,l} = 0,0181C^2 - 0,0986C + 1,0679. \quad (9)$$

Применение этой формулы предусмотрено в основном при подготовке материалов, обеспечивающих возможность оценки прочности ДПСЕ в рассматриваемых условиях.

Большинство выше приведенных аппроксимирующих зависимостей получено для значения коэффициента $C = 1,25 \dots 3,00$. Исключением являются выражения (7) – (9), которые справедливы при $C = 1,33 \dots 3,00$. Принятая с запасом нижняя граница упомянутого ранее диапазона (1,25) для них незначительно смещена в целях предотвращения существенного ухудшения аппроксимации.

Результаты выполненных расчетов показывают, что при минимальном коэффициенте формы $C = 1,25$ пакеты в нижнем ярусе шире, чем в верхнем, на 3,8 %. Однако уже при значениях C , превышающих 1,40, различие по ширине почти отсутствует. Эта информация использована при определении рабочей длины внешней обвязки ДПСЕ.

Для $h_{o,1}$ и $h_{o,2}$ по результатам описанных расчетов получены следующие аппроксимирующие зависимости:

при $C = 1,25 \dots 1,50$

$$h_{o,1} = -32,88C^3 + 146,88C^2 - 220,22C + 112,44;$$

$$h_{o,2} = 46,59C^3 - 188,40C^2 + 246,66C - 99,50;$$

при $C = 1,50 \dots 3,00$

$$h_{o,1} = -0,351C^3 + 2,72C^2 - 7,09C + 7,32;$$

$$h_{o,2} = -0,866C^3 + 6,76C^2 - 17,85C + 18,39.$$

Эти выражения предназначены для решения вопросов, относящихся к определению прочностных характеристик ДПСЕ.

Достоверность аппроксимации R^2 всех зависимостей, представленных в статье, не менее 0,99.

С использованием физических моделей, изготовленных в масштабе 1 : 20, была выполнена проверка полученной информации.

Выводы

1. Получена система аналитических уравнений, отражающих связи между геометрическими характеристиками ДПСЕ, расположенной на твердом основании.

2. Предложен и реализован в компьютерной программе алгоритм решения этой системы численным методом.

3. Выполнены вычисления по предложенному алгоритму, результаты которых использованы для получения аппроксимирующих зависимостей, предназначенных для вычисления в инженерной практике высоты и ширины ДПСЕ, расположенной на твердом основании, длины рабочей части ее внешних обвязок. Также получены необходимые при оценке прочности ДПСЕ аппроксимирующие зависимости для определения относительных модулярных высот пакетов нижнего и верхнего ярусов и соотношения их фактических высот.

4. С использованием физических моделей экспериментально подтверждены результаты, полученные теоретически.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вахрушев М.М. Расчет пакета лесоматериалов в гибкой обвязке, лежащего на плоскости // Лесн. журн. 1965. № 5. С. 50–59. (Изв. высш. учеб. заведений). [Vakhrushev M.M. Calculation of a Bundle of Logs in Elastic Strapping Lying on a Flat Surface. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1965, no. 5, pp. 50–59].

2. Воробьев А.Г. О расчете по эластической теории пучков пучковых плотов для случая нахождения их на суше // Лесн. журн. 1958. № 4. С. 93–98. (Изв. высш. учеб. заведений). [Vorob'yev A.G. On the Calculation of Bundle Rafts' Bundles Placed Ashore According to the Elasticity Theory. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1958, no. 4, pp. 93–98].

3. Журавский А.М. Справочник по эллиптическим функциям. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 235 с. [Zhuravskiy A.M. *Handbook on Elliptic Functions*. Moscow, AN SSSR Publ., 1941. 235 p.]

4. Меркин Д.Р. К вопросу об определении натяжения в обвязке и формы пучка // Тр. ЛТА им. С.М. Кирова. 1961. № 96. С. 67–70. [Merkin D.R. To the Issue of Determining the Tension in a Bundle and the Bundle Form. *Trudy LTA imeni S.M. Kirova*. 1961, no. 96, pp. 67–70].

5. Посыпанов С.В. Исследование геометрических характеристик плавающей двухъярусной пакетной сплотовой единицы // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 215. С. 176–191. [Posypanov S.V. Investigation of the Geometric Characteristics of a Floating Two-Storied Bundle Rafting Unit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2016, no. 215, pp. 176–191].

6. Посыпанов С.В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Лесн. журн. 2017. № 1. С. 141–153. (Изв. высш. учеб. заведений). [Posypanov S.V. Numerical Determination of the Geometric Parameters of a Transport Floating Roundwood Bundle. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 141–153]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.141](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.141); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/817/posypanov.pdf>

7. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с. [Reutov Yu.M. Roundwood Bundles Calculations. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1975. 152 p.]

8. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–52. (Изв. высш. учеб. заведений). [Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2007, no. 1, pp. 45–52]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/3c6/3c66c8d06d36d7b633ef4eb67892e4d6.pdf>

9. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientist*. Berlin, Springer, 1971. 360 p. DOI: [10.1007/978-3-642-65138-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-65138-0)
10. Craig R.F. *Soil Mechanics*. London, Spon Press, 1997. 485 p.
11. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tables of Integrals, Series and Products*. San Diego, CA, Academic Press, 2000. 1163 p.
12. Rankine W.J.M. *A Manual of Applied Mechanics*. London, Charles Griffin and Company, 1872. 648 p.
13. Tölke F. Parameterfunktionen. *Praktische Funktionenlehre, Band 2: Theta-Funktionen und spezielle Weierstraßsche Funktionen*. Berlin, Springer, 1966, pp. 83–115. DOI: [10.1007/978-3-642-51616-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-51616-0)
14. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course in Modern Analysis*. US, Book Jungle, 2009. 620 p.
15. Zwillinger D. *Handbook of Differential Equations*. Boston, Academic Press, 1997. 801 p.

DIMENSIONAL DETERMINATION OF A TWO-STORIED PACKAGE RAFTING UNIT PLACED ON A SOLID BASEMENT

S.V. Posypanov, *Doctor of Engineering, Prof.*; ORCID: [0000-0003-0600-7089](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Two-storied package rafting units (TPRU) are essential for implementation of the concept of environmentally friendly forest transport operation of medium and small rivers' system, which provides commercial accessibility of wood raw materials from the remote forest areas of Russia, and sustainable use of resources. The use of TPRU implies the need of engineering calculations, for instance, to substantiate their dimensions in case of the units formation on a solid basement (at log storage area). Selection of dimensions should be sufficient for the correct assessment of their structural behavior. An additional study, the purpose of which is to obtain dependences for determination of dimensions of TPRU, was proposed to conduct as a result of the literature data analysis. The research method is theoretical. The packages were considered as weightless flexible shells filled up with one type of loose medium. We have validated the capability of use the second order parametric equations of elastics with no inflexion point for describing cross-section of packages. A system of equations that connect the desired dimensions is derived. The analytical solution of the obtained system turned out to be impracticable. A computer algorithm for solving the numerical method was developed and implemented. The calculations were performed by operating with specific characteristics corresponding to the unit area of a separate package. The dependences of specific dimensions of TPRU placed on a solid basement on the shape factor of a separately lying package were obtained by approximating the calculation results. Transition to the absolute values of height, width, and length of the rafting units and the working section length of the external strapping is provided by multiplying the specific characteristics by the square root of the package cross-sectional area. An approximating equation is also obtained for calculating the absolute value of the working part length of the external strapping by the shape factor and the height of a separately lying package. The approximating dependencies, which allow to determine by the shape factor of a detached package the position of the zero pressure surfaces of a loose medium for lower and upper packages, as well as correlation between the heights of the mentioned packages, were proposed to resolve the issues related to the strength characteristics of a rafting unit under the considered conditions. The determination coefficients of the suggested approximating dependencies have values not less than

0.99. The theoretic data reliability is confirmed by the experimental technique applying the physical models.

For citation: Posypanov S.V. Dimensional Determination of a Two-Storied Package Rafting Unit Placed on a Solid Basement. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp.135–147. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135

Keywords: timber rafting, timber, package, rafting unit, dimensions of hauling units, strapping, elastic, solution algorithm, physical model.

Поступила 18.01.19 / Received on January 18, 2019



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.817

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛИТ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ ИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ МЯГКИХ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ

В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-9597-2019](#),
ORCID: [0000-0002-2113-4142](#)

М.А. Баяндин, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [S-1990-2019](#),
ORCID: [0000-0002-6228-2715](#)

С.Н. Казицин, канд. техн. наук; ResearcherID: [W-8224-2019](#),
ORCID: [0000-0003-4220-5488](#)

А.В. Намятов, ассистент; ORCID: [0000-0002-5568-8725](#)

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, просп. имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031;
e-mail: vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru, sergeikaz060890@yandex.ru, namyatov2010@yandex.ru

Древесные плиты находят широкое применение во многих областях, особенно в домостроении. В последние 20 лет активно проводятся исследования в области получения древесных плит малой плотности. В статье приводятся результаты работ по изучению влияния гидродинамической обработки древесных частиц (опилок) на их физические свойства и геометрические характеристики в целях выяснения механизма аутогезионного взаимодействия в процессе формирования плитных материалов малой плотности без использования связующих веществ. Обработка частиц проводилась в гидродинамическом диспергаторе роторно-пульсационного типа. Для оценки степени обработки использовался показатель водоудерживающей способности. Для контроля за величиной фибриллирования древесных частиц и увеличением доступных межфазных поверхностей в результате обработки применены метод определения адсорбции воды древесиной и растровая электронная микроскопия. Для сохранения капиллярной структуры гидродинамически обработанной древесной массы ее замораживали при температуре -60°C , после чего подвергали лиофильной сушке. Построены изотермы сорбции исходных опилок, опилок, обработанных в гидродинамическом диспергаторе и лиофильно высушенных, а также полученных древесных плит малой плотности. Установлено, что изотермы сорбции гидродинамически обработанных и лиофильно высушенных древесных частиц существенно отличаются от изотерм исходных опилок и готовых плит. Проведенные расчеты по методу Брунауэра, Эммета, Тейлора показали, что удельная поверхность обработанных и лиофильно высушенных древесных частиц составляет около $350\text{ м}^2/\text{г}$ абс. сухой массы, исходных опилок и полученных плит – примерно $130\text{ м}^2/\text{г}$ абс. сухой массы. Это говорит о том, что гидродинамическая обработка позволяет существенно повысить фибриллирование древесных частиц, тем самым увеличить площадь доступных межфазных поверхностей, что создает условия для аутогезионного взаимодействия между частицами, в результате чего формируется структура плит без использования связующих веществ. Методом растровой электронной микроскопии изучена динамика изменения геометрических харак-

теристик древесных частиц в процессе гидродинамической обработки, установлено, что при этом происходит измельчение древесных опилок и увеличивается доля лентообразных частиц в виде частично разрушенных трахеид с фибрированными поверхностями. При высокой степени обработки (водоудерживающая способность по Джайме – 250 %) древесная масса становится более однородной.

Для цитирования: Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казицин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 148–157. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, краевого фонда науки в рамках научного проекта «Исследование процессов структурообразования материалов из кавитационно активированной древесины».

Ключевые слова: плиты малой плотности, опилки, аутогезия, структура плит, электронная микроскопия, сорбция, гидродинамическая обработка.

Введение

Древесные плиты находят широкое применение во многих областях, особенно в домостроении, что предопределяет запрос на экологически безопасные материалы с высокими показателями эксплуатационных свойств (низкая тепло- и звукопроводность, формостабильность при воздействии влаги, прочность и т. д.). Как показал анализ работ [10, 12, 17], в последние двадцать лет активно проводятся исследования в области получения древесных плит малой плотности. Это обусловлено жесткими требованиями, предъявляемыми к экологической безопасности, энергоэффективности зданий и сооружений, а также обеспечению оптимальных влажностно-температурных характеристик внутри них [18]. Об этом свидетельствуют цифры по снижению производства и потребления в ряде стран изоляционных материалов на основе минеральных и синтетических волокон [6].

Большой интерес вызывают плитные материалы из растительного сырья плотностью от 100 до 300 кг/м³ [8, 9, 16], которые могут сочетать достаточно высокую прочность при низкой тепло- и звукопроводности. Однако формирование структуры данных плит имеет ряд сложностей. Это обусловлено их малой плотностью, что уменьшает количество контактов между структурными элементами. Применение внешнего давления невозможно, так как это увеличивает их плотность. Наиболее известным решением для формирования структуры плит малой плотности является использование связующих веществ (феноло-формальдегидных смол, полиизоцианатов MDI, полиэфирных волокон и др.) [12, 17]. Но это неизбежно приводит к эмиссии токсичных веществ из плитных материалов и создает экологические проблемы как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации плит.

Перспективное направление получения плит малой плотности – предварительная механоактивация древесных частиц без использования связующих веществ. Широкое распространение получили мягкие древесно-волокнистые плиты (ДВП), имеющие плотность 250 кг/м³, предел прочности при изгибе 1,2 МПа, теплопроводность не более 0,07 Вт/(м·°С). Большинство исследователей [1, 9–12] сходятся во мнении, что структурообразование мягких ДВП происходит за счет «свойлачивания» – переплетения древесных волокон при формировании ковра и физического взаимодействия поверхностей размотых

волокон между собой. Прочность полученной структуре придают механические зацепления, образующиеся в процессе сушки, и водородные связи между фибриллированными волокнистыми частицами. Основной проблемой в данном случае является необходимость обеспечения высокой степени помола древесного волокна (не менее 22 ДС [5]) и требуемой длины волокна (4...6 мм [5]), что возможно только при использовании кондиционной щепы хвойных пород. При этом малое количество образующихся контактов между волокнами не позволяет обеспечить желаемую водостойкость материала. Повысить эксплуатационные свойства плит малой плотности можно только за счет увеличения площади доступных межфазных поверхностей древесных частиц вследствие фибриллирования. Предлагается проводить предварительную механическую активацию древесных частиц путем гидродинамической обработки [1].

Перспективным сырьем для получения древесных плит являются опилки, которые представляют собой крупнотоннажные отходы механической переработки древесины.

Проведенные нами ранее исследования [2, 8] указывают на то, что механоактивация опилок путем гидродинамической обработки позволяет получать древесную массу, состоящую из коротких частиц. В процессе горячего прессования изготавливают плиты с хорошими показателями физико-механических свойств средней плотности ($(800 \pm 150) \text{ кг/м}^3$) без использования связующих веществ. Следует отметить высокую водостойкость этих плит. После кипячения в воде в течение 1 ч они сохраняют не менее 80 % исходной прочности. По результатам проведенных испытаний установлена принципиальная возможность получения плит малой плотности (250 кг/м^3) с высокими механическими свойствами, минимальным разбуханием и низкой теплопроводностью [4]. Поэтому данный способ активации древесины открывает новые возможности для их производства. Это требует изучения характера изменений, которые происходят в древесине при данной обработке.

Анализ известных данных [1, 5, 11] дает основание предположить, что гидродинамическая обработка позволяет получать древесные частицы с большой площадью межфазных поверхностей как за счет измельчения, так за счет фибриллирования, которое происходит вследствие частичного отделения целлюлозных фибрилл от древесных частиц. Появляются новые доступные межфазные поверхности с активными функциональными группами, участвующими в формировании надмолекулярных структур в древесине. Так как процесс проводится в воде, то образовавшиеся группы блокируются молекулами воды. Образование структуры плит происходит в процессе их высыхания за счет того, что заблокированные функциональные группы принимают участие в укреплении связей между контактирующими частицами древесной массы.

Для подтверждения данной гипотезы было изучено влияние гидродинамической обработки на структурные характеристики древесных частиц и их изменение в процессе изготовления плит.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на опилках древесины хвойных пород, полученных при распиловке круглых лесоматериалов на лесопильной раме. До обработки опилки смешивали с водой из расчета концентрации опилок 10 %. Обработку осуществляли на лабораторном гидродинамическом диспергаторе роторно-пульсационного типа (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид диспергатора роторно-пульсационного типа: 1 – щит управления; 2 – электродвигатель; 3 – рама; 4 – гидродинамический диспергатор; 5 – сливной шаровой кран; 6 – запорная арматура (затвор); 7 – циркуляционная труба; 8 – шаровой кран; 9 – бак

Fig. 1. General view of a rotary-pulsed disperser: 1 – control panel; 2 – electric motor; 3 – frame; 4 – hydrodynamic disperser; 5 – drain ball valve; 6 – isolation (pipe) valve; 7 – circulation pipe; 8 – ball valve; 9 – tank

Для оценки степени обработки древесной массы применяли показатель WRV – водоудерживающая способность, который определяли по методике Джайме [14]. При проведении исследований использовали древесину разной степени обработки. Максимальное значение WRV составляло 250 %. После обработки формовали ковер путем налива обработанной массы в специальную металлическую форму с сетчатым дном. Для обезвоживания ковра использовали механический отжим в холодном прессе с давлением 0,5 МПа. После этого плиты перемещали в конвективную сушильную камеру. Процесс сушки осуществляли при температуре 105 °С и скорости циркуляции сушильного агента 2,5 м/с. Конечная влажность плит – 4 %, плотность $\approx 250 \text{ кг/м}^3$.

Для нахождения изменений площади межфазных поверхностей использовали метод определения адсорбции воды древесиной. Известно [6, 15], что в процессе высыхания волокнистой массы в ней могут происходить необратимые изменения в виде исчезновения части микрокапилляров, которые образовывались на стадии измельчения [7, 13]. Поэтому для сохранения капиллярной структуры гидродинамически обработанную древесную массу отфильтровывали и замораживали при температуре –60 °С. После этого ее подвергали лиофильной сушке в лабораторном лиофилизаторе при температуре –20 °С и температуре конденсатора –60 °С [3]. Лиофильно высушенные образцы обработанной древесины помещали в гигростаты (температура 25 °С; определенная относительная влажность воздуха над растворами серной кислоты соответствующих концентраций) и выдерживали в течение 1 мес. до достижения постоянной массы образцов (сорбция). На основании полученных данных были построены изотермы сорбции. Для сравнения по такой же методике определяли изотермы сорбции плит из гидродинамически обработанных ча-

стиц ($WRV = 250 \%$). В качестве контроля использовали исходные опилки. Удельную поверхность определяли по методу Брунауэра, Эммета, Тейлора (БЭТ).

Для установления изменений морфологических характеристик частиц в зависимости от величины водоудерживающей способности и структуры полученных плит принят метод растровой электронной микроскопии (микроскоп ТМ-1000).

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные значения количества адсорбированной воды на 1 г абс. сухой древесины в зависимости от степени насыщенности воздуха представлены на рис. 2 в виде изотерм сорбции.

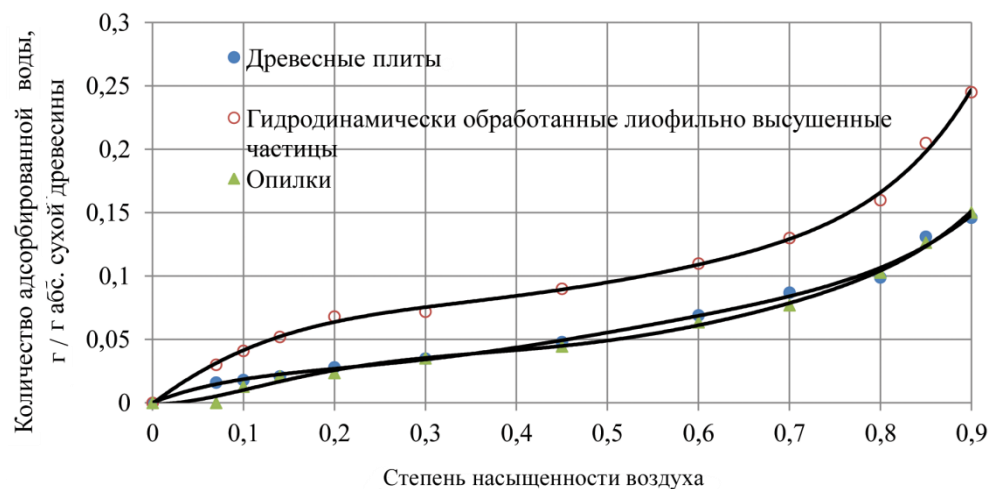


Рис. 2. Изотермы сорбции при температуре 25 °C

Fig. 2. Sorption isotherms at a temperature of 25 °C

Как видно из рис. 2, исследуемые образцы имеют различные величины сорбции, наибольшее отличие отмечено при относительной влажности воздуха до 0,20 (мономолекулярная адсорбция) и выше 0,75 (капиллярная конденсация). Образцы активированной древесины после замораживания и лиофильной сушки имеют максимальную сорбцию, при этом адсорбция у плит и исходных опилок (контроль) примерно одинакова. Емкость монослоя лиофильновысушенных образцов выше, чем у плит и исходных опилок. При оценке величины удельной поверхности по методу БЭТ [2], установлено, что удельная поверхность у обработанной и лиофильно высушенной древесной массы составляет примерно $350 \text{ м}^2/\text{г абс. сухой массы}$, что более чем в 2,5 раза выше значений для полученных плит и исходных опилок ($\sim 130 \text{ м}^2/\text{г абс. сухой массы}$).

Отличие изотерм сорбции в области капиллярной конденсации свидетельствует о том, что обработанная лиофильно высушенная древесина содержит большее количество микрокапилляров, в которых может конденсироваться объемная фаза. Вероятно, эти капилляры обусловлены значительной фибрилляцией древесных частиц.

Как ранее было отмечено, изотермы сорбции исходных опилок и готовых плит практически не отличаются, но значительно отличаются от изотерм

лиофильно высушенных частиц, т. е. при формировании структуры плит в процессе сушки происходит восстановление водородных связей между макромолекулами полимеров компонентов древесинного вещества, которые были разрушены при гидродинамической обработке. Образовавшаяся сетка водородных связей имеет плотную упаковку, что объясняет малую величину разбухания плит, их высокую водостойкость и прочность. Результаты электронной микроскопии древесной массы различной степени обработки приведены на рис. 3.

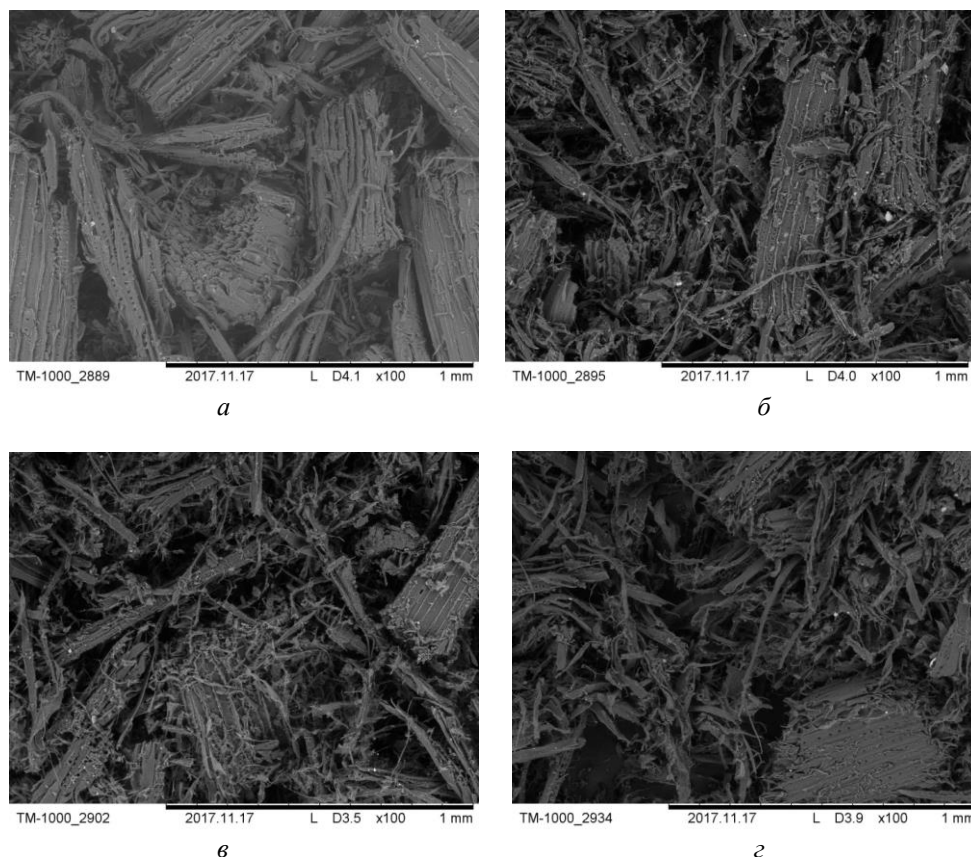


Рис. 3. Микроструктура древесной массы с различной степенью гидродинамической обработки: *a* – исходные опилки из древесины сосны; *б* – активированные частицы при WRV = 100 %; *в* – WRV = 200 %; *г* – WRV = 250 %

Fig. 3. Microstructure of wood pulp with varying degrees of hydrodynamic processing: *a* – initial sawdust from pine wood; *б* – activated particles with water-retention value (WRV) = 100 %; *в* – WRV = 200 %; *г* – WRV = 250 %

Как видно из снимков (рис. 3, *a*), опилки до обработки выглядят как небольшие фрагменты древесины, имеющие клеточную структуру с редкими волокнистыми фрагментами. При гидродинамической обработке древесной массы до WRV = 100 % отчетливо проявляется расслоение приторцовых поверхностей частиц. При этом увеличивается количество мелких лентообразных частиц в виде частично разрушенных трахеид с фибриллированными поверхностями (рис. 3, *б*). При WRV = 200 % (рис. 3, *в*) возрастает количество волокнистых элементов и фибриллированной мелкой (порядка нескольких

микрон) фракции. Дальнейшая гидродинамическая обработка ($WRV = 250\%$) приводит к увеличению однородности древесной массы за счет роста доли волокнистых частиц в виде лент и уменьшения количества мелкой фракции (рис. 3, з). Это обусловлено тем, что мелкие частицы за счет аутогизеонного взаимодействия с более крупными элементами образуют новые структуры.

На рис. 4 представлена микрофотография готовой плиты.

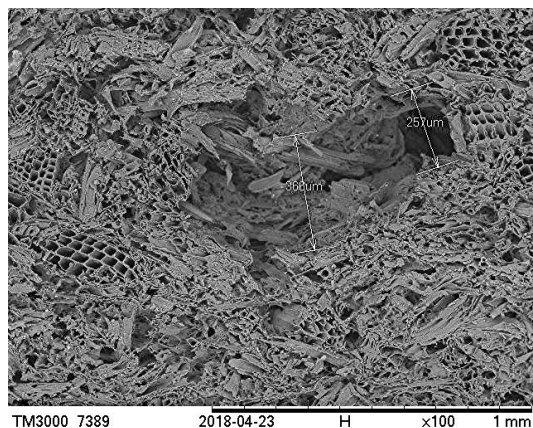


Рис. 4. Микроструктура древесной плиты

Fig. 4. Microstructure of a wood board

Древесная плита малой плотности представляет собой пористый мелкодисперсный материал без явно выраженной анизотропии строения.

Выводы

1. Предварительная гидродинамическая обработка древесины позволяет получать плиты малой плотности без связующих веществ.
2. Установлено, что в результате гидродинамической обработки происходит измельчение древесных частиц и их фибриллирование, что подтверждается изменением сорбционных свойств древесины.
3. Изотермы сорбции гидродинамически обработанной древесины существенно отличаются от изотерм исходной древесины и полученных плит, особенно при степени насыщенности воздуха до 0,20 и выше 0,75.
4. Удельная поверхность, рассчитанная по методу БЭТ, у гидродинамически обработанной древесины составляет примерно $350 \text{ м}^2/\text{г}$ абс. сухой массы, у исходных опилок и готовых плит малой плотности – $130 \text{ м}^2/\text{г}$ абс. сухой массы.
5. Формирование структуры плит малой плотности происходит за счет восстановления водородных связей между макромолекулами полимеров древесинного вещества, разрушенных при гидродинамической обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1986. 361 с. [Alashkevich Yu.D. *Fundamentals of the Theory of Hydrodynamic Processing of Fibrous Materials in Grinding Machines*: Dr. Eng. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 1986. 361 p.]
2. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Елисеев С.Г. Влияние механоактивации на аутогезионные свойства древесины // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 31, № 1-2. С. 159–163. [Bayandin M.A., Ermolin V.N., Eliseyev S.G. Influence of Mechanical

Activation on the Autogenous Properties of Wood. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2013, vol. 31, no. 1-2, pp. 159–163].

3. Колосовская Е.А., Лоскутов С.Р., Чудинов Б.С. Физические основы взаимодействия древесины с водой. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 216 с. [Kolosovskaya E.A., Loskutov S.R., Chudinov B.S. *Physical Principles of Interaction between Wood and Water*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.].

4. Намятов А.В., Баяндин М.А., Казитин С.Н., Ермолин В.Н. Исследование свойств плит малой плотности из механоактивированных древесных частиц без использования связующих веществ // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения (Красноярск, 10–16 сент. 2018 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. С. 149–151. [Namyatov A.V., Bayandina M.A., Kazitsin S.N., Ermolin V.N. Investigation of the Properties of Boards, Small Density from Mechano-Activated Wood Chips without Adhesives. *Wood Structure, Properties and Quality – 2018: in honor of B.N. Ugolev. Proceedings of the 6th RCCWS International Symposium Dedicated to the 50th Anniversary of the Regional Coordinating Council of Wood Science, Krasnoyarsk, September 10–16, 2018*. Novosibirsk, SB RAS Publ., pp. 149–152].

5. Чистова Н.Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2010. 461 с. [Chistova N.G. *Recycling of Wood Wastes in the Technological Process of Obtaining Fiberboard*: Dr. Eng. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2010. 461 p.].

6. Alemdar A., Sain M. Biocomposites from Wheat Straw Nanofibers: Morphology, Thermal and Mechanical Properties. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 2, pp. 557–565. DOI: [10.1016/j.compscitech.2007.05.044](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.044)

7. Badel E., Delisee C., Lux J. 3D Structural Characterisation, Deformation Measurements and Assessment of Low-Density Wood Fibreboard under Compression: The Use of X-Ray Microtomography. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 7-8, pp. 1654–1663. DOI: [10.1016/j.compscitech.2008.02.013](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.013)

8. Cervin N.T., Andersson L., Ng J.B.S., Olin P., Bergström L., Wågberg L. Lightweight and Strong Cellulose Materials Made from Aqueous Foams Stabilized by Nanofibrillated Cellulose. *Biomacromolecules*, 2013, vol. 14(2), pp. 503–511. DOI: [10.1021/bm301755u](https://doi.org/10.1021/bm301755u)

9. Chapman K.M. Wood-Based Panels: Particleboard, Fibreboards and Oriented Strand Board. *Primary Wood Processing*. Dordrecht, Springer, 2006, pp. 427–475. DOI: [10.1007/1-4020-4393-7_12](https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7_12)

10. Ermolin V.N., Bayandina M.A., Kazitsin S.N. Mechanical Activation of Wood for Adhesive-Free Board Production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 155, no. 1, art. 012038. DOI: [10.1088/1757-899X/155/1/012038](https://doi.org/10.1088/1757-899X/155/1/012038)

11. Fengel D., Wegener G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, Walter de Gruyter, 1984. 613 p.

12. Gellert R. Natural Fibre and Fibre Composite Materials for Insulation in Buildings. *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*. 2010, pp. 229–256. DOI: [10.1533/9781845699277.2.229](https://doi.org/10.1533/9781845699277.2.229)

13. Jayme G. *Zellstoff und Papier*. 1961, vol. 11, pp. 432–438.

14. Kawasaki T., Zhang M., Kawai S. Manufacture and Properties of Ultra-Low-Density Fiberboard. *Journal of Wood Science*, 1998, vol. 44, iss. 5, pp. 354–360. DOI: [10.1007/BF01130447](https://doi.org/10.1007/BF01130447)

15. Li J., Yang X., Xiu H., Dong H., Song T., Ma F., Feng P., Zhang X., Kozliak E., Ji Y. Structure and Performance Control of Plant Fiber Based Foam Material by Fibrillation via Refining Treatment. *Industrial Crops and Products*, 2019, vol. 128, pp. 186–193. DOI: [10.1016/j.indcrop.2018.10.085](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.085)

16. Shanks R.A. Chemistry and Structure of Cellulosic Fibres as Reinforcements in Natural Fibre Composites. *Natural Fibre Composites*. Oxford, Woodhead Publishing, 2014, pp. 66–83. DOI: [10.1533/9780857099228.1.66](https://doi.org/10.1533/9780857099228.1.66)
17. Velásquez J.A., Ferrando F., Salvadó J. Binderless Fiberboard from Steam Exploded *Miscanthus sinensis*: The Effect of a Grinding Process. *Holz als Roh- Und Werkstoff*, 2002, vol. 60, iss. 4, pp. 297–302. DOI: [10.1007/s00107-002-0304-2](https://doi.org/10.1007/s00107-002-0304-2)
18. Xie Y., Tong Q., Chen Y., Liu J., Lin M. Manufacture and Properties of Ultra-Low Density Fibreboard from Wood Fibre. *BioResources*, 2011, vol. 6, no. 4, pp. 4055–4066.

STRUCTURE FORMATION OF LOW-DENSITY BOARDS FROM HYDRODYNAMICALLY ACTIVATED SOFT WOOD WASTE

V.N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),
ORCID: [0000-0002-2113-4142](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142)

M.A. Bayandin, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),
ORCID: [0000-0002-6228-2715](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715)

S.N. Kazitsin, Candidate of Engineering; ResearcherID: [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),
ORCID: [0000-0003-4220-5488](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488)

A.V. Namyatov, Assistant; ORCID: [0000-0002-5568-8725](https://orcid.org/0000-0002-5568-8725)

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeni gazety Krasnoyarskiy rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation;
e-mail: vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru, sergeikaz060890@yandex.ru, namyatov2010@yandex.ru

Wood boards find wide application in many fields, especially in house building. Research has been actively conducted in the field of obtaining low-density wood boards in the past 20 years. This article presents the results related to studying the influence of hydrodynamic processing of wood particles (sawdust) on their physical properties and dimensions, for the purposes of identifying the mechanism of autohesion interaction in formation of low-density boards without the binding agents. The particles were processed in a hydrodynamic rotary-pulsed disperser. Water retention value (WRV) was used in order to evaluate the degree of processing. A method for determination of water adsorption by wood, and scanning electron microscopy were taken as a criterion of the fibrillation size of wood particles and increase in available interphase surfaces as a result of processing. Hydrodynamically processed wood pulp was frozen at –60 °C and then lyophilized in order to preserve its capillary structure. As a result of the study, we have constructed sorption isotherms of the following samples: initial sawdust, sawdust processed in the hydrodynamic disperser and lyophilized, and low-density wood boards. It was found out that the sorption isotherms of hydrodynamically processed and lyophilized wood particles are considerably different from the isotherms of initial sawdust and final boards. The calculations made according to the BET method showed that the specific surface area of the processed and lyophilized wood particles is about 350 m²/g of dry weight, and the area of the initial sawdust and obtained boards is approximately 130 m²/g of dry weight. This suggests that hydrodynamic processing allows us to considerably increase the fibrillation of wood particles, thereby increase the area of available interphase surfaces, which creates the conditions for autohesion interaction between the particles. As a result the board structure is formed without binding agents. The dynamics of changes in the wood particles dimensions under hydrodynamic processing was studied by the scanning electron microscopy. Sawdust crushing and increasing the share of ribbon-shaped particles in the form of partially destroyed tracheids with fibrillated surfaces

take place at that. The wood pulp becomes more homogeneous under the high degree of processing (water retention value by the Jaime method – 250 %).

For citation: Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Soft Wood Waste. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 148–157. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148

Funding: The study was carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research, the Government of Krasnoyarsk Krai, and the Krasnoyarsk Regional Fund for Scientific and Technical Development Support within the frame of a scientific project “Study of Structuring Materials made of cavitation activated wood”.

Keywords: low-density boards, sawdust, autohesion, structure of boards, electron microscopy, sorption, hydrodynamic processing.

Поступила 30.01.19 / Received on January 30, 2019

УДК 620.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.158

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

В.Ю. Чернов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [X-4439-2019](#),
ORCID: [0000-0001-9496-7340](#)

О.В. Цой, магистрант; ORCID: [0000-0001-8028-2201](#)

Н.А. Магальяс, магистрант; ORCID: [0000-0002-4940-8918](#)

М.С. Чернова, аспирант; ResearcherID: [X-4073-2019](#), ORCID: [0000-0002-0192-5158](#)

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: Chernov.vas7936@yandex.ru,
lelik-ha4@mail.ru, masha0906@mail.ru

Начиная с 70-х гг. XX в. разработано множество методик и устройств для дендрохронологического исследования древесины, которые в основном базируются на технических решениях, предложенных Б. Эклундом. Применяемые в настоящее время методы основываются на измерении контуров годовичных колец на поперечных срезах древесины с помощью оптических увеличительных приборов. Современные приборы, несмотря на высокий технический уровень и дороговизну, имеют существенные недостатки, связанные с точностью измерений, автономностью работы и длительностью анализа результатов. Целью исследования является устранение указанных недостатков путем синтеза технических решений и разработки нового устройства. Поскольку силовые параметры механического резания находятся в тесной связи со свойствами и строением древесины, в основу нового прибора положен принцип измерения усилий простого поступательного резания древесины в торец и определения ширины годовичных колец. В результате проведенной работы снижена ориентировочно до 250 тыс. р. стоимость прибора, повышена его надежность за счет упрощения конструкции и применения простых измерительных компонентов, автономности и мобильности дендрохронологических исследований. Разработанное устройство, отличающееся высокой точностью ($\pm 1\%$) и дискретностью измерений (0,260...0,012 мм), может найти применение в дендрохронологическом анализе при исследовании макроскопического строения древесины и силовых параметров процесса ее резания.

Для цитирования: Чернов В.Ю., Цой О.В., Магальяс Н.А., Чернова М.С. Устройство для дендрохронологического исследования древесины // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 158–166. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.158

Ключевые слова: дендрохронологические исследования древесины, макроскопическое строение, простое поступательное резание древесины, силовые параметры процесса резания древесины, точность и дискретность измерений.

Введение

С середины прошлого века методика и техника дендрохронологических исследований постоянно совершенствовались и модернизировались. В 1950 г. Б. Эклундом (Норвегия) создан полуавтоматический прибор для измерения ширины годовичных колец [5]. В 70-х гг. прошлого века в г. Цюрихе исследователями разработан дендрохронологический комплект, состоящий из бура, приспособления, обеспечивающего точное его наведение на сердцевину дерева, устройства для обработки керна и денситометра на основе светового эффекта. Комплект состоял из стереоскопического микроскопа, электрического импульсопередаточного механизма и суммирующего устройства, фиксирую-

щего ширину измеренных годовичных колец и их суммарную ширину. Конструкция нашла широкое применение. Чешский исследователь Б. Винш модернизировал данный прибор, разработав приставку с автоматическим самописцем ширины годовичных колец и установку для переноса данных на ЭВМ.

Несмотря на то, что прошло достаточно много времени с момента создания первого полуавтоматического прибора, технические решения Б. Эклунда применяются в современном дендрохронологическом приборе LINTAB™ («Линтаб»), выпускаемом компанией RINNTECH (г. Гейдельберг, Германия). Данный прибор (рис. 1) работает совместно с программой для дендрохронологического анализа TSAP-Win™ («ТСАП-Вин») [12].

Прибор состоит из линейной направляющей, оборудованной электронным устройством фиксации перемещения измерительного стола с исследуемым образцом; стереомикроскопа МБС-10, Leica MS5, Leica S4E [14, 15]. Измерение годовичных колец происходит вручную путем перемещения стола с исследуемым образцом с помощью рукоятки и соотнесения торцевых контуров годовичных колец и визирных линий окуляра. Запись ширины годовичного кольца осуществляется нажатием клавиши на ЭВМ. Прибор имеет предел допускаемой абсолютной погрешности измерения 0,03 мм (при минимально допустимом для дендрохронологического исследования 0,05 мм [6]). В 2009 г. этот прибор зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений.

Позднее компания RINNTECH разработала многофункциональное устройство LIGNOSTATION™ («Лигностейшн») с программным обеспечением LINGOVISION™ («Линговижен»), способное выполнять в том числе и дендрохронологические исследования (рис. 2).



Рис. 1. Дендрохронологический прибор LINTAB

Fig. 1. LINTAB tree-ring measurement station



Рис. 2. Многофункциональное устройство LIGNOSTATION

Fig. 2. LIGNOSTATION multifunction device

По сравнению с «Линтаб», представленный программно-аппаратный комплекс конструктивно более современен и в то же время сложен. По данным компании-изготовителя, точность оптического сканирования достигает 1/10 мм (<http://www.rinntech.de>). В процессе работы комплекс перед измерением осуществляет подготовку поверхности (выравнивание) исследуемого образца фрезерованием. Затем происходит автоматическое оптическое сканирование. После чего программа «Линговижен» распознает размеры годовичных колец [16].

Несмотря на все преимущества и достаточно широкое применение устройств [10, 11, 13, 17], они имеют и некоторые недостатки, связанные с продолжительностью выполнения измерений, сложностью использования и стационарностью, а самое главное – высокую стоимость (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение дендрохронологических оптических устройств

Устройство	Стоимость*, тыс. р.	Погрешность измерения, мм	Степень автоматизации	Способ измерения
«Линтаб» с ПО «ТСАП-Вин»	440...2 000	0,03	Полуавтоматическая	По контуру годовых колец
«Лигностейшн» с ПО «Линговижен»	7 600... 12 800	0,1	Автоматическая	

* Приведена цена с официального сайта RINNTECH в России (<http://resistograph.ru>). Пересчет из евро в рубли осуществлен по курсу московской биржи на 23.01.2018 г.

Таким образом, в настоящее время разработки новых технических решений, направленных на снижение стоимости, повышение автономности и мобильности дендрохронологических исследований, являются актуальной опытно-конструкторской задачей.

Цель данной работы – совершенствование и повышение доступности дендрохронологических исследований путем синтеза новых технических решений.

Объекты и методы исследования

Для систематизированного поиска новых технических решений использован метод морфологического исследования, созданный швейцарским астрофизиком Ф. Цвикки, который заключается в построении морфологической матрицы всех возможных технических решений с последующим синтезом.

В этом аспекте проанализировано многообразие воздействий на древесину: механические, климатические, биологические, специальные среды, ионизирующие и электромагнитные излучения. Поскольку силовые параметры механического воздействия находятся в тесной связи со свойствами и строением древесины и с технической точки зрения менее затратны и наиболее просты в исполнении, было решено остановиться на механических воздействиях (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, вдавливание и срез). В свою очередь, при определении прироста годовых колец у древесины наиболее простым и подходящим видом механического воздействия является срез, или простое резание, так как в этом случае можно установить свойства древесины в любой локальной области. Поскольку физико-механические свойства древесины находятся в прямой зависимости от энергосиловых параметров ее резания, то в процессе простого прямолинейного резания в торец в строго радиальном направлении с постоянной скоростью изменение усилий, действующих на резец, будет соответствовать динамике свойств и приросту древесины в этом же направлении.

В качестве прототипов при разработке технических решений для дендрохронологического исследования выбраны две установки. Первая [4], измеряющая касательную составляющую сил резания, включает: механизм продвижения державки с режущим инструментом, состоящий из винтовой передачи и мотор-редуктора; подвижный окуляр с фокусом, наведенный на режущую

кромку резца и движущийся вместе с ним; измерительную систему. Вторая [8], позволяющая определять касательную и радиальную составляющие сил резания, состоит из станины, на которой закреплены при помощи винтового вала два подвижных суппорта с образцом и неподвижным режущим инструментом; червячный редуктор, осуществляющий посредством винтовой передачи процесс резания за счет надвигания образца материала на резец. Измерение усилий резания в обеих установках производится тензометрическими датчиками.

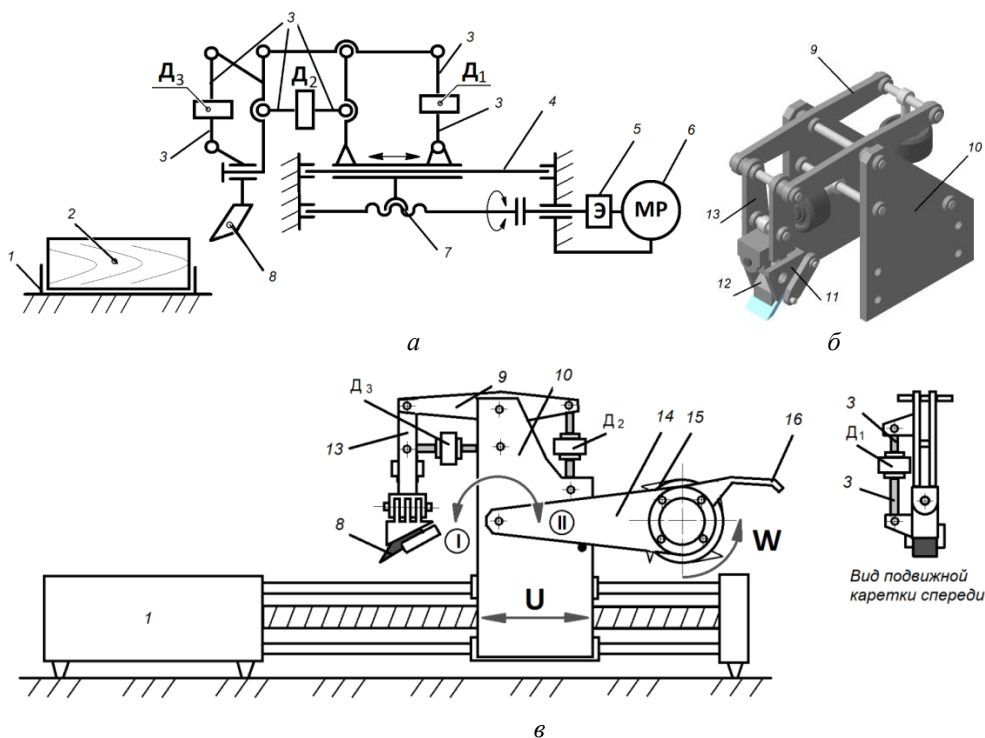


Рис. 3. Устройство для дендрохронологических исследований древесины простым резанием: *а* – кинематическая схема устройства; *б* – модель подвижной каретки; *в* – компоновка устройства; 1 – стол для закрепления образца; 2 – исследуемый образец; 3 – датчики (растяжения/сжатия) D_1 , D_2 , D_3 ; 4 – линейные направляющие; 5 – энкодер; 6 – механизм надвигания резца (мотор-редуктор); 7 – винтовая передача; 8 – резец; 9 – стрела; 10 – каретка; 11 – державка; 12 – клинообразная пластина для зажатия и фиксации резца в державке; 13 – рукоять; 14 – рамка; 15 – прорезные фрезы и привод их вращения; 16 – опоры

Fig. 3. Device for dendrochronological analysis of wood by simple cutting: *a* – kinematic diagram of the device; *б* – model of a movable carriage; *в* – device layout; 1 – table for fixing the sample; 2 – test sample; 3 – sensors (tension/compression) D_1 , D_2 , D_3 ; 4 – linear guides; 5 – encoder; 6 – mechanism of a cutter thrust (gearmotor); 7 – screw gear; 8 – cutter; 9 – arrow; 10 – carriage; 11 – holder; 12 – wedge-shaped plate for clamping and fixing the cutter in the holder; 13 – handle; 14 – frame; 15 – slotting cutters and a drive of their rotation; 16 – supports

Недостатки рассмотренных устройств:

невозможно закрепить и исследовать спилы деревьев или бревен целиком;

усилия и удельная работа резания определяются с помощью аналоговых устройств, что не обеспечивает достаточные точность и дискретность измерений; устройства являются стационарными, достаточно массивными и энергоёмкими.

В результате синтеза технических решений разработано новое устройство для дендрохронологического исследования [3], основанное на элементарном резании (рис. 3, а, б).

Перечислим использованные технические решения:

измерение касательной, радиальной и боковой сил выполняется датчиками измерения усилий растяжения и сжатия (далее – датчики);

выходные параметры оцифровываются аналого-цифровым преобразователем (далее – устройство сбора данных) и передаются на компьютер в виде цифровых сигналов для обработки; отображение и хранение данных происходит в специально разработанном программном обеспечении;

державка с резцом шарнирно закреплена на консоли, которая состоит из двух шарнирно сочлененных с кареткой частей (маятниковый стержень, стрела), что позволяет осуществлять свободное отклонение резца в направлении действия радиальной, касательной и боковой составляющих сил резания в процессе элементарного резания. Шарнирно установленные распорки консоли являются одновременно стержнями с датчиками, которые придают жесткость конструкции, а датчикам – возможность измерения трех составляющих сил резания.

В разработанном устройстве планируется применять: устройство сбора данных (УСД) NI USB-6008 [9]; три датчика силы растяжения/сжатия Burster 8524-6050 [1]; энкодер с датчиком Холла [2] для мотор-редуктора IG-52GM с характеристиками [7], указанными в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики компонентов измерительной схемы устройства для дендрохронологического анализа

Компонент	Параметр	Значение
Аналогово-цифровой преобразователь (УСД NI USB-6008)	Диапазон измерений (схема с общим проводом / дифференциальная схема)	$\pm 10/\pm 20$ В
	Погрешность измерения	84 мВ
	Частота дискретизации	До 10 кГц
	Рабочий диапазон температур	0...50 °С
Датчики растяжения и сжатия (Burster 8524-6050)	Диапазон измерений	0±50 Н
	Приведенная погрешность	До 0,25 %
	Безопасная перегрузка от номинальной нагрузки	150 %
	Рабочий диапазон температур	-30...80 °С
Мотор-редуктор постоянного тока на подачу с энкодером (IG-52GM)	Выходная мощность	58,6 Вт
	Номинальный крутящий момент электродвигателя	0,047 Н·м
	Время падения/нарастания сигнала энкодера	1,5 μs
	Рабочий диапазон температур	-10...50 °С

При простом резании для точного определения дендрохронологических характеристик необходима специальная подготовка образца. Для этого в конструкции устройства предусмотрены три фрезы. Пазовая дисковая фреза осу-

ществляет подготовку поверхности резания, тем самым выравнивая торцевую поверхность образца, две прорезные фрезы создают канавки ниже подготовленной поверхности для открытого резания. Прорезные фрезы имеют отдельный привод вращения и устанавливаются на откидной рамке, шарнирно соединенной с кареткой (рис. 3, в).

В качестве резцов могут использоваться твердосплавные пластины, применяемые в круглых деревообрабатывающих пилах. Угол заострения резца зависит от его заточки, передний, задний углы и угол резания настраиваются посредством поворота рукояти относительно стрелы путем изменения длины распорок с датчиком. Распорки имеют на поверхности резьбу и в зависимости от их направления вращения отталкивают или притягивают рукоять и стрелу, а также поворачивают державку с резцом на некоторый угол относительно горизонтальной поверхности резания. Вращение распорок происходит вместе с датчиками. Толщина срезаемой стружки исследуемого материала изменяется несколькими способами:

- изготовлением образцов заданных размеров;
- установкой резца в державке в определенном положении;
- поворотом стрелы относительно подвижной каретки посредством изменения длины распорок с датчиком.

Определение пути прохождения режущего инструмента при резании осуществляется энкодером, установленным на приводе механизма надвигания режущего инструмента.

Для крепления образцов на столе могут использоваться зажимные механизмы, например в виде струбцин и тисков.

Результаты исследования и их обсуждение

Энкодер определяет скорость перемещения и позицию резца в момент резания, датчики силы фиксируют динамику сопротивления простому резанию в процессе подачи резца в материале. Поэтому точность определения прироста древесины и различных параметров годовых колец зависит от дискретности, точности и чувствительности энкодера и датчиков силы, основные из которых приведены в табл. 2.

Наибольший интерес представляют характеристики устройства, которые были найдены с учетом наихудших параметров каждого из отдельных компонентов измерительной схемы (табл. 3).

Таблица 3

Расчетные характеристики разработанного устройства

Параметр	Значение
1. Min/max дискретность измерения перемещения резца: а) по винтовой передаче б) по перемещению резца	$\approx 0,053/0,01$ об/с $\approx 0,26/0,012$ мм
2. Абсолютная погрешность измерения усилий резания	0,25 Н (0,0255 кг)
3. Относительная погрешность измерения усилий резания	$\approx \pm 1\%$
4. Среднее энергопотребление (без фрезерования): а) за 1 ч работы б) на 1 образец – спил дерева	$\approx 0,025$ кВт $\approx 0,67/0,039$ Вт
5. Источник питания (тип, напряжение)	Постоянный ток (аккумулятор), 12 В
6. Рабочий диапазон температур	0...50 °C
7. Масса нетто (зависит от длины станины – хода каретки)	10...18 кг

Поскольку не был теоретически исследован процесс элементарного резания древесины в торец, то исходя из возможного ассортимента мотор-редукторов серии IG и шарико-винтовых передач были подобраны максимальная и минимальная скорости надвигания (подачи) резца на образец (2,1 и 50,0 мм/с) и передаточное число редуктора (53 и 19 соответственно). В табл. 3 дробные величины также соответствуют минимальной и максимальной скорости надвигания.

Таким образом, точность (табл. 3, п. 1, б) разработанного устройства не уступает прямому аналогу – «Линтабу» и удовлетворяет требованиям к точности, которые установлены для дендрохронологических исследований. Использование электроприводов совместно с источниками постоянного тока (12 В) в виде аккумуляторов или генераторных станций на жидком топливе позволяет проводить исследования в полевых условиях, т. е. повышаются автономность и мобильность. Предварительная стоимость прибора – не более 250 тыс. р.

К недостаткам разработанного нами и рассмотренных в данной работе устройств относится необходимость получения образцов, т. е. применение разрушающего воздействия на древесину.

Заключение

Основное предназначение разработанного устройства – выполнение дендрохронологического анализа и макроскопических исследований древесины. Результатами поиска, анализа и синтеза технических решений являются снижение стоимости прибора ориентировочно до 250 тыс. р., повышение автономности и мобильности дендрохронологических исследований, увеличение надежности работы за счет упрощения конструкции.

Устройство позволяет исследовать силовые характеристики процесса резания древесины. В сравнении с существующими установками для измерения усилий элементарного резания оно не только определяет три основные составляющие силы резания: касательную, радиальную и боковую, но и обладает повышенными точностью ($\pm 1\%$) и дискретностью (0,26...0,012 мм) измерений. Применение современных высокоточных компонентов в измерительной схеме и программного обеспечения уменьшает продолжительность и упрощает процедуру преобразования, записи, обработки данных.

Для внедрения полученных результатов в практику необходимо провести работы по реализации устройства в технической части и созданию прикладной программы с удобным пользовательским интерфейсом и широким набором функциональных возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Датчики силы сжатия/растяжения. Модель 8524 (Pdf-файл) // Измерительное оборудование Buster. Режим доступа: http://www.burster-m.ru/pdf_burster/8524.pdf (дата обращения: 25.01.2019). [Sensors of Compression/Tension Force. Model 8524. *Measuring Equipment Buster*. 2019].
2. Датчики Холла для мотор-редукторов серии RA, RB и IG // ООО «Электропривод». Режим доступа: <http://electroprivod.ru/encoder.htm> (дата обращения: 25.01.2018). [*Hall Effect Sensors for Gear Motors of the RA, RB and IG Series*. LLC “Elektroprivod”].

3. Заявка 2016129574 Российская Федерация, МПК G01N 3/58. Способ и устройство для измерения усилий элементарного резания / Чернов В.Ю., Магальяс Н.А., Цой О.В., Малтакова Е.В., Кузьмина А.В.; заявители: Чернов В.Ю., Малтакова Е.В., Кузьмина А.В. № 2016129574; заявл. 19.07.2016, опубл. 24.01.2018. [Chernov V.Yu., Magalyas N.A., Tsoj O.V., Maltakova E.V., Kuzmina A.V. *Method and Device for Measuring Forces of Simple Cutting*. Patent Application RF, no. 2016129574, 2018].

4. Любченко В.И., Суханов В.Г. Лабораторный практикум по резанию древесины и дереворежущему инструменту: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2004. 28 с. [Lyubchenko V.I., Sukhanov V.G. *Laboratory Practicum on Wood Cutting and Wood Cutting Tools: Educational Textbook*. Moscow, MGUL Publ., 2004. 28 p.].

5. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 139 с. [Matveyev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrochronology: Educational Textbook*. Voronezh, VGLTA Publ., 2013. 139 p.].

6. Методические рекомендации по криминалистической экспертизе объектов растительного происхождения / отв. ред. М.И. Розанов. М.: ВНИИСЭ, 1972. 21 с. [Instructional Guidelines for Criminalistics Expert Examination of Objects of Plant Origin. Editor in Chief M.I. Rozanov. Moscow, VNIISE Publ., 1972. 21 p.].

7. Мотор-редукторы: Мотор-редуктор IG-52GM (Pdf-файл) // ООО «Электропривод». Режим доступа: <https://electroprivod.ru/pdf/shayang/IG-52GM.pdf> (дата обращения: 25.01.2018). [Gearmotors. *Garmotors Manufactured by SHAYANG YE INDUSTRIAL: Gearmotor IG-52GM*. 2002–2019. LLC “Elektroprivod”].

8. Санёв В.И., Сергеевичев А.В. Основы резания древесины: лаб. практикум. СПб.: СПбГЛТА, 2007. 87 с. [Sanev V.I., Sergeyevich A.V. *Wood Cutting Basics: Laboratory Practicum*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2007. 87 p.].

9. USB-6008. Многофункциональное устройство ввода-вывода // National Instruments]. URL: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/202751> (дата обращения 25.01.2018). [National Instruments. Products: Multifunctional Input-Output Device USB-6008. 2018].

10. Den Bulcke J.V., Wernersson E.L.G., Dierick M., Loo D.V., Masschaele B., Brabant L., Boone M.N., Hoorebeke L.V., Haneca K., Brun A., Hendriks C.L.L., Acker J.V. 3D Tree-Ring Analysis Using Helical X-Ray Tomography. *Dendrochronologia*, 2014, vol. 32, iss. 1, pp. 39–46. DOI: [10.1016/j.dendro.2013.07.001](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.07.001)

11. Dukpa D., Tenzin K., Krusic P.J., Khandu Y., Wangchuk S. *Dendrochronology Manual*. Bumthang, Bhutan, UWICE Press, 2017. 44 p.

12. Nasswettrová A., Křivánková S., Šmíra P. Comparison of the Results of Dendrochronological Measuring Based on Different Images of a Historical Wood Sample of Silver Fir (*Abies alba*) from the Czech Republic. *Wood Research*, 2017, vol. 62(1), pp. 113–124.

13. Rinn F. *TSAP-Win – Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications, TSAP-WIN Version 4*, 64. RinnTech, 2011, pp. 24–25.

14. Rinn F. Practical Application of Micro-Resistance Drilling for Timber Inspection. *Holztechnologie*, 2013, vol. 54, pp. 32–38.

15. Speer J. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson, University of Arizona Press, 2012. 360 p.

16. UseScience System. Wood Density Measuring System LignoStation. RinnTech. Available at: <https://scientificservices.eu/item/wood-density-measuring-system-lignostation/3573> (accessed 13.05.2019).

17. Zeller L., Ammer Ch., Annighöfer P., Biber P., Marshall J., Schütze G., del Río Gaztelurrutia M., Pretzsch H. Tree Ring Wood Density of Scots Pine and European Beech Lower in Mixed-Species Stands Compared with Monocultures. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 400, pp. 363–374. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.06.018](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.018)

A DEVICE FOR DENDROCHRONOLOGICAL ANALYSIS

V.Yu. Chernov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [X-4439-2019](#),
ORCID: [0000-0001-9496-7340](#)

O.V. Tsoy, Master; ORCID: [0000-0001-8028-2201](#)

N.A. Magalyas, Master; ORCID: [0000-0002-4940-8918](#)

M.S. Chernova, Postgraduate Student; ResearcherID: [X-4073-2019](#),
ORCID: [0000-0002-0192-5158](#)

Volga State University of Technology, pl. Lenina 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic,
424000, Russian Federation; e-mail: Chernov.vas7936@yandex.ru, lelik-ha4@mail.ru,
mashael0906@mail.ru

Many techniques and devices for dendrochronological analysis of wood have been developed since the 70s of the 20th century. They are mainly based on the technical solutions proposed by B. Eklund. Currently used methods are based on the contour analysis of annual rings on cross sections of wood by the means of optical magnifying devices. Despite the engineering superiority and high cost, modern equipment has significant weaknesses related to measurement accuracy, work autonomy, and analysis duration. The research purpose is to eliminate the weaknesses by synthesis of engineering solutions and development of a new device. The new device was based on principle of measuring the forces of simple translational end-grain cutting and width determination of annual rings since the power parameters of mechanical cutting are closely related to the wood properties and structure. The device cost was reduced approximately to 250 thousand rubles, its reliability was increased by design simplifying and using simple measuring components, autonomy, and mobility of dendrochronological analysis as a result of the conducted work. The developed device has high accuracy ($\pm 1\%$) and measuring resolution (0.26...0.012 mm). It can find application in dendrochronological analysis through studies of macroscopic structure of wood and power parameters of wood cutting.

For citation: Chernov V.Yu., Tsoy O.V., Magalyas N.A., Chernova M.S. A Device for Dendrochronological Analysis. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 158–166. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.158

Keywords: dendrochronological analysis of wood, macrostructure, simple progressive wood cutting, power action parameters of wood cutting, accuracy and resolution of measurements.

Поступила 31.03.18 / Received on March 31, 2018



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.084.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167

**ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ
ЛИГНОСУЛЬФОНОВЫХ КИСЛОТ С КАТИОНАМИ ЖЕЛЕЗА***Ю.Г. Хабаров, д-р хим. наук, проф.; ResearcherID: [P-1802-2015](#),**ORCID: [0000-0001-8392-0985](#)**В.А. Вешняков, канд. хим. наук; ResearcherID: [E-3882-2017](#),**ORCID: [0000-0002-8278-5053](#)**Н.Ю. Кузяков, аспирант; ResearcherID: [F-6918-2017](#), ORCID: [0000-0002-2193-5118](#)**Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: khabarov.yu@mail.ru*

Лигносультфонаты и лигносультфоновые кислоты являются основным товарным продуктом на мировом рынке лигнинов, который находит применение в металлургии, добыче полезных ископаемых, производстве бетона, сельском хозяйстве. В обзоре представлены результаты изучения строения и свойств лигносультфонатов, получения и применения комплексов лигносультфоновых кислот с катионами железа. Лигносультфонаты обладают уникальными физико-химическими свойствами, которых нет у других видов лигнинов. При взаимодействии с катионами железа и других биогенных металлов они образуют хелатные комплексы, которые могут быть использованы в сельском хозяйстве для устранения хлороза растений. Это заболевание особенно сильно проявляется примерно на 30 % мировых сельхозугодий с большим содержанием карбоната кальция. С помощью модификации удастся целенаправленно изменять свойства лигносультфоновых кислот и лигносультфонатов. Нитрование и нитрозирование усиливает комплексообразующие свойства, что обусловлено возможностью образования хелатных комплексов с катионами железа. Хелаты железа с нитрованными и нитрозированными лигносультфонатами проявляют сильные антихлорозные свойства. Применение их позволяет полностью нормализовать содержание хлорофилла в фотосинтетических структурах. Модифицированные за счет нитрования и нитроирования лигносультфонаты при синтезе магнитных жидкостей на водной основе проявляют свойства пептизирующего агента, способствующего образованию устойчивых магнитных жидкостей магнетитного типа. Лигносультфонаты оказывают сильное влияние на синтез магнитоактивных соединений с помощью парциального окисления катионов железа(II) хромат ионами или аммиаком гидроксида серебра. В первом случае образуется компактное магнитоактивное соединение, во втором – магнитная жидкость (если конденсация проводится в присутствии тетраалкиламмониевых гидроксидов).

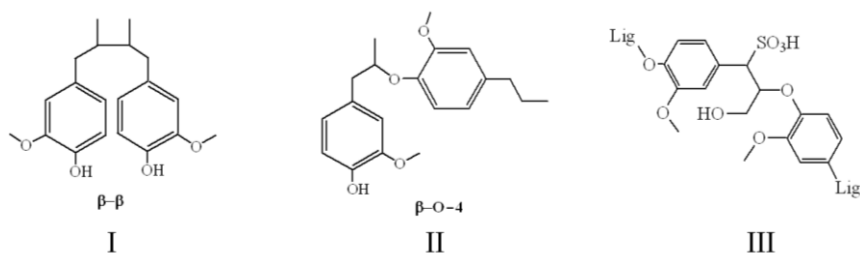
Для цитирования: Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Кузяков Н.Ю. Получение и применение комплексов лигносультфоновых кислот с катионами железа // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 167–187. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167

Ключевые слова: лигносультфоновые кислоты, лигносультфонаты, их свойства и применение, железо, хелаты, электрохимический синтез, гальванохимический синтез, нитрование, нитрозирование, магнитные жидкости, хлороз растений.

Объем производства сульфитной целлюлозы в мире составляет всего несколько процентов, однако лигносульфонаты являются основным товарным продуктом на рынке технических лигнинов [41]. Свойства и применение лигносульфонатов (LS) и лигносульфовых кислот (LSA) широко изучаются в настоящее время. Примерами недавних исследований применительно к различным отраслям от металлургии до сельского хозяйства являются работы [48, 61, 81, 89, 91, 92].

Сельское и лесное хозяйство – одно из важных направлений использования LS. Сульфитные щелока позволяют готовить качественные, хорошо сохраняющиеся корма для животных [25]. Порошкообразные LS улучшают гранулирование комбикормов и не оказывают негативного воздействия при скормливании животным, птице и рыбе [22]. LS могут использоваться при производстве крупнотоннажных минеральных удобрений, в том числе калийных, азотных и фосфорных [77].

LSA представляют собой многофункциональный полидисперсный ароматический полимер нерегулярного строения. Структурными единицами всех лигнинов являются *p*-гидроксифенильные, гваяцильные и сирингильные, связанные несколькими типами углерод–углеродных и простых эфирных связей, например β – β (схема I) или β –O–4 (II). Сульфирование лигнина при сульфитной варке целлюлозы протекает не в ароматических ядрах, а в пропановой цепочке у углеродных атомов α -, β - или γ -положений. В большей степени оно происходит у α -углеродного атома (III).



Сульфогруппы придают LSA поверхностную активность, сильные кислотные свойства, растворимость в водных растворах в широком диапазоне pH, способность образовывать комплексы с катионами металлов. Изучение элементного и функционального состава LSA различного происхождения обобщено в ряде монографий, например в [12].

Рассматривая свойства, необходимо учитывать молекулярную массу и конформации макромолекул в растворах, так как эти факторы определяют стерическую доступность функциональных групп. Теоретические представления о строении гибкоцепных полимеров являются основой большого числа моделей, описывающих структуру макромолекул LSA с учетом их полидисперсности и функциональной неоднородности. Кроме того, в работе [8] рассматривается строение макромолекул лигносульфонатов как жесткоцепных полимеров.

Одной из первых моделей LSA являлась модель макромолекулы нитеобразной формы [1]. Затем появился целый ряд работ, посвященных этой тематике, в которых LSA представляются как нитеобразные макромолекулы с разветвлениями, сферические или дискообразные микрогели, компактные микросферы, эллипсоидальные структуры с короткими отходящими цепями,

нежесткие разветвленные полимеры, сольватированные и случайным образом свернутые в вытянутые сфероиды или компактные несвободно-протекаемые, частично набухающие микрогели.

Конформация LS в растворе является средней между сферой Эйнштейна и несвободно-проницаемой спиралью. В работе [73] высказана гипотеза о том, что макромолекулы LS представляют собой случайно разветвленный поли-электролит.

Гупта и Маккарти [51] с использованием вискозиметрии определили диаметр молекул LS натрия ($M_w = 1 \dots 60$ кДа): 1,0...6,9 нм в дистиллированной воде и 0,7...3,7 нм в 0,1 М растворе NaCl. Это соответствует размерам, вычисленным по седиментационным данным (4,9 нм). С помощью лазерной корреляционной спектроскопии установлено, что размер большинства макромолекул LS не превышает 4,5 нм [5], а присутствие частиц с размером до 150 нм объясняется ассоциацией [6].

Потребительские свойства LS зависят от химического строения, функциональных групп и молекулярной массы. Например, диспергирующие свойства усиливаются при увеличении молекулярной массы LS [20]. Диапазон молекулярных масс LS в основном составляет от 2 до 150 кДа [52, 53].

Для использования лигнинов часто требуется функционализация. Реакция LSA с катионами железа имеет как научное, так и практическое значение для получения ценных продуктов.

Комплексообразование. Катионы переходных металлов, реагируя с LSA, образуют комплексы [14], что приводит к изменению их конформации и функционального состава. В составе комплекса конформация макромолекул из гибкой структуры изменяется на жесткую, сетчатую [7].

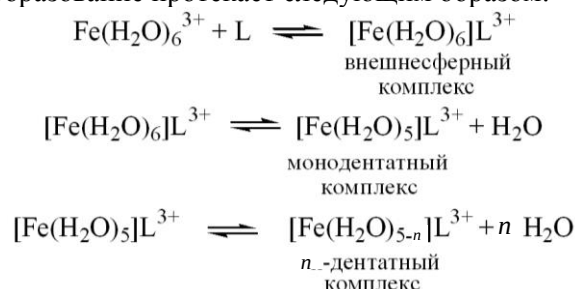
При введении солей Fe(III) в раствор LS отмечается снижение pH с 5 до 2. В растворе комплекс находится практически в изоэлектрическом состоянии, значительно уменьшается скорость электрофореза. После растянутой во времени скрытой стадии, когда комплекс высокомолекулярных фракций LS находится в растворе, наступает стадия коагуляции из-за снижения устойчивости коллоидных растворов [7].

Гангарчик [22] синтезировал комплексное соединение LS с катионами железа и отметил, что катион железа в нем находится в слабо- и прочносвязанной форме. В слабосвязанном комплексе роль лиганда выполняют фенольные группы.

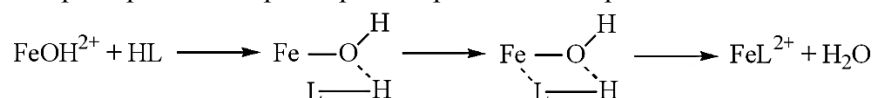
Спектрофотометрическое изучение систем Fe(II)–LS и Fe(III)–LS [36] показало, что катионы Fe(II) не влияют на электронные спектры раствора LS, что указывает на отсутствие значимого комплексообразования. В реакции с катионами Fe(III) электронные спектры значительно изменяются, однако седиментационная устойчивость комплекса невелика и с повышением pH он разрушается.

Взаимодействие Fe(III) с фенолами приводит к получению комплексов, состав и константы устойчивости которых зависят от соотношения реагентов, pH, температуры и строения фенола. Комплексообразование полимерных лигандов с ионами металлов отличается тем, что оно проходит ступенчато и по мере протекания реакции микроокружение функциональных групп и конформация полимерного лиганда изменяются [32]. Высокомолекулярные лиганды, являясь полидентатными, открывают дополнительные возможности при получении водорастворимых соединений Fe(III) в широком диапазоне pH среды

[24]. В водных растворах в соответствии с гипотезой Эйджена и Вилкинса [46] комплексообразование протекает следующим образом:



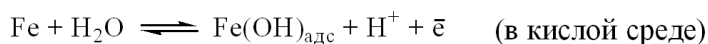
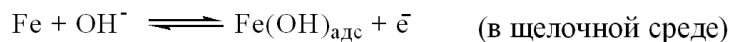
Механизм включает быстрое образование ионной пары, а скорость определяется стадией вытеснения лигандом (L) первой молекулы воды из внутренней координационной сферы металла. Приведенная схема может усложняться под влиянием свойств лиганда. Скорость взаимодействия органических лигандов с FeOH^{2+} больше, чем с Fe(III) , так как гидролиз ($\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeOH}^{2+} + \text{H}^+$) протекает быстрее, чем комплексообразование [49, 68, 69], которое проходит через перенос протона в интермедиате:



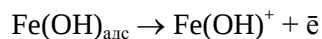
LS как высокомолекулярные лиганды, имеющие различные функциональные группы, взаимодействуют с катионами железа по более сложным механизмам.

Электрохимические методы позволяют функционализировать лигнин, вводя в его структуру различные функциональные группы [10, 11, 72]. В сульфитцеллюлозном производстве электрохимическая обработка щелоков рассматривалась как путь решения проблемы регенерации химикатов и очистки сточных вод. В зависимости от условий электролиз приводит к значительным изменениям LS, при электрохимическом воздействии может протекать как деструкция, так и конденсация макромолекул LS.

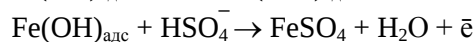
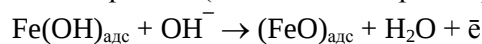
Особенности анодного растворения железа. В реальных системах анодное растворение может отличаться от теоретического представления процесса из-за кинетических особенностей, так как устанавливаются не равновесные, а стационарные потенциалы, зависящие от природы металла и условий электрохимического процесса. Анодное растворение железа определяется температурой, диффузией, наличием пассиваторов и депассиваторов в составе электролита [40]. Первой стадией растворения железа является равновесная адсорбция ионов OH^- на железе:



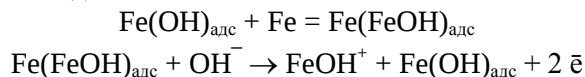
Окисление Fe(0) – вторая стадия, которая может протекать по простому механизму:



или с участием анионов в электролите (для щелочных растворов):



В кислой среде в последующих стадиях растворения железа могут участвовать еще один атом железа и гидроксильный ион, при этом происходит регенерация исходного комплекса:



Образование комплексных интермедиатов может осуществляться с участием других анионов [85]. При анодном окислении железо переходит в раствор в виде катиона Fe(II). Причиной присутствия в растворе катиона Fe(III) является окисление катиона Fe(II) или образование его непосредственно в анодном процессе. Процессы анодного растворения и катодного осаждения металлов группы железа необратимы. Уменьшить негативное влияние этого можно механическим обновлением поверхности анода или сильным повышением температуры и давления, благодаря которому относящиеся к ионам металла анодные и катодные процессы очень сильно ускоряются [26].

Кроме электрохимического механизма, растворение железного анода может протекать по химическому механизму. Вид металла, температура, приложенное на электроды напряжение и состав электролита определяют соотношение скоростей этих процессов. Этим объясняется нарушение закономерностей электрохимической кинетики при растворении железа. Наиболее характерными признаками химического механизма растворения металла являются независимость скорости процесса от потенциала и отсутствие фарадеевского соответствия между количеством пропущенного электричества и количеством растворившегося металла [23]. Скорость анодного растворения металла зависит от его электрохимической обрабатываемости в растворе электролита [15], условий конвективной диффузии катионов металла и анионов соли [9], а также от действия внешнего магнитного поля и пластической деформации анода [50]. Активирующая способность анионов специфична для каждого металла. Кроме того, активирующее действие на анодное растворение железа при pH 2...4 оказывает растворенный кислород и кислородсодержащие окислители.

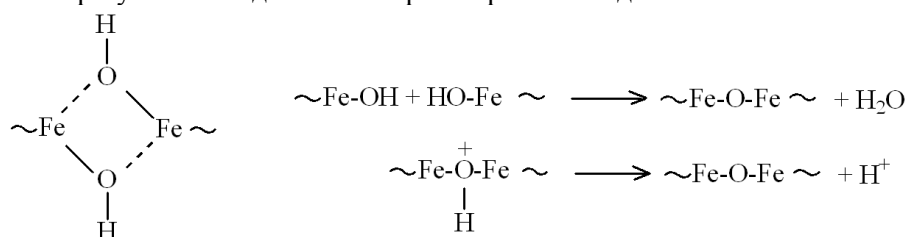
Пассивирующее действие анионов обычно связано с их окислительной способностью, а иногда с образованием защитных слоев на поверхности анодно-растворяющегося металла [60]. Пассиватором анодного растворения железа служат небольшие количества гидроксид- и нитрат-ионов, активатором – хлорид- и сульфат-ионы, влияние которых изменяется в зависимости от pH среды.

Значение катионов железа в жизнедеятельности растений и пути устранения его дефицита. Среди микроэлементов, незаменимых для нормального развития растений (Fe, Zn, Co, Cu, Mo, B), железо является одним из самых важных [79]. По сравнению с катионами многих металлов катион Fe(III) образует более стабильные комплексы и участвует в окислительно-восстановительных реакциях, определяющих фотосинтез и дыхание растений [13].

В естественных условиях дефицит микроэлементов у растений часто наблюдается на засоленных и карбонатных почвах с высокой концентрацией бикарбонат-анионов в почвенном растворе [65] и pH 7,5...8,5 [67]. Если почва хорошо аэрируется, то Fe(II) будет окисляться. Катионы Fe(III) осаждаются в виде нерастворимых гидроксидов в кислой среде при pH выше 3. Поэтому в

карбонатных почвах железо находится в виде нерастворимых соединений и недоступно для питания растений.

Нерастворимые соединения биогенных металлов образуются при оляции и оксоляции. Оляция – обратимое образование биядерных гидроксокомплексов за счет гидроксильных мостиков. Необратимая оксоляция происходит в результате дегидратации, отщепления протона от гидроксомостика, роста полимерных цепочек и конденсации их в трехмерные структуры. При оксоляции образуются сферические частицы с минимальной поверхностной энергией Гиббса, стерической защитой оксогрупп и высокой степенью координации атомов кислорода, связывающих полимерные цепочки. Полимер построен из структурных октаэдрических единиц Fe (O, OH, H₂O), соединенных друг с другом ребрами или вершинами. Связующие звенья – оксо- или гидроксомостики. В результате выделяются нерастворимые соединения железа.



Главной причиной такого заболевания растений, как карбонатный хлороз, является недостаток доступных форм железа. Кроме того, ему может сопутствовать недостаток меди, марганца, цинка и других микроэлементов.

Однако в почве с высоким содержанием карбоната кальция (CaCO₃) эти элементы питания недоступны для растений. Подробное рассмотрение вопросов биохимических превращений, нарушения функций и структуры хлоропластов при карбонатном железодефицитном хлорозе проведено в обзоре [17]. Карбонатный хлороз – болезнь железной недостаточности, приводящая к пожелтению листьев и снижению урожайности из-за уменьшения концентрации фотосинтетического пигмента [37], он проявляется более чем на 30 % сухопутной поверхности Земли [70]. Карбонатные почвы в аридных и полуаридных климатических зонах составляют значительную часть сельхозугодий, и хлороз появляется у выращиваемых растений, в особенности у многолетних [16]. Плодовые деревья, ячмень, кукуруза, сорго, соя, фасоль очень чувствительны к высокому уровню карбонатности почвы. По мнению американских исследователей, карбонатный хлороз является проблемой мирового масштаба [70]. Борьба с хлорозом очень важна для тех регионов, где содержание CaCO₃ в почве составляет 10...20, а иногда и 60 % [17]. У некоторых растений хлороз проявляется уже при содержании карбоната кальция 10 % [62]. В России карбонатный хлороз распространен в Поволжье, Крыму. Внесение микроэлементов требуется на 95 % из обследованных в России 40 млн га сельскохозяйственных угодий [34].

Начиная с середины XIX в., для устранения хлороза стали использовать внекорневую обработку растений разбавленными растворами солей железа, однако эффективность этого метода невелика. Неэффективно также и внесение в почву неорганических солей железа, так как железо переходит в нерастворимую и недоступную для растений форму. Лучшие результаты достигаются с помощью железных солей органических кислот. Наиболее эффектив-

ными препаратами при лечении карбонатного хлороза растений являются комплексоны металлов [47, 88].

На состояние соединений биогенных металлов в почве влияет уровень pH и окислительный потенциал (E_h), при высоких значениях которых ионы осаждаются в виде трудно растворимых гидроксидов. В песчаных почвах, бедных органическим веществом, биогенные металлы находятся в виде ионов. Большинство микроэлементов, особенно железо и медь, образуют комплексные соединения с гуминовыми кислотами, корневыми выделениями растений, продуктами деятельности почвенных микроорганизмов, например аминокислотами [43].

Для растений в качестве источников железа в почве выступают содержащие железо продукты разложения растительных и микробных остатков, а также прочные комплексы с гуминовыми кислотами и сидерофорами. Например, феррихром – сидерофор на основе гидроксамовых кислот, образует Fe-комплекс с константой стабильности 29,1 [78]. Содержание сидерофоров гидроксаматного и фенолятного типов в обычных почвах достаточно велико.

Катионы железа легко участвуют в оксид-превращениях. В почве наблюдается подвижное равновесие Fe(II)/Fe(III), зависящее от pH и E_h почвы. Fe(OH)₃ осаждается при pH около 3. Так как Fe(II) и другие металлы образуют гидроксиды при более высоких значениях pH, то Fe(III) выводится из почвенного раствора раньше других металлов. В корневую систему растений железо поступает в виде Fe(II) [4]. Катионы других биогенных металлов за счет конкуренции с железом за лиганды могут подавлять его поступление.

Синтез комплексов LSA с катионами железа для борьбы с хлорозом.

Комплексоны на основе синтетических комплексонатов имеют большую стоимость и не всегда биоразлагаемы. Поэтому важными являются исследования, направленные на разработку биоразлагаемых комплексонов [87]. Комплексы LSA и LS с биогенными металлами могут быть использованы в различных отраслях сельского хозяйства [33]. Микроудобрения на основе LSA и LS представляют собой комплексы с катионами биогенных металлов. Синтез железных производных LSA можно осуществить различными способами [74, 75].

Синтез железозлигносульфонатного хелата из ЛСК и оксида Fe(III) был предложен Беннетом [42]. Содержание железа в комплексонате достигает 5 %. Железистый комплекс, полученный по способу [84], устраняет хлороз, стимулирует биосинтез хлорофилла в листьях. Применение смеси из тонко измельченной чугушной стружки, LS кальция и глюкогептоната натрия ускоряет рост растений на карбонатных почвах [58].

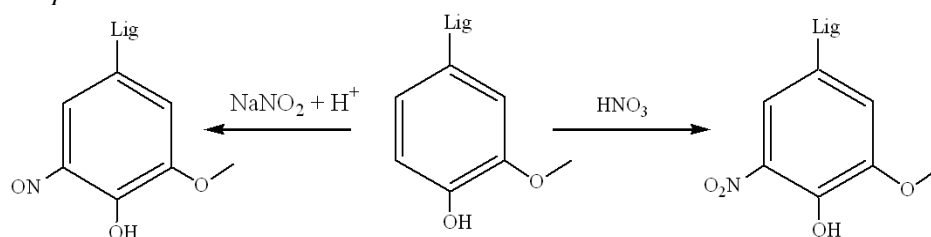
Гранулированная смесь гумата железа (80 %) и LS железа (20 %) является эффективным удобрением [86]. Другой способ синтеза железозлигносульфонатного комплекса осуществляется путем смешения водного раствора сульфата железа(II) и предварительно приготовленного в 10 %-м растворе NaOH раствора LS кальция [21]. LS аммония являются эффективным удобрением для овса и ржи [66], а их железный комплекс успешно устраняет хлороз при внекорневой обработке фруктовых деревьев [33]. По способу [83] стабилизированные LS железа получают путем медленного добавления при повышенных температурах раствора FeSO₄ к подготовленному раствору сульфитного щелока.

Обычно в устойчивой к щелочной среде форме железолignoсульфонатного комплекса содержится до 5...6 % железа. Увеличить емкость комплексов по отношению к железу и их устойчивость в нейтральных и щелочных растворах можно, подавив процессы оляции и оксоляции.

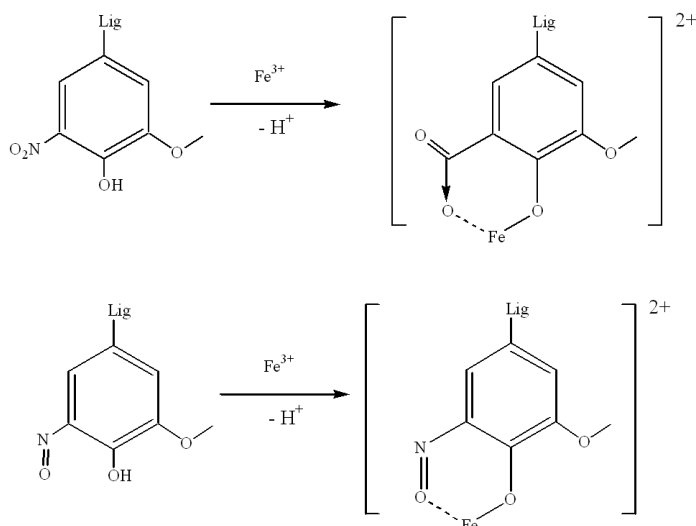
Катионы железа способны к разнолигандной координации, поэтому, если на стадии синтеза в реакционную систему вводить лиганды, замещающие часть молекул воды в координационной сфере катиона железа, можно предотвратить оляцию и оксоляцию. Например, применение сульфит-анионов при синтезе железолignoсульфонатного комплекса позволило существенно увеличить емкость по железу без потери растворимости [3].

Эффективным путем повышения комплексообразующих свойств LS является рост дентатности и способности к хелатообразованию, за счет чего они занимали бы несколько мест в координационной сфере катиона. Циклические структуры (хелаты) легко образуются в том случае, когда циклы состоят из 5 или 6 атомов.

Для реализации этого подхода использованы нитрозирование [28, 30] или нитрование [18, 31] LSA. Обе реакции проходят в мягких условиях и относятся к реакциям электрофильного замещения атомов водорода бензольного ядра. В фенилпропановых единицах лигнина со свободными фенольными группами нитрозо- (NO) или нитрогруппы (NO₂) появляются преимущественно в *орто*-положении:



Такие структуры легко образуют хелатные комплексы с катионами железа:



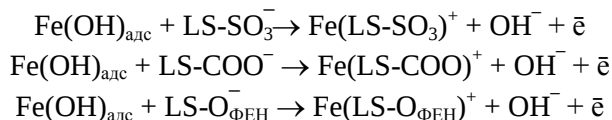
Нитрозирование [28] или нитрование [18, 56] позволяет значительно увеличить устойчивость комплексов в щелочной среде и емкость модифицированных LSA по отношению к катионам биогенных металлов. В зависимости

от расхода реагентов емкость нитрозированных LSA достигала 30...40 % (железа от массы LS), у нитрованных LS – 60 %.

В составе комплексов, полученных химическими способами, содержатся балластные ионы, не усваиваемые растениями. При внесении в почву они будут оказывать негативное влияние на растения. Свести к минимуму содержание балластных ионов в комплексе можно, если проводить реакцию LSA с гидроксидами железа. Необходимо, чтобы все реагенты не приносили экологического вреда и ассимилировались растениями. Идеальным можно считать синтез, исключая введение в конечный продукт балластных соединений. Синтез железолignoсульфонатного хелата из лигносульфоновых кислот и оксидов и гидроксидов биогенных металлов отвечает этим требованиям. Однако у большинства биогенных металлов оксиды и гидроксиды являются труднорастворимыми веществами, получение их в чистом виде затратно, а растворение в лигносульфонатных растворах проходит с большим трудом.

Перевести металлическое железо в раствор можно в результате анодного растворения [35]. При реализации этой концепции возможно два варианта процесса: анодное растворение под действием внешнего источника напряжения и под действием напряжения, возникающего в короткозамкнутой гальванической паре, в которой железо выступает в качестве анода, а катодом служит материал с более высоким, чем у железа, стандартным электрохимическим потенциалом. Преимущество гальванохимического синтеза – отсутствие внешних источников энергии и экономичность, электрохимического – высокая производительность.

При анодном растворении железа в переносе электронов могут участвовать также полианионы LS:



В процессе электрохимического синтеза может происходить окислительно-радикальное сочетание LS, и на поверхности анода депонируется пленка высокомолекулярных продуктов, в результате чего скорость растворения железа резко снизится. Можно ускорить анодный и катодный процессы, повысив температуру или обновив поверхность анода.

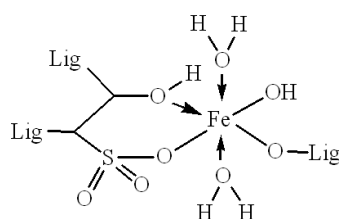
На начальных стадиях электросинтеза LSA не окисляются. Условия для окисления LS создаются по мере углубления электрохимической обработки, в результате чего LS могут адсорбироваться на аноде, а катионы железа – участвовать в редокс-превращениях.

Наряду с низкомолекулярными анионами LS полианионы могут участвовать в окислительно-восстановительных процессах, осуществляя перенос электронов. При электролизе в растворе LS в результате одноэлектронного окисления образуются свободные радикалы, при рекомбинации которых увеличивается молекулярная масса продуктов.

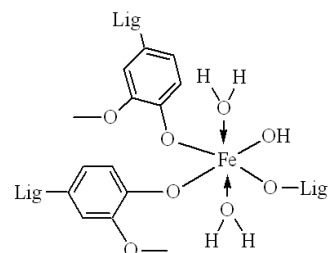
В растворах LSA с низкими значениями pH электрохимическая подвижность протона высока, поэтому скорость растворения анода намного выше, чем в растворах LS. В этих условиях возможно образование активных феноксильных катионов за счет последовательного переноса 2 электронов и накопление в продукте низкомолекулярных соединений, которые появляются

в результате расщепления простых эфирных связей под действием фенок- сильных катионов.

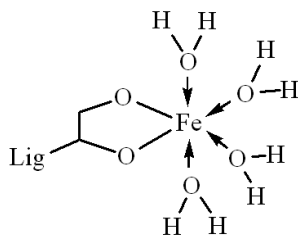
Катионы железа в растворе LSA будут координировать с различными лигандами, как низкомолекулярными (молекулы воды, гидроксид-анионы, сульфат-анионы), так и самими лигносульфовыми кислотами с участием спиртовых и фенольных гидроксильных групп, карбоксильных и сульфо- групп [80]. Координационное число катионов Fe^{+2} и Fe^{+3} равно 6, поэтому строение фрагментов LS железа можно представить следующими схемами:



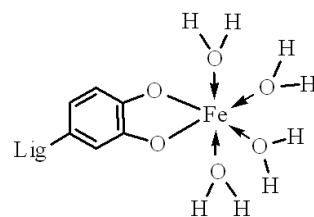
IV



V



VI



VII

При проведении экспериментов с постоянным током анодный ток быстро снижается и на аноде образуется пленка, что приводит к прекращению анодного растворения железа [19]. Для решения этой проблемы анодное растворение проводили при изменении полярности электродов. Экспериментально установлено, что оптимальная величина периода переключения полярности электродов (ПППЭ) в растворе LS уменьшается с увеличением продолжительности электролиза и температуры. При температуре 80 °C через 20 мин ПППЭ для раствора LS необходимо уменьшить с 40 с до 14...20 с, для раствора LSA этот параметр остается неизменным – 7...8 с.

В гальванохимическом процессе [29] растворение железа происходит в результате работы короткозамкнутых гальванических пар, в которых железо выступает в качестве анода, медь – катода. Образовавшиеся ионы железа переходят в раствор LS или LSA, образуя комплексные соединения с присутствующими в растворе молекулами или анионами. Часть освободившихся электронов перемещается к катоду. Анодное растворение железа будет происходить, если электроны, перешедшие на катодный материал, будут с него удаляться. Отвод электронов с катода (деполяризация) осуществляется при участии веществ-деполяризаторов. Наиболее известны водородная и кисло-

родная деполяризации. Водородная деполяризация встречается в растворе LSA, кислородная – в растворе LS. В кислородной деполяризации участвует растворенный в электролите молекулярный кислород. Схема короткозамкнутого гальванического элемента и реакций, протекающих на электродах, приведены в таблице.

Характеристика короткозамкнутого гальванического элемента и электродных процессов

Деполяризация	Схема короткозамкнутого гальванического элемента	Уравнение реакций	
		на аноде	на катоде
Водородная	$A(-) Fe LSA Cu(+) K$	$Fe - 2 \bar{e} \rightarrow Fe^{2+}$	$2 H^+ + 2 \bar{e} \rightarrow H_2 \uparrow$
Кислородная	$A(-) Fe LS, H_2O, O_2 Cu(+) K$	$Fe - 2 \bar{e} \rightarrow Fe^{2+}$	$2 H_2O + O_2 + 4 \bar{e} \rightarrow 4 OH^-$

Исследования, проведенные в динамическом и статическом режимах, показали сходные тенденции. Наиболее эффективно гальванический процесс происходит в динамическом режиме при использовании пары Fe–Cu при повышенных температурах в растворе LSA. Растворение железа при синтезе железозинкосульфатного хелата является гетерогенным процессом, включающим как химический, так и гальванохимический процесс. За 4 ч синтеза в раствор LS переходит примерно 2 %, а в раствор LSA – 10 % металлического железа. При синтезе в растворе LSA влияние температурного фактора проявляется примерно в 5 раз сильнее, чем в растворе LS. Комплексы, синтезированные с помощью электро- и гальванохимических методов, оказались эффективными средствами для устранения хлороза растений, произрастающих на карбонатных почвах. За небольшой промежуток времени фотосинтетический аппарат растения приходит в норму, увеличивается масса до урожайности, получаемой при выращивании растений на здоровой почве.

Синтез магнитоактивных соединений. Синтез магнитоактивных соединений является еще одним направлением применения LSA. К настоящему времени результаты этих исследований не вошли в монографии и обзоры. Известно, что все вещества, помещенные в неоднородное магнитное поле, взаимодействуют с ним [82]. Одни (диамагнитные) тела выталкиваются из поля, другие (парамагнитные) втягиваются в него. Магнитное поле в отличие от электрического не влияет на покоящийся электрический заряд, а взаимодействует только с движущимся зарядом. Движущиеся вокруг ядра электроны придают атому свойства маленького магнита. Величина и направление намагничивания атома характеризуются магнитным моментом, который направлен по оси вращения и пропорционален скорости движения и радиусу вращения заряда. Магнитный момент определяется орбитальным вращением и спиновым эффектом электрона. У многоэлектронных систем суммарный магнитный момент является векторной суммой отдельных магнитных моментов.

В отличие от диамагнетиков атомы и молекулы парамагнитных веществ имеют неспаренные электроны, которые создают некомпенсированные магнитные поля. В обычных условиях вследствие хаотического теплового движения атомов суммарный магнитный момент парамагнитного вещества равен нулю, магнитные свойства вещества проявляются лишь при воздействии внешнего магнитного поля, когда происходят частичная ориентация атомов и сложение их магнитных полей с внешним полем. Тепловое движение препят-

ствуется этому, в результате парамагнетизм уменьшается с ростом температуры. Среди парамагнетиков имеются ферромагнитные вещества, которые обладают нескомпенсированными магнитными полями, создаваемыми отдельными электронами, и после прекращения действия магнитного поля сохраняют намагниченность. Ферромагнитные свойства, как правило, характерны для веществ с незаполненными *d*- и *f*-орбиталями. Из-за сильного взаимного влияния атомов наблюдаются параллельное упорядочение соседних спинов электронов и высокая ориентация магнитных полей, сохраняющаяся в отсутствие внешнего поля. Ферромагнитные свойства этих веществ убывают с повышением температуры сначала слабо, а затем все сильнее, и в точке Кюри вещество становится парамагнитным.

В настоящее время большое значение приобрели исследования имеющих широкое практическое применение магнитных жидкостей (МЖ), которые представляют собой стабильные коллоидные системы наноразмерных магнитоактивных частиц с покрытием в жидкости-носителе – дисперсионной среде [38, 71]. МЖ обычно синтезируют в несколько стадий: получение коллоидного раствора магнетита; стабилизация частиц; перевод магнитной жидкости в дисперсионную среду.

Дисперсной фазой МЖ являются магнетит (Fe_3O_4), маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), ферриты некоторых металлов состава MeFe_2O_4 , где $\text{Me} - \text{Ni}^{2+}, \text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$ или Cu^{2+} [64]. В настоящее время широко применяется метод химической конденсации солей Fe(II) и Fe(III) гидроксидами натрия [63] или аммония [2].

Важной особенностью МЖ магнетитного типа на водной основе является безвредность для человеческого организма, поэтому они представляют интерес для использования в медицинских целях [45, 90]. Феррожидкости могут играть значительную роль в диагностике и терапии. Эти материалы интересны в задачах биоанализа, при магнитной сепарации, доставке лекарственных средств, лечение гипертермии, магнитно-резонансной томографии и магнитной маркировке. Из-за контролируемых размеров частицы МЖ могут взаимодействовать с клетками (10...100 мкм), вирусами (20...450 нм), белками (5...50 нм) или генами (2 нм в ширину и 10...100 нм в длину). Это определяет возможности для разработки эффективных МЖ для применения в биомедицине [76].

При синтезе МЖ на водной основе в качестве стабилизаторов используют водорастворимые повехностно активные вещества. Другая существенная особенность состоит в том, что необходимо принимать специальные меры для защиты частиц от окисления в воде. В качестве стабилизатора МЖ на водной основе могут быть использованы LS [44, 74, 75].

Особыми свойствами обладают нитрозированные LSA, которые приобретают свойства пептизатора [28, 39]. Их применение позволяет осуществлять синтез МЖ на основе солей железа(II) [27].

При проведении с помощью щелочных реагентов конденсации раствора, содержащего катионы железа(II) и нитрозированные лигносульфоновые кислоты, выделяется сложный органоминеральный комплекс, в котором происходят окислительно-восстановительные превращения. В результате выпадает осадок крупных частиц магнитоактивного соединения. Затем происходит самопроизвольная пептизация и образуется МЖ с частицами магнитоактивного соединения наноразмерного диапазона.

При нитровании LSA протекает совокупность химических реакций с образованием различных производных, в том числе с нитрогруппами в ароматическом ядре фенилпропановых единиц лигнина. Как и в случае нитрозирования, появление нитрогруппы в *о*-положении по отношению к фенольным гидроксильным группам создает предпосылки для проявления хелатирующих свойств и усиливает комплексообразующие свойства LSA по отношению к катионам железа(II). Синтез нитрованных LSA, обладающих пептизирующими свойствами, при синтезе МЖ магнетитного типа на водной основе необходимо проводить при температуре 25...50 °С в течение 15...60 мин и расходе азотной кислоты не более 0,2 моль HNO₃/г LS, расход Fe(II) должен составлять 0,23...0,27 ммоль Fe(II)/г LS [55]. Относительная магнитная восприимчивость достигает 120...130 г/г Fe. МЖ остается стабильной в течение 2 лет.

LS оказывают влияние на синтез магнитоактивного соединения за счет парциального окисления катионов Fe(II) хромат ионами [57, 59]. В присутствии LS образуется смешанное соединение, обладающее большей магнитной активностью. При синтезе из раствора полностью удаляются токсичные ионы хрома.

Еще одним примером синтеза магнитоактивного соединения за счет парциального окисления катионов Fe(II) аммиаком гидроксида серебра является работа [54]. При проведении реакций окисления и конденсации в присутствии LS и тетраалкиламмониевых оснований образуется устойчивая МЖ, диапазон размеров частиц которой составляет 30...40 нм.

Таким образом, благодаря особенностям строения и функционального состава лигносульфоновые кислоты и лигносульфонаты обладают уникальными физико-химическими свойствами. При взаимодействии с катионами железа они образуют хелатные комплексы, которые могут быть использованы в сельском хозяйстве для устранения хлороза растений, произрастающих на почвах с большим содержанием карбоната кальция. Нитрование и нитрозирование усиливают комплексообразующие свойства, что обусловлено возможностью образования хелатных комплексов с катионами железа. Нитрованные и нитрозированные лигносульфонаты образуют хелаты с катионами железа, проявляющие сильные антихлорозные свойства, что позволяет полностью нормализовать содержание хлорофилла в фотосинтетических структурах растительных клеток. При синтезе магнитных жидкостей на водной основе нитрованные и нитрозированные лигносульфонаты проявляют свойства пептизирующих агентов, способствующих образованию устойчивых магнитных жидкостей магнетитного типа. Лигносульфонаты оказывают сильное влияние на синтез магнитоактивных соединений с помощью парциального окисления катионов железа(II).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авербух С., Жигач К. К вопросу о физико-химических свойствах сульфитных щелоков и лигносульфоновых кислот // Лесохим. пром-сть. 1936. № 9. С. 14–17. [Averbukh S., Zhigach K. To the Issue of Physicochemical Properties of Sulphite Liquors and Lignosulphonic Acids. *Lesohimicheskaya promyshlennost'*, 1936, no. 9, pp. 14–17].

2. А.с. 978860 СССР, МКИ³ А61К 33/26. Рентгеноконтрастное вещество: № 3320141/28-13: заявл. 18.05.1981; опубл. 07.12.1982 / А.Ф. Цыб, И.С. Амосов, Е.Е. Бирик, Н.М. Грибанов, Р.Г. Никитина, М.М. Рожинский, М.К. Кугельмас, К.С. Шаназаров, И.С. Слюсаренко, Е.М. Граник. [Tsyb A.F., Amosov I.S., Bibik E.E.,

Gribanov N.M., Nikitina R.G., Rozhinskiy M.M., Kugel'mas M.K., Shanazarov K.S., Slyusarenko I.S., Granik E.M. *Radiopaque Substance*. Authorship Certificate USSR, no. 978860, 1982].

3. А.с. 988823 СССР, МКИ³ C07G 1/00, C07F 15/02. Способ получения железолигносульфонатного комплекса: № 3282864/23-04: заявл. 23.03.1981; опубл. 15.01.1983 / Ю.Г. Хабаров, Г.В. Комарова, Г.Ф. Прокшин. [Khabarov Yu.G., Komarova G.V., Prokshin G.F. *The Method for Producing Iron-Lignosulfonate Complex*. Authorship Certificate USSR, no. 988823, 1983].

4. Акатнова А.Г., Губарева Д.Н. Почвенные условия, известковый хлороз и корневая система винограда // Почвоведение. 1981. № 8. С. 68–76. [Akatnova A.G., Gubareva D.N. Soil Conditions, Calcinosis and Grape Root System. *Pochvovedenie* [Soviet Soil Science], 1981, no. 8, pp. 68–76].

5. Афанасьев Н.И., Иванова М.И., Форофонтובה С.Д. Гидродинамические свойства лигносульфонатов // Химия древесины. 1993. № 5. С. 42–51. [Afanas'yev N.I., Ivanova M.I., Forofontova S.D. Hydrodynamic Properties of Lignosulfonates. *Khimiya drevesiny*, 1993, no. 5, pp. 42–51].

6. Афанасьев Н.И., Коробова Е.Н., Форофонтובה С.Д., Дятлова О.В. Межмолекулярные взаимодействия в растворах лигносульфонатов // Лесн. журн. 1996. № 1-2. С. 142–148. (Изв. высш. учеб. заведений). [Afanas'yev N.I., Korobova E.N., Forofontova S.D., Dyatlova O.V. Intermolecular Interactions in Solutions of Lignosulfonates. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1996, no. 1-2, pp. 142–148].

7. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М., Соколова А.А., Филиппов Б.С., Мариев А.А., Тиранов П.П., Третьяков С.И., Новожилов Е.В., Гельфанд Е.Д., Селянина Л.И., Борисов Г.В. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с. [Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M., Sokolova A.A., Filippov B.S., Mariyev A.A., Tiranov P.P., Tret'yakov S.I., Novozhilov E.V., Gelfand E.D., Selyanina L.I., Borisov G.V. *Sulphate and Sulphite Liquor Processing: Textbook for Universities*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p.].

8. Бровко О.С., Паламарчук И.А., Макаревич Н.А., Бойцова Т.А. Полимолекулярные характеристики лигносульфонатов натрия, хитозана и полиэтиленполиамин // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 29–36. [Brovko O.S., Palamarhuk I.A., Makarevich N.A., Boitsova T.A. Polymolecular Characteristics of Sodium Lignosulfonate, Chitozane and Polyethylenpolyamine. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2009, no. 1, pp. 29–36].

9. Давыдов А.Д., Кащеев В.Д., Кабанов Б.Н. Закономерности анодного растворения металлов при высоких плотностях тока. I. // Электрохимия. 1969. Т. 5, № 2. С. 221–225. [Davydov A.D., Kashcheyev V.D., Kabanov B.N. Patterns of Anodic Dissolution of Metals at High Current Densities. I. *Elektrokhimiya* [Soviet Electrochemistry], 1969, vol. 5, no. 1, pp. 221–225].

10. Евстигнеев Э.И. Электрохимические реакции лигнина (обзор) // Химия растительного сырья. 2014. № 3. С. 5–42. [Evstigneev E.I. Electrochemical Reactions of Lignin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2014, no. 3, pp. 5–42]. DOI: [10.14258/jcprm.1403005](https://doi.org/10.14258/jcprm.1403005)

11. Коваленко Е.И., Попова О.В., Александров А.А., Галикян Т.Г. Электрохимическая модификация лигнинов // Электрохимия. 2000. Т. 36, № 7. С. 796–802. [Kovalenko E.I., Popova O.V., Aleksandrov A.A., Galikyan T.G. Electrochemical Modification of Lignins. *Elektrokhimiya* [Russian Journal of Electrochemistry], 2000, vol. 36, no. 7, pp. 796–802].

12. Лигнины (Структура, свойства и реакции) / под ред. К.В. Сарканена, К.Х. Людвиг. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 632 с. [Lignins: Occurrence, Formation, Structure and Reactions. Ed. by K.V. Sarkanen, C.H. Ludwig. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 632 p.].

13. Мецлер Д. Биохимия: химические реакции в живой клетке: в 3 т. Т. 3. М.: Мир, 1980. 488 с. [Metzler D. *Biochemistry: The Chemical Reactions of Living Cells*: in 3 vol. Vol. 3. Moscow, Mir Publ., 1980. 488 p.].

14. Морехин М.Г. Лигнино-минеральные хелаты как средство очистки и обессоливания сточных вод // Химия древесины. 1978. № 4. С. 68–71. [Morekhin M.G. Lignine-Mineral Chelates as a Means of Wastewater Purification and Desalination. *Khimiya drevesiny*, 1978, no. 4, pp. 68–71].

15. Мороз И.И., Алексеев Г.А., Водяницкий О.А., Волков Ю.С., Исакова Р.Б., Кузнецов Б.В., Моница М.А. Электрохимическая обработка металлов /под ред. И.И. Мороза. М.: Машиностроение, 1969. 208 с. [Moroz I.I., Alekseyev G.A., Vodyanitskiy O.A., Volkov Yu.S., Isakova R.B., Kuznetsov B.V., Monina M.A. *Electrochemical Processing of Metals*. Ed. by I.I. Moroz. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1969. 208 p.].

16. Островская Л.К. Комплексоны и комплексоны металлов и их значение для питания растений металлами-микроэлементами // Физиология и биохимия культурных растений. 1986. Т. 18, № 6. С. 591–602. [Ostrovskaya L.K. Complexons and Their Significance for Plant Nutrition with Trace Element Metals. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rasteniy*, 1986, vol. 18, no. 6, pp. 591–602].

17. Островская Л.К. Дефицит железа в растениях и фотосинтез // Журн. общей биологии. 1990. Т. 51, № 4. С. 513–527. [Ostrovskaya L.K. Iron Deficiency in Plants and Photosynthesis. *Zhurnal obshchey biologii* [Biology Bulletin Reviews], 1990, vol. 51, no. 4, pp. 513–527].

18. Патент № 2007414 Российская Федерация, МПК 5C07G. Способ получения антихлорозного средства на основе железолигносульфонатного комплекса: № 4755065/04: заявл. 03.11.1989; опубл. 15.02.1994 / Ю.Г. Хабаров, Г.В. Комарова, Л.М. Софрыгина, И.С. Образцов, Н.А. Зайцева. [Khabarov Ju.G., Komarova G.V., Sofrygina L.M., Obratsov I.S., Zajtseva N.A. *Method of Synthesis of Antichlorosis Agent on the Basis of Iron-Lignosulfonate Complex*. Patent RF, no. 2007414, 1994].

19. Патент № 2100365 Российская Федерация, МПК C07F 15/02, C07G 1/00. Способ получения антихлорозного препарата: № 95110383/04: заявл. 20.06.1995; опубл. 27.12.1997 / Ю.Г. Хабаров, Г.В. Комарова, Н.А. Зайцева, А.Е. Шергин, Л.М. Софрыгина. [Khabarov Ju.G., Komarova G.V., Zajtseva N.A., Shergin A.E., Sofrygina L.M. *Method for Producing Antichlorosis Preparation*. Patent RF, no. 2100365, 1997].

20. Попова В.Л., Грибанова Н.В., Гимашева Р.З. Изменение диспергирующих свойств лигносульфонатов в процессе переработки сульфитного щелока // Гидролиз. и лесохим. пром-сть. 1977. № 4. С. 13–14. [Popova V.L., Gribanova N.V., Gimasheva R.Z. Change of the Dispersing Properties of Lignosulfonates in Sulphite Liquor Processing. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'*, 1977, no. 4, pp. 13–14].

21. Саипов Э.К., Хамидов М., Абдуазимов Х.А. Азотсодержащие производные лигнина – стимуляторы роста хлопчатника // Тез. докл. 6-й Всесоюзн. конф. по химии и использованию лигнина. Рига: Зинатне, 1976. С. 203–205. [Saipov E.K., Khamidov M., Abdurazimov Kh.A. Nitrogen-Containing Lignin Derivatives – Growth Stimulators of Gossypium. *Proceedings of the 6th All-Union Conference on Chemistry and Lignin Use*. Riga, Zinatne Publ., 1976, pp. 203–205].

22. Сапотницкий С.А. Использование сульфитных щелоков. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 222 с. [Sapotnitskiy S.A. *The Use of Sulfite Liquors*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 222 p.].

23. Саушкин Б.П. Анодное растворение железа, хрома и хромистых сталей в нейтральных растворах хлорида и хлората натрия при высоких плотностях тока // Электронная обработка материалов. 1974. № 6. С. 5–9. [Saushkin B.P. Anodic Dissolution of Iron, Chromium and Chromium Steels in Neutral Solutions of Sodium Chloride and Sodium Chlorate at High Current Densities. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1974, no. 6, pp. 5–9].

24. Сибикина О.В., Новикова Е.В., Иозеп А.А., Иозеп Л.И., Тихомирова Н.Г., Кожевникова Л.С. Исследование реакции декстранполиальдегида с железом(III) // Журн. прикл. химии. 2007. Т. 80, вып. 2. С. 342–344. [Sibikina O.V., Novikova E.V., Iozep A.A., Iozep L.I., Tikhomirova N.G., Kozhevnikova L.S. Reaction between Dextran Polyaldehyde and Iron(III). *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2007, vol. 80, iss. 2, pp. 342–344]. DOI: [10.1134/S1070427207020356](https://doi.org/10.1134/S1070427207020356)
25. Смирнов А.Д. Использование технических лигносульфонатов для консервирования зеленых кормов при производстве молока и мяса крупного рогатого скота: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 1997. 20 с. [Smirnov A.D. *The Use of Technical Lignosulfonates for the Conservation of Green Fodder for the Production of Milk and Cattle Meat*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 1997. 20 p.].
26. Толстая М.А., Анисимов А.П., Щербак М.В., Постагонов В.Х. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1981. 263 с. [Tolstaya M.A., Anisimov A.P., Shcherbak M.V., Postagonyov V.Kh. *Fundamentals of the Theory and Practice of Electrochemical Processing of Metals and Alloys*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 263 p.].
27. Хабаров Ю.Г., Бабкин И.М., Вешняков В.А. Влияние условий нитрозирования лигносульфонатов на синтез магнитоактивного соединения // Журн. приклад. химии. 2012. Т. 85, вып. 4. С. 576–580. [Khabarov Yu.G., Babkin I.M., Veshnyakov V.A. The Influence of the Nitrosation Conditions of Lignosulfonates on the Synthesis of Magnetoactive Compound. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2012, vol. 85, iss. 4, pp. 576–580]. DOI: [10.1134/S1070427212040106](https://doi.org/10.1134/S1070427212040106)
28. Хабаров Ю.Г., Бабкин И.М., Вешняков В.А. Синтез магнитоактивного соединения на основе сульфата железа(II) // Журн. приклад. химии. 2012. Т. 85, вып. 6. С. 900–904. [Khabarov Yu.G., Babkin I.M., Veshnyakov V.A. Synthesis of a Magnetoactive Compound Based on Iron(II) Sulfate. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2012, vol. 85, iss. 6, pp. 900–905]. DOI: [10.1134/S1070427212060080](https://doi.org/10.1134/S1070427212060080)
29. Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Шергин А.Е. Электрохимический синтез и биологическая активность лигносульфоната железа // Изв. Акад. наук. Сер.: Химическая. 2019. № 5. С. 1081–1087. [Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Shergin A.E. Electrochemical Synthesis and Biological Activity of Iron Lignosulfonate. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya* [Russian Chemical Bulletin], 2019, vol. 68, iss. 5, pp. 1081–1087]. DOI: [10.1007/s11172-019-2523-2](https://doi.org/10.1007/s11172-019-2523-2)
30. Хабаров Ю.Г., Кошутина Н.Н. Изменение комплексообразующих свойств лигносульфонатов путем нитрозирования // Лесн. журн. 2001. № 5-6. С. 134–139. (Изв. высш. учеб. заведений). [Khabarov Yu.G., Koshutina N.N. Changing of Complexing Properties of Lignosulfonates by Nitrosing. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2001, no. 5-6, pp. 134–139]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a76/a76753d9399b3fe9780e6e74cb37fb2f.pdf>
31. Хабаров Ю.Г., Онохина Н.А., Гусаков Л.В. Получение железо-лигносульфонатных комплексов при обработке лигносульфоновых кислот железом в присутствии азотной кислоты // Лесн. журн. 2003. № 5. С. 112–117. (Изв. высш. учеб. заведений). [Khabarov Yu.G., Anokhina N.A., Gusakov L.V. Producing Iron-lignosulphonate Complexes under Iron Treatment of Lignosulfonic Acids in Nitric Acid Environment. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2003, no. 5, pp. 112–117]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/6f1/6f132afad05c0cdc614717d932770d1e.pdf>
32. Хамдо Д.Ю., Ханларов Т.Г., Гамбаров Д.Г. Комплексообразование полимерного лиганда на основе сополимера малеиновой кислоты и винилацетата с ионами металлов // Журн. неорганич. химии. 1992. Т. 37, вып. 12. С. 2755–2757. [Khamdo D.Yu., Khanlarov T.G., Gambarov D.G. Complexation of a Polymer Ligand Based on a Copolymer of Maleic Acid and Vinyl Acetate with Metal Ions. *Zhurnal neor-*

ganicheskoy khimii [Russian Journal of Inorganic Chemistry], 1992, vol. 37, iss. 12, pp. 2755–2757].

33. Чудаков М.И. Промышленное использование лигнина. 3-е изд., испр. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 200 с. [Chudakov M.I. *Industrial Use of Lignin*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 200 p.].

34. Чумаченко И.Н., Прошкин В.А., Войтович Н.В. Перспективы применения микроудобрений // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 6. С. 22–26. [Chumachenko I.N., Proshkin V.A., Voytovich N.V. Prospects for the Use of Microfertilizers. *Khimiya v sel'skom khozyaystve*, 1995, no. 6, pp. 22–26].

35. Шергин А.Е. Исследование и разработка способов получения комплексонов железа на основе технических лигносульфонатов: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Архангельск, 1998. 19 с. [Shergin A.E. *Research and Development of Methods for Producing Iron Complexonates Based on Technical Lignosulfonates*: Cand. Chem. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 1998. 19 p.].

36. Яров А.Н., Стерник Б.А. Комплексообразование в системах Fe^{2+} –лигносульфонат и Fe^{3+} –лигносульфонат // Гидролиз. и лесохим. пром-сть, 1974. № 5. С. 10–11. [Yarov A.N., Sternik B.A. Complexation in the Systems Fe^{2+} –Lignosulphonate and Fe^{3+} –Lignosulphonate. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'*, 1974, no. 5, pp. 10–11].

37. Abadía J. Leaf Responses to Fe Deficiency: A Review. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, vol. 15, iss. 10, pp. 1699–1713. DOI: [10.1080/01904169209364432](https://doi.org/10.1080/01904169209364432)

38. Ashtiani M., Hashemabadi S.H., Ghaffari A. A Review on the Magnetorheological Fluid Preparation and Stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 374, pp. 716–730. DOI: [10.1016/j.jmmm.2014.09.020](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.020)

39. Babkin I., Brovko O., Iakovlev M., Khabarov Yu. Ferrofluid Synthesis Using Nitrosated Lignosulfonates. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, vol. 52, iss. 23, pp. 7746–7751. DOI: [10.1021/ie400531f](https://doi.org/10.1021/ie400531f)

40. Bagotsky V.S. *Fundamentals of Electrochemistry*. New Jersey, NJ, John Wiley & Sons, 2006. 752 p. DOI: [10.1002/047174199X](https://doi.org/10.1002/047174199X)

41. Bajpai P. Chapter 8 – Wood-Based Products and Chemicals. *Biermann's Handbook of Pulp and Paper. Vol. 1: Raw Material and Pulp Making*. Amsterdam, Elsevier, 2018, pp. 233–247. DOI: [10.1016/B978-0-12-814240-0.00008-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814240-0.00008-2)

42. Bennett J.P. *Composition and Method of Correcting Nutrient Deficiency in Plants*. Patent US, no. 2929700, 1960.

43. Bertini I., Gray H.B., Lippard S.J., Valentine J.S. *Bioinorganic Chemistry*. Mill Valley, CA, University Science Books, 1994. 611 p.

44. Biggs W.S., Kjargaard N.J. *Lignosulfonate Composition and Process for Its Preparation*. Patent US, no. 4019995, 1977.

45. Campelj S., Makovec D., Drogenik M. Preparation and Properties of Water-Based Magnetic Fluids. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, vol. 20(20), art. 204101. DOI: [10.1088/0953-8984/20/20/204101](https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/20/204101)

46. Eigen M., Wilkins R.G. The Kinetics and Mechanism of Formation of Metal Complexes. Mechanisms of Inorganic Reactions. *Advances in Chemistry*, 1965, vol. 49, pp. 55–80. DOI: [10.1021/ba-1965-0049.ch003](https://doi.org/10.1021/ba-1965-0049.ch003)

47. Escudero R., Gómez-Gallego M., Romano S., Fernández I., Gutiérrez-Alonso Á., Sierra M.A., López-Rayó S., Nadal P., Lucenac J.J. Biological Activity of Fe(III) Aquo-Complexes towards Ferric Chelate Reductase (FCR). *Organic and Biomolecular Chemistry*, 2012, vol. 10, iss. 11, pp. 2272–2281. DOI: [10.1039/C2OB06754D](https://doi.org/10.1039/C2OB06754D)

48. Gao W., Du G. ^{13}C CP/MAS NMR Studies on the Curing Characteristics of Phenol Formaldehyde Resin in the Presence of Nano Cupric Oxide and Surfactants. *Polymer Composites*, 2014, vol. 35, iss. 1, pp. 113–117. DOI: [10.1002/pc.22640](https://doi.org/10.1002/pc.22640)

49. Grant M., Jordan R.B. Kinetics of Solvent Water Exchange of Iron(III). *Inorganic Chemistry*, 1981, vol. 20, iss. 1, pp. 55–60. DOI: [10.1021/ic50215a014](https://doi.org/10.1021/ic50215a014)

50. Gu Z.H., Oliver A., Fahidy T.Z. The Effect of Magnetic Fields on the Anodic Dissolution of Copper in NaCl-KSCN Electrolytes. *Electrochimica Acta*, 1990, vol. 35, iss. 6, pp. 933–943. DOI: [10.1016/0013-4686\(90\)90024-T](https://doi.org/10.1016/0013-4686(90)90024-T)
51. Gupta R.P., McCarthy J.L. Lignin. XIV. Gel Chromatography and the Distribution in Molecular Size of Lignin Sulfonates at Several Electrolyte Concentrations. *Macromolecules*, 1968, vol. 1, iss. 3, pp. 236–244. DOI: [10.1021/ma60003a008](https://doi.org/10.1021/ma60003a008)
52. Jean W.Q., Goring D.A.J. Macromolecular Properties of Sodium Lignosulfonates. *Svensk papperstidning*, 1968, vol. 71, no. 20, pp. 1898–1904.
53. Jensen W., Fogelberg B.C., Forss K., Fremer K.-E., Johanson M. The Behaviour of Calcium Lignosulfonates and Hemilignin Compounds on Filtration through Sephadex Gels. *Holzforchung*, 1966, vol. 20, iss. 2, pp. 48–49. DOI: [10.1515/hfsg.1966.20.2.48](https://doi.org/10.1515/hfsg.1966.20.2.48)
54. Khabarov Yu.G., Babkin I.M., Kuzyakov N.Yu., Veshnyakov V.A., Plakhin V.A., Orlov A.S., Chukhchin D.G., Varakin E.A. One-Step Synthesis of Magnetoactive Compound. *Mendeleev Communications*, 2017, vol. 27, iss. 2, pp. 186–187. DOI: [10.1016/j.mencom.2017.03.027](https://doi.org/10.1016/j.mencom.2017.03.027)
55. Khabarov Yu.G., Veshnyakov V., Komarova G., Kuzyakov N., Chukhchin D. Using Nitrated Lignosulfonates for the Synthesis of a Water-Based Magnetic Fluid. *International Journal of Nanoscience*, 2019, vol. 18, no. 2, art. 1850018. DOI: [10.1142/S0219581X18500187](https://doi.org/10.1142/S0219581X18500187)
56. Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Kuzyakov N.Yu., Onokhina N.A. Bioactive Properties of Iron-Nitrolignosulfonate Complexes with a Low Content of Ballast Ions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 263, art. 012012. DOI: [10.1088/1755-1315/263/1/012012](https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012012)
57. Khabarov Y., Veshnyakov V., Kuzyakov N., Pankina G. The Interaction of Iron(II) Cations with Chromate Anions in the Presence of Lignosulfonates. *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, November 27–29. 2017*, vol. 17, no. 43, pp. 245–252. DOI: [10.5593/sgem2017H/43/S18.031](https://doi.org/10.5593/sgem2017H/43/S18.031)
58. King E.G., Adolphson C. *Composition and Method for the Treatment of Nutrient Coficiency in Plant*. Patent Can., no. 696645, 1964.
59. Kuzyakov N.Yu., Veshnyakov V.A., Khabarov Yu.G., Pankina G.V. Influence of Lignosulfonic Acids on the Formation of Magnetoactive Compound in the Redox Reaction of Iron(II) with Chromate-Anion. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, no. 2.23, pp. 21–23. DOI: [10.14419/ijet.v7i2.23.11875](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11875)
60. Li W., Nobe K., Pearlstein A.J. Electrodisolution Kinetics of Iron in Chloride Solutions. VIII. Chaos in Potential/Current Oscillations. *Journal of The Electrochemical Society*, 1993, vol. 140, iss. 3, pp. 721–728. DOI: [10.1149/1.2056148](https://doi.org/10.1149/1.2056148)
61. Liu S., Chen X., Lauten R.A., Peng Y., Liu Q. Mitigating the Negative Effects of Clay Minerals on Gold Flotation by a Lignosulfonate-Based Biopolymer. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 126, pp. 9–15. DOI: [10.1016/j.mineng.2018.06.021](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.021)
62. Loeppert R.H. Reaction of Iron and Carbonates in Calcareous Soils. *Journal of Plant Nutrition*, 1986, vol. 9, iss. 3-7, pp. 195–214. DOI: [10.1080/01904168609363437](https://doi.org/10.1080/01904168609363437)
63. Lopez J.A., González F., Bonilla F.A., Zambrano G., Gómez M.E. Synthesis and Characterization of Fe₃O₄ Magnetic Nanofluid. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2010, vol. 30(1), pp. 60–66.
64. Lu A.-H., Salabas E.L., Schüth F. Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application. *Angewandte Chemie*, 2007, vol. 46, iss. 8, pp. 1222–1244. DOI: [10.1002/anie.200602866](https://doi.org/10.1002/anie.200602866)
65. Lucena J.J. Effects of Bicarbonate, Nitrate and Other Environmental Factors on Iron Chlorosis. A Review. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, vol. 23, iss. 11-12, pp. 1591–1606. DOI: [10.1080/01904160009382126](https://doi.org/10.1080/01904160009382126)
66. MacLean A.A., Doyle J.J. Studies with Waste Sulfite Liquor: I. Effects of Waste Sulfite Liquor on Crop Yields and on Soil Properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 1959, vol. 39, no. 2, pp. 87–92. DOI: [10.4141/cjss59-011](https://doi.org/10.4141/cjss59-011)

67. McCauley A., Jones C., Jacobsen J. Soil pH and Organic Matter. *Nutrient management*, 2009, no. 8, pp. 1–12.
68. Mentasti E., Secco F., Venturini M. Mechanism of Complex Formation: Equilibria and Kinetics of Fe^{3+} and FeOH^{2+} . Interaction with Substituted Salicylic Acids. *Inorganic Chemistry*, 1982, vol. 21, no. 2, pp. 602–604. DOI: [10.1021/ic00132a027](https://doi.org/10.1021/ic00132a027)
69. Mentasti E., Secco F., Venturini M. Complex Formation between Iron(III) and Highly Charged Ligands: Equilibria and Reaction Mechanisms. *Inorganic Chemistry*, 1982, vol. 21, no. 6, pp. 2314–2320. DOI: [10.1021/ic00136a038](https://doi.org/10.1021/ic00136a038)
70. Miller G.W., Pushnik J.C., Welkie G.W. Iron Chlorosis, a World Wide Problem, the Relation of Chlorophyll Biosynthesis to Iron. *Journal of Plant Nutrition*, 1984, vol. 7, iss. 1-5, pp. 1–22. DOI: [10.1080/01904168409363172](https://doi.org/10.1080/01904168409363172)
71. Mohamad A.T., Kaur J., Sidik N.A.C., Rahman S. Nanoparticles: A Review on Their Synthesis, Characterization and Physicochemical Properties for Energy Technology Industry. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2018, vol. 46, iss. 1, pp. 1–10.
72. Movil-Cabrera O., Rodriguez-Silva A., Arroyo-Torres C., Staser J.A. Electrochemical Conversion of Lignin to Useful Chemicals. *Biomass Bioenergy*, 2016, vol. 88, pp. 89–96. DOI: [10.1016/j.biombioe.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.014)
73. Myrvold B.O. A New Model for the Structure of Lignosulphonates: Part 1. Behaviour in Dilute Solutions. *Industrial Crops and Products*, 2008, vol. 27, iss. 2, pp. 214–219. DOI: [10.1016/j.indcrop.2007.07.010](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.010)
74. Neal J.A. Aryl Sulfonate-Aldehyde Composition and Process for Its Preparation. Patent US, no. 4018691, 1977.
75. Neal J.A. Clarification Process. Patent US, 4110208, 1978.
76. Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K., Dobson J. Applications of Magnetic Nanoparticles in Biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, vol. 36, no. 13, pp. R167–R181. DOI: [10.1088/0022-3727/36/13/201](https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/13/201)
77. Popa V.I., Popa M., Cotozana C., Beeca C., Gavrilescu D. Modification of Ammonium Lignosulfonates by Reaction with Formaldehyde and Urea. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1992, vol. 26, no. 4, pp. 413–419.
78. Reid C.P.P., Crowley D.E., Kim H.J., Powell P.E., Szaniszlo P.J. Utilization of Iron by Oat when Supplied as Ferrated Synthetic Chelate or as Ferrated Hydroxamate Siderophore. *Journal of Plant Nutrition*, 1984, vol. 7, iss. 1-5, pp. 437–447. DOI: [10.1080/01904168409363210](https://doi.org/10.1080/01904168409363210)
79. Ronen E. Micro-Elements in Agriculture. *Practical Hydroponics and Greenhouses*, 2007, iss. 164, pp. 39–48.
80. Simionescu C.I., Rusan V., Turta K.I., Bobcova S.A., Macoveanu M.M., Cjzacu G., Stoleriu A. Synthesis and Characterization of Some Iron-Lignosulfonate-Based Lignin-Epoxy Resins. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1993, vol. 27, iss. 6, pp. 627–644.
81. Slyusar' O.A., Uvarov V.M. Effect of Complex Additives on Ceramic Slip Mobility. *Glass and Ceramics*, 2017, vol. 74, iss. 3-4, pp. 110–111. DOI: [10.1007/s10717-017-9940-1](https://doi.org/10.1007/s10717-017-9940-1)
82. Spaldin N.A. *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. 274 p. DOI: [10.1017/CBO9780511781599](https://doi.org/10.1017/CBO9780511781599)
83. Stanik V., Danis L., Bistricka M. Spůsob výroby stabilizovaneho ligninsulfonanu zelezmateho. Patent CS, no. 254233, 1987.
84. Stefan G. Perspectivele valorificarii integrale a lesiilor residuale la Fabrica de celuloza si hirtie Zarnasti. *Celuloza hirtie*, 1965, vol. 14, no. 12, pp. 592–596.
85. Takahashi K., Bardwell J.A., MacDougall B., Graham M.J. Mechanism of Anodic Dissolution and Passivation of Iron. 1. Behavior in Neutral Acetate Buffer Solutions. *Electrochimica Acta*, 1992, vol. 37, iss. 3, pp. 477–487. DOI: [10.1016/0013-4686\(92\)87039-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(92)87039-3)
86. Takao R. et al. A Mixture of Fertilizers. Patent Jap., no. 2187, 1975.

87. Villén M., García-Arsuaga A., Lucena J.J. Potential Use of Biodegradable Chelate N-(1,2-Dicarboxyethyl)-d,l-aspartic Acid/ Fe^{3+} as an Fe Fertilizer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, vol. 55, no. 2, pp. 402–407. DOI: [10.1021/jf062471w](https://doi.org/10.1021/jf062471w)
88. Welch R.M., Graham R.D. Agriculture: The Real Nexus for Enhancing Bioavailable Micronutrients in Food Crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, vol. 18, iss. 4, pp. 299–307. DOI: [10.1016/j.jtemb.2005.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.03.001)
89. Yang D., Qiu X., Zhou M., Lou H. Properties of Sodium Lignosulfonate as Dispersant of Coal Water Slurry. *Energy Conversion and Management*, 2007, vol. 48, iss. 9, pp. 2433–2438. DOI: [10.1016/j.enconman.2007.04.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.007)
90. Yu W., Xie H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012, vol. 2012, art. 435873. 17 p. DOI: [10.1155/2012/435873](https://doi.org/10.1155/2012/435873)
91. Zakzeski J., Bruijninx P.C.A., Jongerius A.L., Weckhuysen B.M. The Catalytic Valorization of Lignin for the Production of Renewable Chemicals. *Chemical Reviews*, 2010, vol. 110, no. 6, pp. 3552–3599. DOI: [10.1021/cr900354u](https://doi.org/10.1021/cr900354u)
92. Zhou J., He Q., Liao X., Shi B. A Combination Tannage Based on Aluminium and Glycine-Modified Lignosulfonate. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 2011, vol. 95, no. 5, pp. 204–208.

PREPARATION AND APPLICATION OF COMPLEXES OF LIGNOSULFONIC ACIDS WITH IRON CATIONS

Yu.G. Khabarov, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: [0000-0001-8392-0985](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985)

V.A. Veshnyakov, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: [0000-0002-8278-5053](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053)

N.Yu. Kuzyakov, Postgraduate Student; ResearcherID: [F-6918-2017](https://orcid.org/0000-0002-2193-5118),

ORCID: [0000-0002-2193-5118](https://orcid.org/0000-0002-2193-5118)

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: khabarov.yu@mail.ru

Lignosulfonates and lignosulfonic acids are the main commercial product on the world market of lignins. They are used in metallurgy, mining, concrete production, and agriculture. The review presents the results of studying the structure and properties of lignosulfonates, the synthesis and application of complexes of lignosulfonic acids with iron cations. Lignosulfonates possess unique physicochemical properties that other types of lignins do not have. They form chelate complexes when interacting with iron cations and other biogenic metals. These complexes can be used in agriculture to eliminate plant chlorosis. Chlorosis is particularly manifests itself on about 30 % of the world's farmlands with high calcium carbonate content. It is possible to change the properties of lignosulfonic acids and lignosulfonates intentionally by their modification. Nitration and nitrosation enhances the complexing properties. This is due to the possibility of the formation of chelate complexes with iron cations. Iron chelates with nitrated and nitrosated lignosulfonates exhibit strong anti-chlorosis properties. Their use allows normalizing the content of chlorophyll in photosynthetic structures completely. In the synthesis of water-based magnetic fluids lignosulfonates modified by nitration and nitrosation exhibit the properties of a peptizing agent that promotes the formation of stable magnetic fluids of magnetite type. Lignosulfonates have a strong influence on the synthesis of magnetoactive compounds by the partial oxidation of iron (II) cations using chromate ions or silver ammonium hydroxide. In the former case, a

compact magnetoactive compound is formed; and in the second – a magnetic fluid (if condensation is carried out in the presence of tetraalkylammonium hydroxides).

For citation: Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Kuzyakov N.Yu. Preparation and Application of Complexes of Lignosulfonic Acids with Iron Cations. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 167–187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167

Keywords: lignosulfonic acids, lignosulfonates, their properties and application, iron, chelates, electrochemical synthesis, galvanochemical synthesis, nitration, nitrosation, magnetic fluids plant chlorosis.

Поступила 14.03.19 / Received on March 14, 2019

UDC 676.056:621.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.188

REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION OF PAPER AND CARDBOARD MACHINES IN PRODUCTION OF GLUED PAPER AND CARDBOARD

N.V. Chernaya¹, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: [0000-0002-8306-8590](https://orcid.org/0000-0002-8306-8590)

V.L. Fleisher¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0003-2997-7707](https://orcid.org/0000-0003-2997-7707)

N.I. Bogdanovich², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/A-4662-2013)

¹Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; e-mail: v_fleisher@list.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: n.bogdanovich@narfu.ru

The objective of this research was to conduct studies of the influence of the sizing complexes dimensions and rosin sizing methods proceeding in the modes of homocoagulation and heteroadagulation on the temperature regime of paper and cardboard drying. The drying regime ensures the sintering and melting processes of coarse (existing technology) and fine (developed technology) sizing complexes with the formation of a hydrophobic film on the surface, responsible for such values indicators for glued types of paper and cardboard, as the degree of sizing by the bar method and absorbency with one-sided wetting. Coarse electroneutral sizing complexes gauged 4200–6000 nm are formed in the second phase of electrolyte coagulation of hydrodispersions of modified rosin (HMR). The ratio of HMR : electrolyte is 1: 3. The rosin sizing process takes place in the mode of homocoagulation, since such complexes are not able to distribute evenly and adhere firmly to the surface of the fibers and the hydrophobic film formed of them is heterogeneous in thickness and area. Fine sizing complexes have a size of 180–220 nm and an electrokinetic potential from +30 to +50 mV. They are peptized particles formed from coagulates (2000 nm), first formed in the first area of electrolyte coagulation of HMR, when the ratio of HMR : electrolyte (first batch) is 1 : 1, and then subjected to further disaggregation (peptization) into the presence of peptide ions Al^{3+} , introduced into the pulp with the second portion of the electrolyte in a ratio of 1 : 0.8. It has been established that reducing the size of sizing complexes from 4200–6000 to 180–220 nm due to the shift of the rosin sizing process from the homocoagulation mode to the heteroadagulation mode helps to reduce energy consumption in the drying part of paper-making and cardboard-making machines by 2–3 % or more. This process is facilitated by lowering the temperature of not only the last 4–6 drying cylinders located at the end of the second group – from 130 to 115–120 °C, but also the first 2–4 drying cylinders of the third group – from 115 to 100–105 °C.

For citation: Chernaya N.V., Fleisher V.L., Bogdanovich N.I. Reduction of Energy Consumption of Paper and Cardboard Machines in Production of Glued Paper and Cardboard. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 188–193. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.188

Keywords: glued paper, cardboard, paper machine, homocoagulation, peptization, power usage, drying paper and cardboard.

Introduction

At present, the global cellulose and paper industry produces a varied range of glued paper and cardboard, characterized by consumer properties such as hydrophobicity, strength, etc. [4]. They are widely used for documents and archival

materials production in chemical, electrical and radio-industries, as well as in printing, furniture-, food-, construction-, automotive-, tractor- and other sectors of industry. In this case, the current trend of cellulose and paper industry is characterized by a need to increase production output and reduce its costs [9, 11, 13].

A distinctive feature of glued paper and cardboard production is a need to use sizing agents (e.g. neutral and highly resinous hydrodispersions of modified rosin (HMR)) and electrolytes, mainly aluminum hydroxocompounds [7, 10]. Traditional technology of their application is based on the sequential introduction of HMR required quantities and electrolyte solution (aluminum sulfate) with the formation of sizing systems in 3–6 %-ing fiber suspension [3, 5]. From the obtained paper pulp (dispersed system) after diluting it with water to 0.1–0.8 % concentration, paper and cardboard are produced by water removal on the frame of paper (PM) and cardboard (CM) machines, followed by implementation to the ordinary stages of pressing and drying till a moisture content of 5–7 %. A special role is played by temperature drying of paper and cardboard, providing melting and sintering of sizing complexes with a formation of hydrophobic film on the fiber surface. Its thickness and homogeneity depend significantly on the dispersion of present sizing systems, the degree of their retention in the structure of paper and cardboard, and the homogeneity of their distribution on the surface of the fibers [6, 12].

It should be noted that drying temperature mode of paper and cardboard is making a significant impact on the intensity of the melting processes and sintering sizing systems [2, 3] and, therefore, on the hydrophobicity of production output. Technology of glued types of paper and cardboard production is energy intensive due to the need to remove from the wet paper web of 50–55 % water by evaporation in the dryer section of PM and CM and provision with the completeness of the processes of sintering and melting of sizing complexes with the formation of hydrophobic film on the surface. While passing of paper and cardboard web through a dryer section of PM and CM its dryness should be increased from 40–42 to 93–95 %.

Our studies [1, 2] have shown that the degree of retention of sizing complexes in the structure of paper and cardboard essentially depends not only on the particle size and ξ -potential, but also on the nature of the distribution and strength of their fixation on the fiber surface. A common use of technology HMR sizing fiber suspension is based on the formation of electro-neutral coagulums, aggregating, as established by us [2], in the second region of rapid coagulation of HMR in different-sized coarse coagulates with the size of 4200–6000 nm and more [8]. The latter are not able to be uniformly distributed and firmly fixed on the fiber surface. Therefore, the sizing process in homocoagulation mode is accompanied, on the one hand, by a low degree of retention of sizing complexes in the structure of paper and cardboard, not to exceed 58 % [2] and, on the other hand, by the need to raise the temperature in the second group of drying cylinders to 130 °C [3].

Usually dryers for PM and CM are divided into three groups. In the first group there is a gradual increase in temperature from 60 to 105 °C, allowing the removal of the “free” water from paper and cardboard structure. The second group of drying cylinders consists of two parts: in the first part of dryers the removal of “free” water completes, while in the second part sintering and melting of sizing complexes occur, thereby giving the finished product the required degree of hydrophobicity, and for this, the temperature is gradually increased from 115 to 130 °C. In the third group of drying cylinders processes of drying and

hydrophobization of paper and cardboard are terminated, and the temperature decreases from 130 to 60 °C.

Known ways to reduce energy consumption of paper and cardboard machines are based on the improvement of its drying section by changing the supply of steam to the drying cylinder, by correction of steam distribution scheme and condensate removal, by the use of specially designed ventilation systems to improve moist air removal, by additional drying of siccative cloth with warm air, by the use of infrared rays to speed the paper web heating, by the installation of additional hot suction press in the drying part of paper and cardboard machines, etc.

The main outstanding issues in the operation of paper and cardboard machines is high energy consumption spending to dry paper and cardboard, resulting in a significant increase in the cost price of production output. Therefore the problem of reducing energy consumption of paper and cardboard machines in the production of glued paper and cardboard is of current importance from scientific and practical points of view.

One of the most promising ways to reduce energy consumption in the drying part of paper and cardboard machines is, in our opinion, the method based on intensification of melting and sintering of sizing complexes by reducing their size and to ensure a uniform distribution on the surface of the fibers.

The purpose of research is scientific rationale and development of the method to reduce energy consumption at paper and cardboard drying step with no additional cost for the improvement in the dryer section of paper and cardboard machines by reducing the dimensions of sizing complexes and ensure even distribution of the monolayer on the surface of the fibers.

Results of research and discussion

To achieve the objectives the work was carried out in two stages: in the first stage of the process it has been studied the effect of electrolytic coagulation flowing in the first and second regions of coagulation, the dispersion and ξ -potential sizing complexes (coagulates); in the second phase it has been examined the effect of temperature mode of paper and cardboard drying on the hydrophobicity and durability of paper and cardboard.

We have established that while colloid-chemical interaction of negatively-charged particles of the dispersed phase of HMR and positively charged ions of the electrolyte can be formed not only the traditional electro-neutral coagulum (according to existing technology – in the field of critical values of ξ -potential in the second area of rapid coagulation HMR), from which were formed coarse sized coagulates 4200–6000 nm and greater, and the positively charged particles pregelatinized (the developed technology – in the peptization) the size of 180–220 nm. To get the last they must first be in the first area of rapid coagulation of HMR get coagulates with dimensions not exceeding 2000 nm (they can pregelatinized), and then ensure their peptization (disaggregation) by adding to the dispersion system of electrolyte solution (aluminum sulfate) containing the necessary amount of aluminum hydroxyl compounds in the form of hexa-aqua-aluminium ions $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$.

Below there are the results of our comprehensive research on the effect of dispersion of sizing complexes for sizing of paper and cardboard in homo-coagulation modes (option 1 – the existing technology) and heteroadagulation (option 2 – developed technology) [11, 12].

The developed technology (option 2) compared with the existing one (option 1), as can be seen from the table, provides for the improvement of the hydrophobic and mechanical properties of paper (120 g/m²) and cardboard (340 g/m²).

It should be noted that the role of sizing complexes can perform coarse electroneutral coagulates (option 1) or fine-dyspersated pregelatinized positively charged particles (option 2).

**Effect of the sizing and drying temperature on the properties
of paper and cardboard**

Parameter	Option 1	Option 2
<i>Terms sizing of paper and cardboard</i>		
View HMR	Neutral hydrodispersion TM	High resin dispersion TMVS-2H
Consumption HMR, kg/t	15	15
View sizing complexes	Coagulate	Particles pregelatinized
Dimensions of sizing systems, nm	3250–4370	180–200
Sizing mode fiber suspension	Homoadagulation	Heteroadagulation
pH of the mass in the headbox paper and board machines	4.8–5.2	6.5–7.2
<i>Temperature conditions of drying of paper and cardboard</i>		
The temperature in the first group of drying cylinders, °C	Rises from 60 to 105	Rises from 60 to 105
Temperature of the second group of drying cylinders, °C	Rises from 105 to 130	Rises from 105 to 115–120
The temperature in the third group of drying cylinder, °C	Is reduced from 130 to 40	Is reduced from 115 to 40
<i>The processes occurring during drying of paper and cardboard</i>		
Temperature 60–80 °C	Evaporation of water	Evaporation of water
Температура 80–90 °C	Evaporation of water	Evaporation of water, sintering peptizi-plated particles
Temperature 90–115 °C	Evaporation of water, fusion peptideized particles	Evaporation of water, melting coagulates
Temperature 115–130 °C	Evaporation of water, melting coagulates	–
<i>The quality of paper and cardboard</i>		
Degree of sizing bar-method, mm	1.6–1.8	2.4
Absorbency at unilateral wetting process, g/m ²	22–30	10–12
Breaking length, m	5700–5850	7600–7800
Tensile index, H·m/g	60–62	78–79
Energy absorption at break, J/m ²	47–48	75–80
Young's modulus (modulus of elasticity), GPa	5.3–5.5	7.8–8.0
Stiffness at break, kN/m	500–510	680–710
Stiffness index at break, kN·m/g	6.5–6.7	9.9–10.1

It is seen that in contrast to the implementation of option 1, option 2 can decrease the drying temperature from 130 to 110–115 °C from the middle of second group and in the beginning of the third group of drying cylinders.

Comparative analysis of the data presented in the table allows to give preference to option 2 and to reject option 1. This is explained by energy consumption reduction in the drying step of glued paper and cardboard in the dryer section of paper and cardboard machines [3]. The achieved effect is due to reduced dimensions of sizing systems and to increase their ability to process the melting and sintering. All this confirms the expediency of changing the sizing process of paper and cardboard from homocoagulation mode to the mode of heteroadagulation of pregelatinized particles [1]. This is evidenced by a decrease in temperature on the last 4–6 drying cylinders located in the second group from 130 to 115–120 °C and on the first 2–4 drying cylinders of the third group from 115 to 100–105 °C.

Conclusion

Therefore replacing the process of sizing paper and cardboard in the mode of homocoagulation with the mode of heteroadagulation of peptized particles makes it possible to reduce the temperature of the drying cylinders by 10–15 °C at the end of the second (4–6 cylinders) and the beginning of the third (2–4 cylinders) groups. This demonstrates the practical possibility of solving a current problem, aimed at reducing (by 2–3 % or more) the energy consumption of paper-making and cardboard-making machines in the production of glued types of paper and cardboard.

REFERENCES

1. Chernaya N.V., Lamotkin A.I., Emello G.G., Zholnerovich N.V. Influence of the Drying on the Properties of the Sized Paper. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty*, 2001, vol. 6, no. 4, pp. 90–93.
2. Chernaya N.V. *The Theory and Technology of the Glued Types of Paper and Cardboard*: Monograph. Minsk, BSTU Publ., 2009. 394 p.
3. Fljate D.M. *Technology of Paper*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 440 p.
4. Mescheryakova E.V. Directions of Development of the Pulp and Paper Industry of the Republic of Belarus Taking into Account International experience. *Lesnoe i okhotnich'e hozyaystvo* [Forestry and hunting], 2011, no. 4, pp. 20–25.
5. Bajpai B. *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. Springer Science & Business Media, LLC, 2012, 414 p.
6. Bijedić M., Duraković H. Dynamic Model of the Process of Contact and Convective Paper Drying. *Tehnički vjesnik*, 2006, vol. 13, pp. 31–37.
7. Chernaya N.V., Fleisher V.L., Zholnerovich N.V. Sizing of Paper with Hydrodispersions of Modified Rosin. *XXI International Symposium in the Field of Pulp, Paper, Packaging and Graphics, Zlatibor, 21–24 June 2016*. Zlatibor, 2016, pp. 39–43.
8. Chernaya N.V., Fleisher V.L., Zholnerovich N.V. The Creation and Implementation of the Resource-Conserving Technology of Paper and Paperboard Sizing with Hydrodispersions of Modified Rosin in the Mode of Heteroadagulation of Peptized Particles. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics*. 2017, no. 2(2), pp. 87–101.
9. He D., Barr C. China's Pulp and Paper Sector: an Analysis of Supply-Demand and Medium Term Projections. *Int. Forestry Review*, 2004, vol. 6, pp. 254–256.
10. Hubbe M. Acidic and Alkaline Sizings for Printing, Writing, and Drawing Papers. *The Book and Paper Group Annual*, 2004, vol. 23, pp. 139–151.
11. Jonsson R. Trends and Possible Future Developments in Global Forest-Product Markets – Implications for the Swedish Forest Sector. *Forests*, 2011, no. 2, pp. 147–167.

12. Klinga N., Hoglund H., Sandberg C. Paper Properties of TMP and CTMP Handsheets from Spruce, as Affected by the Press Load and Temperature during Sheet Drying. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2007, vol. 22, iss. 4, pp. 468–474.

13. Saadia A., Ashfaq A. Environmental Management in Pulp and Paper Industry. *Journal of Industrial Pollution Control*, 2010, vol. 26, no. 1, pp. 71–77.

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ И КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЛЕЕНЫХ ВИДОВ БУМАГИ И КАРТОНА

Н.В. Черная¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: [0000-0002-8306-8590](https://orcid.org/0000-0002-8306-8590)

В.Л. Флейшер¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: [0000-0003-2997-7707](https://orcid.org/0000-0003-2997-7707)

Н.И. Богданович², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/A-4662-2013)

¹Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13а, г. Минск, Беларусь, 220006; e-mail: v_fleisher@list.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.bogdanovich@narfu.ru

Изучено влияние размеров проклеивающих комплексов и способов канифольной проклейки в режимах гомотоагуляции и гетероадагуляции на температурный режим сушки бумаги и картона, обеспечивающий спекание и плавление крупнодисперсных (традиционная технология) и мелкодисперсных (разработанная технология) проклеивающих комплексов с образованием на поверхности волокон гидрофобной пленки, отвечающей за степень проклейки по штриховому методу и впитываемость при одностороннем смачивании клееных видов бумаги и картона. Крупнодисперсные электронейтральные проклеивающие комплексы, имеющие размер 4200...6000 нм, образуются во второй области электролитной коагуляции гидродисперсий модифицированной канифоли (ГМК). Соотношение ГМК : электролит – 1 : 3. Процесс канифольной проклейки протекает в режиме гомотоагуляции, поскольку такие комплексы не способны равномерно распределяться и прочно фиксироваться на поверхности волокон, а образовавшаяся из них гидрофобная пленка является неоднородной по толщине и площади. Мелкодисперсные проклеивающие комплексы имеют размер 180...220 нм, их электрокинетический потенциал 30...50 мВ. Они представляют собой пептизированные частицы, образовавшиеся из коагулятов (2000 нм), сформированных сначала в первой области электролитной коагуляции ГМК, когда соотношение ГМК : электролит (первая порция) 1 : 1, а затем подвергшихся дезагрегированию (пептизации) в присутствии ионов-пептизаторов Al^{3+} , введенных в бумажную массу со второй порцией электролита в соотношении 1 : 0,8. Установлено, что уменьшение размеров проклеивающих комплексов от 4200...6000 до 180...220 нм за счет смещения процесса канифольной проклейки из режима гомотоагуляции в режим гетероадагуляции способствует сокращению энергопотребления в сушильной части бумагоделательных и картоноделательных машин на 2...3 % и более. Это вызвано снижением температуры не только последних 4–6 сушильных цилиндров, расположенных в конце второй группы, от 130 до 115...120 °С, но и первых 2–4 сушильных цилиндров третьей группы – от 115 до 100...105 °С.

Для цитирования: Chernaya N.V., Fleisher V.L., Bogdanovich N.I. Reduction of Energy Consumption of Paper and Cardboard Machines in Production of Glued Paper and Cardboard // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 188–193. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.188

Ключевые слова: клееная бумага, клееный картон, бумагоделательная машина, гомотоагуляция, пептизация, энергопотребление, сушка бумаги и картона.

Поступила 22.02.19 / Received on February 22, 2019

УДК 668.473

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.194

ПРОМЫВКА СМЕШАННОГО СУЛЬФАТНОГО МЫЛА НЕЙТРАЛИЗОВАННОЙ КИСЛОЙ ВОДОЙ

*Е.В. Старжинская*¹, *инж.-технолог*; ResearcherID: [E-2862-2019](#),
ORCID: [0000-0002-4989-264X](#)

*А.М. Кряжев*², *д-р техн. наук, гл. технолог*; ORCID: [0000-0002-3287-6387](#)

*С.И. Третьяков*³, *канд. техн. наук, проф.*; ResearcherID: [S-2192-2019](#),
ORCID: [0000-0003-1783-5349](#)

*А.А. Глуханов*³, *канд. техн. наук, доц.*

¹ООО «Техсервис», ул. Советов, д. 4, оф. 300, г. Новодвинск, Россия, 164900;
e-mail: Lesochimik-lena@mail.ru

²ООО «Адвис Плюс», наб. Обводного канала, д. 150, корп. 363, оф. 232, Санкт-Петербург, Россия, 191011; e-mail: kryazhev@advplus.com

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: s.tretyakov@narfu.ru

Сульфатное мыло – ценный побочный продукт производства целлюлозы сульфатным способом, является смесью омыленных смоляных и жирных кислот и неомыляемых веществ (стеринов, жирных спиртов, алифатических углеводов и др.). При отстаивании щелока, образующегося при промывке целлюлозы, мицеллы сульфатного мыла укрупняются и в процессе всплытия могут увлекать за собой некоторое количество черного щелока, содержащего растворенный лигнин, а также примеси соединений кальция. Основной способ удаления черного щелока – доотстаивание сульфатного мыла после его сбора перед переработкой. Рационально и экономически выгодно использовать для промывки раствор солей от разложения мыла или кислую воду, нейтрализованную до pH 8...14. Показана необходимость промывки сульфатного мыла при варке целлюлозы из смешанных пород древесины. В качестве промывного раствора применяли образующуюся при разложении мыла нейтрализованную кислую воду в количестве 10, 20 и 30 % от объема сульфатного мыла. Промывку осуществляли при температуре 20...80 °С. В ходе эксперимента определены оптимальные условия для промывки смешанного сульфатного мыла: температура – 20...40 °С, расход промывного раствора – 10...20 %. Установлено, что при оптимальных условиях промывки смешанного сульфатного мыла нейтрализованной кислотой увеличивается выход сырого таллового масла и его кислотное число, уменьшается содержание щелочи и лигнина, предотвращается снижение доли смоляных кислот в талловом масле.

Для цитирования: Старжинская Е.В., Кряжев А.М., Третьяков С.И., Глуханов А.А. Промывка смешанного сульфатного мыла нейтрализованной кислотой водой // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 194–202. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.194

Ключевые слова: смешанное сульфатное мыло, талловое масло, черный щелок, лигнин, промывка.

Введение

Сульфатное мыло (СМ) – ценный побочный продукт производства целлюлозы сульфатным способом, представляющий собой омыленные экстрактивные вещества древесины. При отстаивании черного щелока СМ всплывает на поверхность, его собирают и направляют на переработку в целях получе-

ния таллового масла (ТМ), которое используют как самостоятельный продукт либо ректификацией разделяют на жирные кислоты, канифоль, дистиллированное ТМ, легкое ТМ, талловый пек. Существуют технологии получения из СМ биологически активных веществ [2–4].

При отстаивании щелоков мицеллы сульфатного мыла укрупняются и в процессе всплытия увлекают за собой некоторое количество черного щелока, содержащего растворенный лигнин, а также примеси соединений кальция [8, 12, 16]. По этой причине на установке получения ТМ могут возникать затруднения при разделении реакционной смеси. Это связано с тем, что лигнин при обработке СМ серной кислотой из-за понижения pH среды выпадает в осадок, сорбируя на своей поверхности ТМ [9]. Потери ТМ с лигнином достигают 20...45 %. Кроме этого, увеличивается расход серной кислоты на нейтрализацию черного щелока, повышается выход дурно пахнущих газов, учащаются остановки на чистку оборудования [14, 15, 17–24].

Основной способ удаления черного щелока из СМ – доотстаивание мыла от щелока после его сбора перед переработкой. Однако данный способ решает проблему частично: даже при длительном отстаивании количество остающегося в мыле щелока достаточно велико [8, 23, 24]. Известно, что эффективно удалить компоненты щелока позволяет промывка [1, 5, 10, 11, 13]. Наиболее рациональным и экономически выгодным является использование для промывки раствора солей, образующегося при разложении сульфатного мыла, – кислой воды, нейтрализованной до pH 8...14 [7, 13, 22]. В литературных источниках имеются данные об оптимальных значениях параметров промывки (мыла от варки хвойных пород [2, 4, 7, 10, 21]: состав промывного раствора (ПР) – концентрация Na_2SO_4 не менее 18 % масс., что соответствует плотности 1120 кг/м³; содержание солей лигнина не более 1 % масс.; содержание взвешенных – 200 г/г; соотношение мыла и ПР – 1 : 0,25, рекомендовано для максимального выхода масла; соотношение для отделения кальция – 1 : 0,8; температура смешивания – 75...90 °C; температура разделения – 35...50 °C; продолжительность разделения системы на фазы в статических условиях – 8...40 ч. Продолжительность отстаивания рекомендовано сокращать путем усовершенствования технологий смешивания и разделения [18, 19, 23].

Ранее нами был проведен эксперимент по промывке СМ из лиственных пород древесины при пониженном гидромодуле без охлаждения реакционной смеси [6]. Промывка оказалась эффективной: содержание лигнина и воды в мыле снизилось, смоляных, жирных кислот и нейтральных веществ (СЖН) увеличилось. В настоящее время большую актуальность приобретает переработка смешанного СМ вследствие изменения лесосырьевой базы. Это требует дополнительного подбора условий. Важными факторами являются расход промывного раствора и температура отстаивания.

Известно, что чем больше лигнина в СМ, тем меньше выход ТМ и хуже его качество [8, 19, 21]. Вместе с таким показателем, как выход ТМ, необходимо знать его качественные характеристики: сумму СЖН, содержание смоляных кислот (СК), кислотное число (КЧ).

Цель данного исследования – определение оптимальных условий для промывки смешанного СМ и установление зависимости между выбранными условиями промывки и показателями полученного ТМ.

Объекты и методы исследования

Для испытаний использовали сырое СМ от варки хвойной древесины с примесью лиственных пород. Образец мыла отбирали из бака хранения нейтрализованной кислой воды (НКВ) в цехе разложения СМ перед подачей на установку разложения до разбавления водой. В качестве ПР использовали кислую воду, нейтрализованную крепким белым щелоком до pH 9...10, в количестве 10, 20 и 30 % от объема СМ. Образцы мыла и НКВ помещали в термостат при температуре 20, 40, 60 и 80 °С. После достижения требуемой температуры НКВ приливали к СМ и интенсивно перемешивали в течение 1 мин, измеряли объем отстоявшейся жидкости (НКВ и черный щелок) каждые 30 мин до прекращения изменения объема фаз.

Исходное СМ анализировали по следующим показателям: содержание массовой доли воды, лигнина, СЖН и общей щелочности. В НКВ определяли pH, плотность, содержание лигнина и взвешенных частиц. Для сравнения отстоявшееся мыло анализировали по тем же показателям, что и исходное.

Далее мыло обрабатывали серной кислотой и получали ТМ, которое отстаивали в сушильном шкафу при температуре 95 °С в течение 5 ч, определяли его выход от теоретического (за теоретический выход принимали сумму СЖН СМ). Далее в сыром ТМ, полученном из исходного и промытого мыла, определяли содержание СЖН, СК, КЧ по методикам, указанным в ТУ 13-0281078-19-89.

Результаты исследования и их обсуждение

При низких температурах (20...40 °С) продолжительность отстаивания оказалась минимальна (рис. 1, а и б): за первые 30 мин отстаивается от 85 до 100 % жидкости. При температуре 60 °С (рис. 1, в) от 90 до 100 % жидкости выделяется уже не менее чем за 1 ч и при большем расходе промывного раствора (1,0 : 0,2 и 1,0 : 0,3), тогда как при низком расходе (1,0 : 0,1) за 1 ч отстаивается только 70 % жидкости. При более высокой (80 °С) температуре (рис. 1, г) за 1 ч отстаивается только 35...80 % жидкости, причем в дальнейшем отстаивание практически прекращается. Во всех случаях жидкость лучше отделяется при расходе ПР 30 % от объема мыла.

Отметим, что при температуре 20 °С изменение расхода ПР не оказывает существенного влияния на скорость отстаивания (см. рис. 1, а). При температуре 40, 60 и 80 °С увеличение расхода ПР повышает выход отстоявшейся жидкости в каждой исследованной точке, однако при 80 °С не достигается 100 %-го отбора жидкости (за 100 % принято количество добавленного ПР) даже при максимальном расходе ПР (30 %), т. е. часть НКВ остается в мыле.

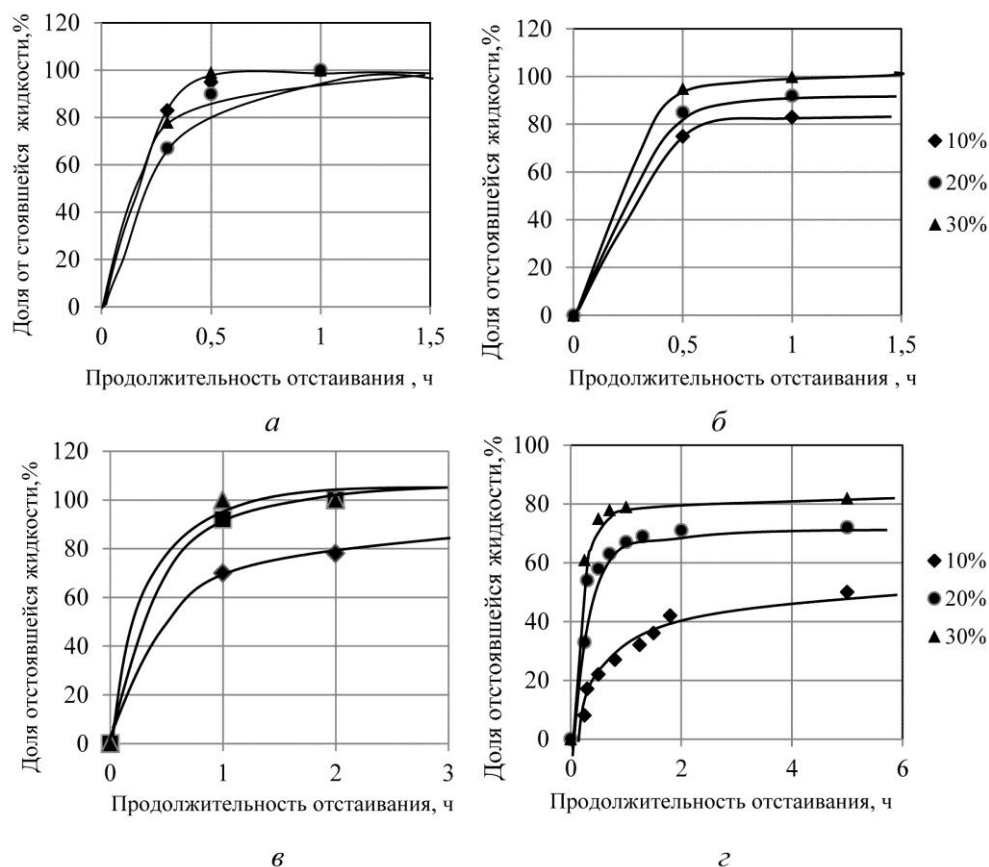


Рис. 1. Продолжительность отстаивания жидкости из смеси ПР с СМ после промывки при различных расходах ПР (10, 20, 30 % от объема СМ, взятого для промывки) и температуре, °С: а – 20; б – 40; в – 60; г – 80

Fig. 1. Sedimentation time of liquid obtained from a mixture of washing solution (WS) and sulfate soap (SS) after washing at various consumptions of WS (10, 20, 30 % of SS volume taken for washing) and temperature, °C: а – 20; б – 40; в – 60; г – 80

Это объясняется тем, что при высокой температуре вязкость мыла снижается, оно легко смешивается с щелочным ПР, а при понижении температуры и, как следствие, вязкости СМ отстаивание осуществить гораздо легче. Также при температуре ниже 38 °С соли мыла практически не переходят в ПР, т. е. потери СМ минимальны [3, 7, 10].

В таблице отражены показатели НКВ и СМ до и после промывки.

Характеристики СМ и НКВ до и после промывки

Показатель	СМ		Показатель	НКВ	
	исход-ное	промытое		до промывки	после промывки
Общая щелочность, %	9,3	7,5±0,4	рН	9	11
Лигнин, %	1,6	1,1±0,2	Плотность, кг/м ³	1136	1126
СЖН, % от а.с.в.	70	75±2,5	Лигнин, % от а.с.в.	3	18
Влага, %	35	30±3	Взвешенные вещества, г/т	160	210

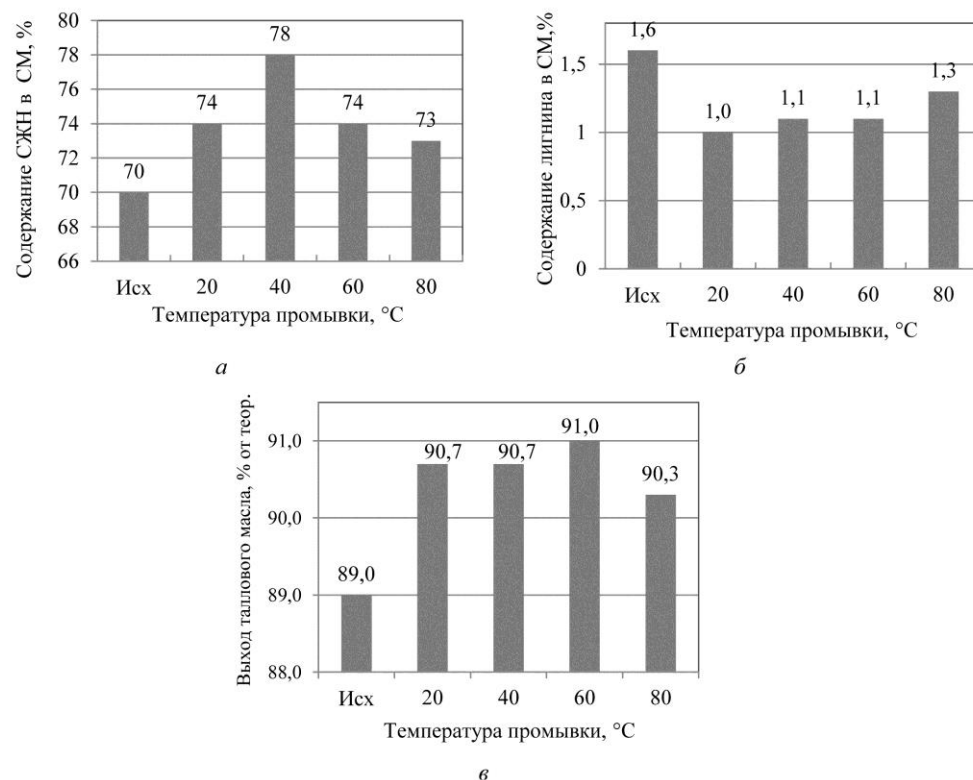


Рис. 2. Влияние температуры промывки на показатели качества СМ (а, б) и выход ТМ (в)

Fig. 2. The effect of washing temperature on the quality of sulfate soap (а, б) and tall oil yield (в)

Следует отметить, что НКВ после промывки по содержанию лигнина и рН приблизилась к черному щелоку, а в СМ содержание общей щелочи и лигнина снизилось. Следовательно, можно констатировать, что компоненты щелока были вытеснены в НКВ.

На рис. 2 видно, что по сравнению с исходным мылом сумма СЖН увеличилась на 3...8 %. Лучший результат по СЖН дает промывка при температуре 40 °С. Содержание лигнина уменьшается на 0,3...0,6 % абс. (приблизительно в 1,5 раза) по сравнению с исходным СМ. При температуре 20, 40 и 60 °С происходит примерно одинаковое снижение содержания лигнина.

Промывка (независимо от температуры процесса) положительно влияет на выход ТМ (рис. 2, в), который возрастает на 2 % от исходного непромытого мыла. Данные по выходу ТМ согласуются с данными по содержанию лигнина в СМ: чем меньше лигнина в сульфатном мыле, тем больше выход из него ТМ. Следует отметить, что в диапазоне температур промывки 20...60 °С выход масла увеличивается в большей степени, чем в диапазоне 60...80 °С.

ТМ из исходного СМ имеет следующие показатели: КЧ – 141 мг КОН/г масла; содержание СК – 25 %; сумма СЖН – 93 %.

На рис. 3, *а* видно, что повышение температуры от 20 до 60 °С позволяет увеличить содержание СЖН на 1,5...2,0 %, а при росте температуры от 60 до 80 °С – на 3,5 % по сравнению с исходным содержанием СЖН.

Содержание СЖН в сыром ТМ в результате промывки увеличивается на 1,5...4,0 % (рис. 3, *б*). Рост содержания СЖН наблюдается при всех расходах ПР (от 10 до 30 %) и во всем диапазоне температур (от 20 до 80 °С).

КЧ возрастает на 1...4 мг КОН/г масла. Зависимость на рис. 3, *б* демонстрирует, что с увеличением расхода ПР наблюдается рост КЧ ТМ. Повышение температуры от 20 до 80 °С наоборот снижает КЧ (см. рис. 3, *а*). По нашему мнению, рост КЧ может происходить за счет сокращения содержания лигнина. Известно, что лигнин при разделении эмульсии «талловое масло–кислая вода» сорбирует на своей поверхности жирные и смоляные кислоты, т. е. при снижении содержания лигнина в сульфатном мыле может возрасти доля кислот в талловом масле [10].

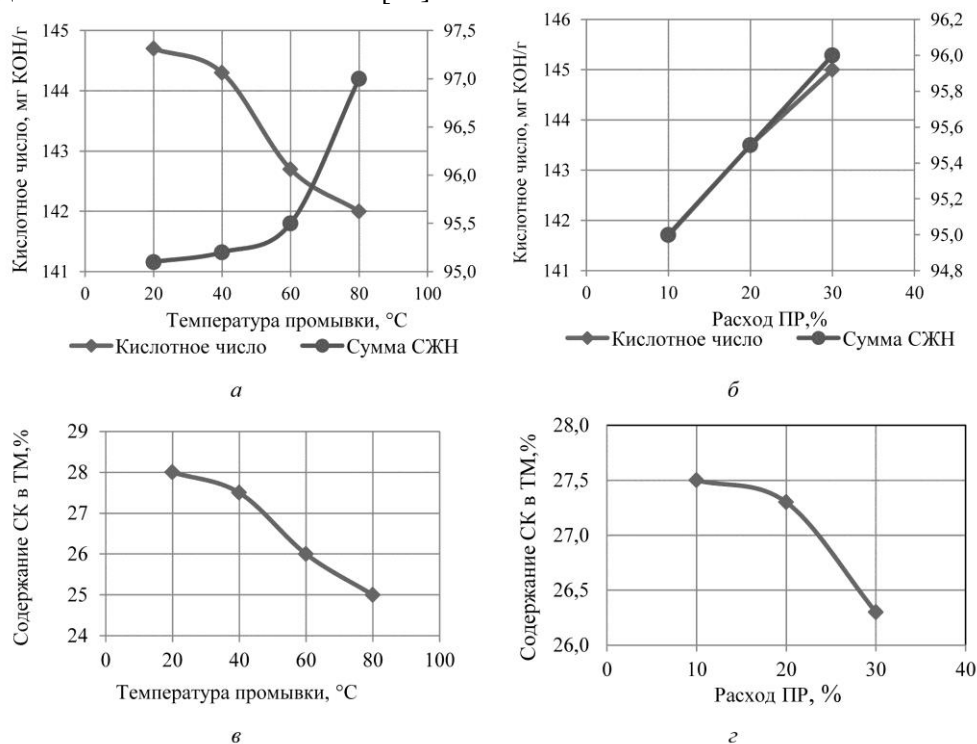


Рис. 3. Влияние параметров промывки СМ на характеристики ТМ (*а*, *б*) и содержание СК (*в*, *г*): *а*, *в* – температура промывки; *б*, *г* – расход ПР (цифры справа на вертикальной оси рис. 3, *а*, *б* – сумма СЖН)

Fig. 3. The effect of SS washing parameters on tall oil characteristics (*а*, *б*) and resin acid content (*в*, *г*): *а*, *в* – washing temperature; *б*, *г* – WS consumption (the digits on the right of the vertical axis of fig. 3, *а*, *б* – the amount of rosin, fatty acids, and neutral substances)

Содержание СК (рис. 3, *в*) увеличивается при снижении как температуры промывки, так и расхода ПР. Рост температуры промывки СМ отрицательно сказывается на содержании СК в ТМ. При повышении температуры промывки свыше 60 °С происходит снижение доли ТМ, что можно объяснить увеличением доли лигнина в СМ. Кроме того, при получении ТМ лигнин на

своей поверхности сорбирует смоляные кислоты в большей степени, чем жирные кислоты. Следовательно, при снижении общего количества кислот, доля СК сокращается больше, чем жирных кислот [9].

Увеличение расхода ПР уменьшает содержание СК в ТМ (рис. 3, з). Это можно объяснить тем, что при высокой температуре и сильном разбавлении мыла соли СК, в отличие от жирных кислот, переходят в молекулярно-растворенное состояние; для стимулирования образования мицелл необходимо понижение температуры.

Заключение

На основании результатов эксперимента предложены оптимальные параметры промывки смешанного сульфатного мыла для снижения потерь сырого таллового масла и улучшения его показателей. Выход таллового масла, полученного из промытого при температуре 40 °С мыла, увеличивается на 2 % при расходе промывного раствора 10...20 % от объема сульфатного мыла. Лимитирующим показателем является массовая доля смоляных кислот, поэтому оптимальными параметрами промывки смешанного сульфатного мыла для обеспечения качества таллового масла являются температура 20...40 °С и расход промывного раствора 10...20 % от объема мыла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 502992 СССР, МПК D21C 11/00. Способ очистки сырого сульфатного мыла: № 2008646/28-12: заявл. 21.03.74; опубл. 15.02.76 / Н.Ф. Комшилов, Н.С. Полежаева. [Komshilov N.F., Polezhayeva N.S. *A Method of Crude Sulfate Soap Purification*. Authorship Certificate USSR, no. 502992, 1976].
2. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М., Соколова А.А., Филиппов Б.С., Мариев А.А., Тиранов П.П., Третьяков С.И., Новожилов Е.В., Гельфанд Е.Д., Селянина Л.И., Борисов Г.И. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с. [Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M., Sokolova A.A., Filippov B.S., Mariyev A.A., Tiranov P.P., Tret'yakov S.I., Novozhilov E.V., Gelfand E.D., Selyanina L.I., Borisov G.V. *Processing of Sulfate and Sulfite Liquors: Textbook for Universities*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p.].
3. Богомолов Б.Д., Соколова А.А. Побочные продукты сульфатно-целлюлозного производства (химия и технология). М.: Гослесбумиздат, 1962. 280 с. [Bogomolov B.D., Sokolova A.A. *By-products of Sulfate Pulp Production (Chemistry and Technology)*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 280 p.].
4. Головин А.И., Трофимов А.Н., Узлов Г.А., Жукова И.П., Киприанов А.И., Прохорчук Т.И., Ковалев В.Е. Лесохимические продукты сульфатцеллюлозного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 288 с. [Golovin A.I., Trofimov A.N., Uzlov G.A., Zhukova I.P., Kiprianov A.I., Prokhorchuk T.I., Kovalev V.E. *Wood Chemical Products of Sulfate Pulp Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 288 p.].
5. Кузнецов С.Н. Исследование процесса пенной промывки сульфатного мыла // Лесохимия и подсочка: реф. информ. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1988. № 7. С. 4. [Kuznetsov S.N. Phenomenology of Foam Washing of Sulfate Soap. *Referativnaya informatsiya «Lesokhimiya i podsochka»*, 1988, no. 7, p. 4].
6. Минина Е.В., Третьяков С.И., Селянина С.Б. Промывка сульфатного мыла кислой водой // Тез. докл. Кластер-конференций по органич. химии «ОргХим-2013», СПб. (п. Репино), 17–21 июня 2013 г. С. 415–416. [Minina E.V., Tret'yakov S.I., Selyanina S.B. Sulfate Soap Washing with Acid Water. *Abstracts of the Cluster Conference*

on Organic Chemistry “OrgChem-2013”, Repino Village, Saint Petersburg, July 17–21, 2013. Saint Petersburg, 2013, pp. 415–416].

7. Патент 2528196 Российская Федерация, МПК с11В 13/00. Способ изготовления неочищенного таллового масла промыванием мыла с отделением карбоната кальция: № 2528196: опубл. 10.09.2014 / Р. Боулз, Д. Форэн, Д. Гриффин, Э. Суонн. опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25. [Boulz R.I., Forehn D.S., Griffin D.Kh., Suonn E.H. Method of Manufacturing Crude Tall Oil by Soap Washing with Separation of Calcium Carbonate. Patent RF, no. 2528196, 2014].

8. Селянина Л.И., Селянина С.Б. Переработка низкокачественного сульфатного мыла: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 208 с. [Selyanina L.I., Selyanina S.B. *Recycling of Low-Quality Sulfate Soap*: Monography. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 208 p.].

9. Селянина С.Б., Селиванова Н.В. Гидрофильно-олеофильные свойства сульфатного лигнина // Журн. прикладной химии. 2007. Т. 80, № 7. С. 170–175. [Selyanina S.B., Selivanova N.V. Hydrophilic-Oleophilic Properties of Sulfate Lignin. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2007, vol. 80, no. 7, pp. 170–175].

10. Селянина С.Б., Шварев П.О. Влияние промывки сульфатного мыла на процесс получения таллового масла // Лесн. журн. 1996. № 1-2. С. 157–161. [Selyanina S.B., Shvarev P.O. The Effect of Sulfate Soap Washing on Tall Oil Obtaining. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1996, no. 1-2, pp. 157–161].

11. Третьяков С.И., Глуханов А.А. Оптимизация промывки сульфатного мыла кислой водой и оценка соответствия качества получаемого таллового масла требованиям стандартов // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 149–160. [Tret'yakov S.I., Glukhanov A.A. Optimization of Sulphate Soap Washing with Acid Water and the Quality Conformance Assessment of Tall Oil with Regulatory Requirements. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2018, no. 3, pp. 149–160]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.3.149](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.149); URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/29e/149_160.pdf

12. Труфанова М.В., Селянина С.Б. Влияние минеральных компонентов на процесс утилизации отработанных варочных растворов сульфат-целлюлозного производства // Материалы Междунар. молодеж. экол. форума стран Баренц-региона, Архангельск, 2–5 июля 2001 г. Архангельск: АГТУ, 2001. С. 167–168. [Trufanova M.V., Selyanina S.B. The Influence of Mineral Components on the Disposal of Spent Cooking Solutions of Sulfate Pulp Production. *Proceedings of the International Youth Ecologist Forum of the Countries of the Barents Region, Arkhangelsk, July 2–5, 2001*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2001, pp. 167–168].

13. Эффективность промывки сульфатного мыла различными растворами // Лесохимия и подсоска: реф. информ.. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1975. № 8. С. 5. [The Effectiveness of Sulfate Soap Washing with Various Solutions. *Referativnaya informatsiya «Lesokhimiya i podsochka»*, 1975, no. 8, p. 5].

14. *Chemical Pulping. Part 2, Recovery of Chemicals and Energy*. Ed. by P. Tikka. Finland, Paper Engineers' Association, 2008. 387 p.

15. Foran C.D. Tall Oil Soap Recovery. *TAPPI Kraft Recovery Short Course, Tampa, FL, USA, June 17–20, 2005*. Tampa, FL, Tappi, 2005, pp. 4.3-1–4.3-21.

16. Foran C.D. Tall Oil Soap Recovery. *Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes*. Tappi, 2007, pp. 45–56.

17. Foran C.D., Swann F.E., Bowles R.E. *Process for Recovering Crude Tall Oil*. Patent US, no. 10041020, 2018.

18. Hofstedt A.G. *Method and System for Washing of Crude Tall Oil Soap*. Patent WO/2016/093765, 2016.

19. Hofstedt A.G. *Method and Arrangement for the Separation of Tall Oil Products from Black Liquor*. Patent US, no. 9719048, 2017.

20. Johansson A. Purification of Sulphate Soap. *International Tall Oil Symposium, Imatra, Finland, June 7–9, 1983*. Turku, Åbo Akademis kopieringscentral, 1983, p. 99–109.

21. Kovasin K., Tikka P., Laxén T. Solving Soap and Turpentine Related Process Problems in Softwood Kraft Mills. *Pulp and Paper: Canada*, 2002, vol. 103, iss. 6, pp. 30–35.
22. Morris C.W., Watkins G.S. *Tall Oil Recovery*. Patent US, no. 3575952, 1971.
23. Nogueira J.M.F., Castanho M.A.R.B. Crude Tall-Oil Sodium Salts Micellization in Aqueous Solutions Studied by Static and Dynamic Light Scattering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, vol. 191, iss. 3, pp. 263–268. DOI: [10.1016/S0927-7757\(01\)00692-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00692-6)
24. Panda H. *Handbook on Tall Oil Rosin Production, Processing and Utilization*. New Delhi, Asia Pacific Business Press Inc., 2013. 480 p.

MIXED SULFATE SOAP WASHING WITH NEUTRALIZED SPENT ACID

E.V. Starzhinskaya¹, Process Engineer; ResearcherID: [E-2862-2019](https://orcid.org/0000-0002-4989-264X),
ORCID: [0000-0002-4989-264X](https://orcid.org/0000-0002-4989-264X)

A.M. Kryazhev², Doctor of Engineering, Chief Technologist;
ORCID: [0000-0002-3287-6387](https://orcid.org/0000-0002-3287-6387)

S.I. Tret'yakov³, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349),
ORCID: [0000-0003-1783-5349](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349)

A.A. Glukhanov³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.

¹LLC “Tekhservis”, ul. Sovetov, 4, of. 300, Novodvinsk, 164900, Russian Federation;
e-mail: Lesochimik-lena@mail.ru

²LLC “Advis Plus”, nab. Obvodnogo kanala, 150, korp. 363, of. 232, Saint Petersburg, 191011, Russian Federation; e-mail: kryazhev@advisplus.com

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: s.tret'yakov@narfu.ru

Sulfate soap, being a valuable by-product of pulp production by the sulfate process, is a mixture of saponified resin and fatty acids and unsaponifiables (sterols, fatty alcohols, aliphatic hydrocarbons, etc.). Sulfate soap micelles enlarge and during surfacing may entrain a portion of black liquor containing dissolved lignin, as well as impurities of calcium compounds; when settling the liquor formed in pulp washing. The main method of removing black liquor is additional settling of sulfate soap prior its processing. It is reasonable and cost effective to use for washing a solution of salts formed in decomposition of soap or spent acid neutralized to pH = 8–14. The article shows the necessity of washing of sulfate soap obtained from different wood species in pulping. Neutralized spent acid received in soap decomposition was used as a washing solution in an amount of 10, 20, and 30 % of sulfate soap volume. Washing was carried out at a temperature of 20–80 °C. The optimal conditions for mixed sulfate soap washing were determined: temperature (20–40 °C), and flow rate of the washing solution (10–20 %). It was found that under optimal washing conditions of mixed sulfate soap with neutralized spent acid, the yield of crude tall oil and its acid number increase, the alkali and lignin content decrease, and the decrease of resin acids in tall oil is prevented.

For citation: Starzhinskaya E.V., Kryazhev A.M., Tret'yakov S.I., Glukhanov A.A. Mixed Sulfate Soap Washing with Neutralized Spent Acid. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 194–202. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.194

Keywords: sulfate soap, tall oil, black liquor, lignin, soap washing.

Поступила 07.02.19 / Received on February 07, 2019



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 630*181.351

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.203

РОЛЬ ЛЕСОВ В СОЗДАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ КОМФОРТНОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ И МЕРЫ ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ*Н.А. Моисеев, акад. РАН, гл. науч. сотр.; ORCID: [0000-0001-7061-652X](https://orcid.org/0000-0001-7061-652X)*

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; e-mail: nikolaymoiseev2016@yandex.ru

В статье рассматривается экологическая роль лесов в организации устойчивого управления и пользования ими, а также необходимые мероприятия для создания экологически комфортной окружающей среды на примере Московской области.

Для цитирования: Моисеев Н.А. Роль лесов в создании экологически комфортной среды обитания и меры для ее реализации // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 203–207. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.203

Ключевые слова: экологическая роль леса, устойчивое управление лесами, интенсификация многоцелевого лесного хозяйства.

Леса, являясь важнейшим экологическим каркасом биосферы, стабилизирующим многие природные процессы, регулируют газовый состав атмосферы, сохраняют чистоту вод и воздушного бассейна, предохраняют землю от водной и ветровой эрозии. Известно, что от лесистости и качества лесов зависит гидрологический режим рек и почвенного покрова. С сокращением лесистости повышается аридизация климата, учащаются засухи, возрастает масштаб наводнений [6, 8]. Леса – самый мощный поглотитель углекислого газа и основной поставщик кислорода, без которого не обходится все живое на планете Земля [1]. При этом они производят ионизированный кислород, активизирующий жизненные процессы. Кроме того, леса еще и выделяют фитонциды, убивающие болезнетворные бактерии, служат убежищем и хранителем всего многообразия живого мира, являясь самым выдающимся представителем биоразнообразия, а также важнейшей составляющей частью экологически устойчивого и продуктивного ландшафта, создают комфортную среду для обитания людей и всего животного царства. Леса для людей предоставляют многочисленные не только материальные, но и духовные блага, а также экологически чистую среду для жизни и массового отдыха населения.

Изложенное выше не исчерпывает весь перечень экологических функций леса, но и из представленного наглядно видна его выдающаяся экологическая роль, реализация которой, наряду с экономическим и социальным значением лесов, является стратегической целью и повседневными задачами лесного хозяйства. К сожалению, состояние этой отрасли народного хозяйства не соответствует заявленной цели и вытекающим из нее задачам не только в нашей стране, но и в мире в целом [9, 10]. В последние десятилетия площади мировых лесов сокращаются в среднем на 10...15 млн га/год. Земной шар «лы-

сеет». Исчезла половина тропических и субтропических лесов, в 2–3 раза сократилась площадь лесов в странах Европы, Америки и Азии, что сопровождалось резким снижением в них биоразнообразия.

В России уже подорван качественный состав лесов. Из-за неудовлетворительного ведения лесного хозяйства продолжается широкомасштабная смена хозяйственно ценных пород на малоценные, разрушена система государственного управления лесами [2]. Негативный вклад внес и существующий Лесной кодекс Российской Федерации, принятый в декабре 2006 г.

В адрес лесоуправления прозвучала резкая критика из уст президента России В.В. Путина на выездном заседании президиума Госсовета в 2013 г. (г. Улан-Удэ) [7] и руководства Совета Федерации 16 января 2019 г.

Президент предельно ясно сформулировал основные недостатки в этой области: «К сожалению, ни государственные органы, ни хозяйствующие субъекты явно на это высокое звание хозяина леса не тянут. Несмотря на новый Лесной кодекс, на его постоянное совершенствование, на различные программы, различные проекты, продолжается неэффективное использование леса». «В обозначенных вопросах есть одна общая тема, одна общая проблема... это устаревшие, постоянно тормозящие весь процесс управленческие решения..., которые говорят о том, что отрасль в целом находится в критическом состоянии». «Субъектам Федерации... были переданы полномочия по защите и воспроизводству лесов, но большинство регионов достаточно формально отнеслись к составлению лесных планов, закладывали в их основу, как правило, устаревшие данные и подходы. Это привело к серьезным негативным последствиям».

В области лесного сектора экономики Россия повторяет роковые уроки прошлого таких стран, как США и Финляндия, которые в ходе многолетней хищнической эксплуатации своих лесов к 50-м годам прошлого столетия довели их «до ручки», истощив рентабельные ресурсы леса, и были вынуждены кардинально изменить свою государственную лесную политику, начав с укрепления роли самого государства в управлении лесами, придав ему три важнейших значения: инициатора, организатора и координатора действий всех субъектов, связанных с лесными отношениями. Благодаря этому им удалось через стратегические лесные планы обеспечить прорыв в развитии лесного сектора экономики и стать примером для многих других стран.

Общей тенденцией развития лесного хозяйства является переход от одноцелевого к многоцелевому лесоуправлению, первоочередным объектом его реализации являются защитные леса. В России типичным объектом такого рода являются леса Московской области, занимающие у нас особое положение. По идее, они должны стать «визитной карточкой» для лесов всей страны, но, к сожалению, пока по причинам, общим для лесов всей России, попадают под оценку, данную выше президентом [5, 7].

Особое значение лесов столичной области заключается в том, что они целиком относятся к категории защитных лесов, в которых на первом плане выделяются экологические и социальные функции многоцелевого назначения, требующие многоцелевого ведения лесного хозяйства, обеспечивающего и условия массового отдыха населения в лесу, и формирование адекватного этому требованию ландшафта высокого эстетического значения, и сохранение биоразнообразия, и, одновременно, своевременное обновление лесов соответствующими способами рубок с формированием экологически устойчивых,

здоровых, продуктивных лесов, охраной их от пожаров, вредителей и болезней, а также от всякого рода лесонарушений. Другими словами, эти леса требуют интенсивного многоцелевого лесного хозяйства как высшего этапа хозяйствования в лесу.

Вместо этого «героем дня» для области стал короед-типограф и связанные с ним нескончаемые санитарные рубки [3]. Поврежденные деревья, не убранные своевременно, превращаются в сухостой, захламляя леса и создавая опасную пожарную обстановку. Но санитарные рубки – это борьба с последствиями, а не с причинами. Этот вредитель относится к числу вторичных и является последствием другой болезни – так называемой корневой губки, приводящей к поражению и ослаблению хвойных древостоев, преимущественно ельников, растущих здесь на плодородных для них почвах выщипанных бонитетов. Быстрый рост их на таких почвах приводит к ослаблению иммунитета, а при наличии источников – к поражению корневой губкой, которая, распространяясь от корней по стволу, выводит из строя самую ценную комлевую часть ствола и одновременно способствует резкому ослаблению устойчивости по мере повышения возраста древостоя. На таких почвах возрасты количественной и технической спелости на пиловочник следуют близко друг за другом и допускают вырубку древостоя возраста 80 лет, когда еще древесина пригодна для лесопиления и домостроения. Как по пословице «Заставь дурака богу молиться, он и лоб расшибет», так и в данном случае официальные возрасты рубок в этих защитных лесах завышали до 120–140 лет, пользуясь «философией о старовозрастных лесах», требующих, якобы, сохранения, что приводило к их перестойности, резкому ослаблению экологической устойчивости и появлению вредителей и болезней.

Какие меры для лесов Московской области следует принять, чтобы выйти из сложившейся катастрофической ситуации? Прежде всего, надо отрегулировать возрасты рубок, затем снять запрет на своевременное проведение соответствующих составу лесов рубок, направленных на их обновление лесов. Необходимо обосновать региональные системы лесохозяйственных мероприятий на зонально-типологической основе, с учетом целевого назначения отдельных категорий лесов, что будет основанием для планирования взаимосвязанных способов рубок, возобновления и ухода за лесом. Эта работа уже проводилась научными учреждениями для закрепленных за ними лесных территорий страны, но была проигнорирована в годы так называемой перестройки, когда была сделана ставка на арендаторов с ликвидацией государственных органов управления лесами и государственной лесной охраны, что привело к резкому снижению уровня лесного хозяйства и широкому масштабу нелегальных рубок.

Поскольку Московская область, как субъект РФ, зависима от принятых на федеральном уровне нормативно-правовых актов, естественно, заслуживают внимания меры, принимаемые по управлению лесами. В связи с создавшимся критическим положением лесной отрасли и согласно доступной информации наметились определенные подвижки в этой сфере. Допускается даже разработка нового Лесного кодекса Российской Федерации, для чего последовало поручение соответствующим ведомствам от главы правительства о предложениях по этому весьма болезненному вопросу. Руководитель Рослесхоза уже высказал предложения по восстановлению разрушенной федеральной вертикали управления лесами; созданию федеральной лесной службы с

госкорпорациями для ведения лесного хозяйства на территории, не переданной в аренду (около 80 % от площади лесного фонда), наделив их возможностью вести лесохозяйственную деятельность; восстановлению лесоустройства, как «важнейшего инструмента лесоуправления», вернув его на федеральный уровень в подчинение федеральной лесной службы, а на последнюю возложив организацию стратегического лесного планирования, без которого немыслимо управление лесами, с учетом отраслевой специфики – долгосрочного периода лесовыращивания, измеряемого многими десятками лет; возрождению былой дееспособности авиалесоохраны, без которой невозможны своевременное обнаружение лесных пожаров и их ликвидация в зародыше; кардинальному изменению способов решения вопросов ценообразования с переходом на рентные платежи, которые в цивилизованных странах служат основой для определения стартовых рыночных цен на древесину [4], отпускаемую на корню; пересмотру прав арендных отношений, сохранив их только за теми хозяйствующими субъектами, которые на практике перерабатывают всю заготовленную древесину, не допуская ее продажу в круглом виде, особенно на экспорт.

Перечисленный порядок вопросов для решения, безусловно, заслуживает внимания и позволит оздоровить обстановку с лесными делами в стране.

Что касается защитных лесов Московской области, то здесь вообще недопустимы арендные отношения, тем более, что экологические и социальные общественно значимые блага не должны подлежать коммерциализации, ибо на практике они заканчиваются, по выражению доктора экономических наук, проф. А.П. Петрова, «тихой приватизацией». Именно для лесов Московской области следует восстановить лесничество как местный орган управления лесами, возложив на него ведение лесного хозяйства под контролем регионального органа управления лесами и федеральной лесной службы.

Такой порядок установлен в государственных лесах Финляндии – законодательнице лесных мод, и в Германии – на родине мирового лесного хозяйства, и во многих других странах, использующих их пример.

Безусловно, перечисленные вопросы не просты для решения. Они на определенный период всколыхнут противодействие тех сил, которые не согласны с изменением сложившейся кризисной ситуации. Но руководство страны и общественные силы, заинтересованные в нормализации управления лесами страны, сумеют направить лесные дела в нужное русло с учетом стратегически важной экологической, социальной и экономической роли наших лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Честных О.В., Сонген Б. Углерод в лесных и сельскохозяйственных угодьях России. М.: КМК, 2005. 200 с. [Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Utkin A.I., Chestnykh O.V., Songen B. *Carbon in Forest and Agricultural Lands of Russia*. Moscow, KMK Publ., 2005. 200 p.].
2. Кризис в управлении и пользовании лесами и возможные пути выхода из него // Лесн. газ. 2016. 30 апр. С. 1–2. [Moiseev N.A. Crisis in Management and Timber Exploitation and Possible Measures. *Lesnaya gazeta*, 2016, no. 33(10683), pp. 1–2].
3. Моисеев Н.А. Короед не должен быть героем дня // Рос. лес. вести. 2014. 14 марта. (№ 10). С. 5. [Moiseev N.A. Bark Beetle Should not Be the Hero of the Day. *Rossiyskiye lesnyye vesti*, 2014, no. 10, p. 5].

4. Моисеев Н.А. Методические рекомендации по определению рыночных цен древесины на корню и совершенствованию экономического механизма устойчивого управления лесами // Лесн. вестн. 2018. № 2. С. 35–40. [Moiseev N.A. Methodological Recommendations for the Determination of the Market Prices of Wood to the Root and Improvement of the Economic Mechanism of Sustainable Forest Management. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2018, no. 2, pp. 35–40].

5. Моисеев Н.А., Сурканов О.И. Проблемы лесов Подмосковья и альтернативы их решения // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014. № 3. С. 141–145. [Moiseev N.A., Surkanov O.I. Problems of Forests near Moscow and Ways to Its Solutions. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, no. 3, pp. 141–145].

6. Побединский А.В. Водоохранная и почвозащитная роль лесов. Пушкино: ВНИИЛМ, 2013. 208 с. [Pobedinskiy A.V. *Water and Soil Protection Role of Forests*. Pushkino, VNIILM Publ., 2013. 208 p.].

7. Путин В.В. Лес нужно спасать // Лесн. газ. 2013. 20 апр. С. 1–2. [Putin V.V. The Forest Must Be Saved. *Lesnaya gazeta*, 2013, no. 30(10380), pp. 1–2].

8. Решение проблемы глобального изменения климата, как необходимое условие устойчивого развития мирового сообщества // Сб. материалов стенограмм секции «Экологическая политика» Научно-экспертного совета при председателе Совета Федерации Федерального собрания РФ. М.: Совет Федерации, 2008. 65 с. [Problem Solution of Global Climate Change as a Necessary Condition for the Sustainable Development of the World Community. *Proceedings of the Transcripts of the Section “Environmental Policy” of the Scientific Expert Council under the Chairman of the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation*. Moscow, Federation Council Publ., 2008. 65 p.].

9. Changes in Global Forest Resources from 1990 to 2015. Ed. by K. MacDicken. *Forest Ecology and Management. Science to Sustain the World's Forests*, 2015, vol. 352, pp. 1–146.

10. *The European Forest Sector Outlook Study II: 2010–2030*. Geneva, United Nations, 2011. 108 p.

THE ROLE OF FORESTS IN CREATION OF A COMFORTABLE ENVIRONMENT AND MEASURES FOR ITS IMPLEMENTATION

N.A. Moiseev, Acad. of RAS, Chief Research Scientist; ORCID: [0000-0001-7061-652X](https://orcid.org/0000-0001-7061-652X)
All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institut-
skaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation;
e-mail: nikolaymoiseev2016@yandex.ru

The article discusses the ecological role of forests for the organization of sustainable management and use of forests, as well as the necessary measures for creation of an comfortable environment on the example of Moscow region.

For citation: Moiseev N.A. The Role of Forests in Creation of a Comfortable Environment and Measures for Its Implementation. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 203–207. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.203

Keywords: ecological role of forests, sustainable forest management, intensification of multipurpose forestry.

Поступила 02.08.19 / Received on August 02, 2019

УДК 630*232.411

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.208

**ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ
НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ КУЛЬТУР СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
ДО 25-ЛЕТНЕГО ВОЗРАСТА В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОГО ХЭНТЭЯ
(СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)****З. Цогт¹**, канд. с.-х. наук; ORCID: [0000-0001-6304-405X](https://orcid.org/0000-0001-6304-405X)**Ч. Дугаржав¹**, акад. АНМ, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: [0000-0002-9880-8838](https://orcid.org/0000-0002-9880-8838)**А.И. Лобанов²**, канд. биол. наук; ORCID: [0000-0003-0505-8212](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212)**С. Гэрэлбаатар³**, канд. биол. наук, доц.; ORCID: [0000-0002-9561-5256](https://orcid.org/0000-0002-9561-5256)**Б. Булган-Эрдэнэ³**, магистрант; ORCID: [0000-0003-3566-0837](https://orcid.org/0000-0003-3566-0837)¹Институт общей и экспериментальной биологии Монгольская академия наук, просп. Жукова, д. 77, г. Улаанбаатар, Монголия, 210351; e-mail: ztsogt@yahoo.com, chdugaa@yahoo.com²Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии, а/я 709, г. Абакан, Республика Хакасия, Россия, 655019; e-mail: anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru³Монгольский государственный университет, ул. Университетская, д. 3, г. Улаанбаатар, Монголия, 14201; e-mail: gerelbaatar@seas.num.edu.mn, bbulga4421@gmail.com

Изучение продуктивности леса является одной из главных задач лесной науки на протяжении последних 170 лет. Выделяются приоритетность и весомость исследований, направленных на выявление наиболее значимого элемента продуктивности древостоев – массы стволовой древесины. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – основная порода при искусственном восстановлении хвойных и бореальных лесов Монголии, подвергнутых антропогенным воздействиям. Перед нами стояла задача изучить возрастную динамику структуры надземной фитомассы культур сосны обыкновенной в условиях Западного Хэнтэя (Северная Монголия). Объектами служили чистые по составу участки культур сосны обыкновенной, созданные методом посадки, в возрасте от 9 до 25 лет. На временных пробных площадях отбирали по 10 модельных деревьев, которые разделяли на фракции: сухие ветви (сучья), живые ветви, хвоя, кора ствола, древесина ствола. Установлено, что общий запас древостоя в исследуемом возрастном интервале постепенно повышался и к возрасту 25 лет достигал 21,8 м³/га. Масса стволовой древесины в общей надземной фитомассе с возрастом также увеличивалась. В процентном отношении этот показатель изменился от 23,1 % в 9-летних культурах до 47,8 % в 25-летних. Для такой фракции фитомассы, как хвоя, присуща обратная зависимость: процент массы хвои в надземной фитомассе уменьшается от 57,7 % в 9-летних культурах до 15,0 % в 25-летних. Полученные результаты могут быть использованы при формировании базы данных о фитомассе лесов Монголии, а также при проектировании противопожарных мероприятий и прогнозировании численности хвое- и листогрызущих насекомых.

Для цитирования: Цогт З., Дугаржав Ч., Лобанов А.И., Гэрэлбаатар С., Булган-Эрдэнэ Б. Возрастная динамика структуры надземной фитомассы культур сосны обыкновенной до 25-летнего возраста в условиях Западного Хэнтэя (Северная Монголия) // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 208–215. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.208

Ключевые слова: лесные культуры, сосна обыкновенная, надземная фитомасса, фракции фитомассы, Западный Хэнтэй, Северная Монголия.

Введение

Главной проблемой лесного хозяйства Монголии является воспроизводство лесных ресурсов хозяйственно-ценными породами и повышение продук-

тивности лесных массивов. Выращивание лесных культур относится к основным мероприятиям повышения продуктивности, сохранения и улучшения качественного состава лесов [5, 23, 24].

На территории Северной Монголии в условиях Западного Хэнтэя сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) служит ведущей породой при искусственном восстановлении коренных лесов [11, 14, 16], выполняющих защитные, средообразующие [17], водоохранные и другие экологические функции [24].

Леса играют важную роль в поддержании глобального углеродного баланса и климата планеты. Одна из важнейших характеристик функционирования лесных экосистем – биологическая продуктивность, которая используется для оценки углерододепонирующей емкости лесов, экологического мониторинга, устойчивого ведения лесного хозяйства, моделирования продуктивности лесов с учетом глобальных изменений, изучения структуры и биоразнообразия лесного покрова [10].

Сведения о структуре и запасах фитомассы культур сосны обыкновенной необходимы для оценки ресурсов и разработки хозяйственных основ формирования продуктивных и устойчивых искусственных насаждений [1, 13].

Ряд научных исследований [9, 19–21, 26] посвящен разработке аллометрических уравнений для определения надземной и подземной фитомассы деревьев основных лесообразующих пород в зависимости от возраста, диаметра и высоты лесных культур в разных лесорастительных условиях континента. Некоторые исследования направлены на анализ структуры [1, 9, 12, 19] и продуктивности [2, 9, 20, 25, 26] надземной части фитомассы в процессе формирования культур. R. Baishya с соавторами [12] отмечали, что лесные культуры с высокой продуктивностью могут играть потенциальную роль в сохранении и поглощении углерода в лесной экосистеме при глобальном потеплении. Возрастные изменения по мере роста деревьев отражаются на их форме и распределении в древостое, а также на доле фитомассы, приходящейся на компоненты деревьев [25, 26].

В Монголии изучению запасов надземной фитомассы культур сосны обыкновенной и ее фракционному составу посвящено немного работ [13–15]. Они не дают полного представления о возрастной динамике ее структуры в количественном и качественном отношении.

Цель исследования – изучение возрастной динамики структуры надземной фитомассы за первые 25 лет после создания культур сосны обыкновенной в условиях Западного Хэнтэя (Северная Монголия).

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись чистые по составу участки посадок культур сосны обыкновенной в возрасте от 9 до 25 лет, произрастающие на дерново-лесных почвах [4] древних террас р. Хяраан гол. Метод создания культур – посадка. Возраст посадочного материала – 2-летние сеянцы. Способ обработки почвы на площадях лесокультурного фонда – нарезка борозд плугом ПКЛ-70 глубиной 20 см. Район исследования находится в северной части территории распространения сосновых насаждений в Селенгинском аймаке и по лесорастительному районированию относится к Западно-Хэнтэйской провинции Южно-Забайкальской котловинно-горной области [3]. Климат в этом районе резко континентальный, проявляющийся в больших различиях темпера-

тур зимы и лета, дня и ночи. Средняя температура воздуха января, самого холодного зимнего месяца, в среднем составляла $-22,5^{\circ}\text{C}$, а июля, самого теплого летнего месяца, $+20,1^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая температура воздуха в пределах рассматриваемой территории $+0,9^{\circ}\text{C}$. Годовая сумма осадков в среднем 272,1 мм, обильное выпадение осадков наблюдается в летние месяцы. Наибольшее количество осадков в летнее время приходится на июль (64,0 мм) и август (70,6 мм). Глубина сезонного промерзания почвы достигает 1,8...2,5 м. Последние заморозки заканчиваются в начале июня, а первые отмечаются в начале сентября [18]. С 1970 г. в этом районе работает комплексная биологическая экспедиция Российской академии наук и Академии наук Монголии.

В ходе эксперимента использовали метод однократных обмеров на временных пробных площадях, заложенных в культурах сосны обыкновенной. Обследование проводили с учетом методических рекомендаций В.В. Огиевского, А.А. Хирова [6], М.Г. Семечкиной [8], Ф.И. Плешикова с соавторами [7], Н.А. Бабича с соавторами [2], В.А. Усольцева [9]. На каждой пробной площади отбирали по 10 модельных деревьев без признаков усыхания из разных ступеней толщины. Ствол модельных деревьев в свежесрубленном состоянии распиливали на секции длиной 1...2 м, обмеряли и взвешивали на платформенных весах с точностью ± 50 г. Также взвешивали живую и сухую части кроны. Из нижней, средней и верхней частей кроны отбирали по три модельных ветви (крупную, среднюю и мелкую). Ветви взвешивали с точностью $\pm 0,1$ г и фракционировали (живые ветви, сухие ветви (сучья), хвоя, кора ствола, древесина ствола). Образцы фракций фитомассы сушили при температуре 105°C до абс. сухого состояния, взвешивали и пересчитывали на массу дерева и древостоя в абсолютно сухом состоянии. Для этой цели было отобрано 150 образцов фитомассы.

Оценку показателей структуры надземной фитомассы древостоев проводили в базе данных, разработанной в среде Microsoft Access и включающей все исходные данные, обеспеченные программами их обработки.

Результаты исследования и их обсуждение

Таксационная характеристика чистых по составу исследованных культур сосны обыкновенной представлена в табл. 1, результаты выполненных исследований – в табл. 2.

Таблица 1

Таксационные показатели исследованных культур сосны обыкновенной

Номер пробной площади	Возраст, лет	Густота, шт./га		Средние		Сумма площадей сечения, $\text{м}^2/\text{га}$	Запас, $\text{м}^3/\text{га}$
		посадки	стояния	высота, м	диаметр, см		
VI	9	3000	2011	1,5	1,5	2,34	1,7
IV	12	3000	1477	2,2	3,8	3,36	4,7
V	15	3000	1444	3,5	5,0	6,06	7,5
I	19	3000	1555	4,5	5,3	5,28	8,1
III	21	3000	1077	6,6	9,5	11,91	21,2
II	25	3000	888	6,5	8,7	8,36	21,8

Таблица 2

**Биологическая продуктивность
исследованных культур сосны обыкновенной**

Возраст, лет	Фракция фитомассы					Итого
	Ствол		Ветви		Хвоя	
	Древесина	Кора	Живые	Сухие		
9	<u>0,6</u> 23,1	<u>0,2</u> 7,7	<u>0,3</u> 11,5	–	<u>1,5</u> 57,7	<u>2,6</u> 100
12	<u>1,7</u> 30,4	<u>0,4</u> 7,1	<u>1,3</u> 23,2	–	<u>2,2</u> 39,3	<u>5,6</u> 100
15	<u>2,7</u> 31,4	<u>0,7</u> 8,1	<u>2,5</u> 29,1	<u>0,1</u> 1,2	<u>2,6</u> 30,2	<u>8,6</u> 100
19	<u>3,3</u> 38,4	<u>0,6</u> 6,9	<u>2,3</u> 26,7	<u>0,4</u> 4,7	<u>2,0</u> <u>23,3</u>	<u>8,6</u> 100
21	<u>7,5</u> 44,4	<u>1,3</u> 7,7	<u>3,7</u> 21,9	<u>0,7</u> 4,1	<u>3,7</u> 21,9	<u>16,9</u> 100
25	<u>8,6</u> 47,8	<u>1,4</u> 7,8	<u>4,6</u> 25,5	<u>0,7</u> 3,9	<u>2,7</u> 15,0	<u>18,0</u> 100

Примечание. В числителе приведена масса фракций в абс. сухом состоянии в тоннах на 1 га; в знаменателе – в процентах от общей надземной массы.

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, следует отметить, что с увеличением возраста лесных культур от 9 до 25 лет общий запас древостоев закономерно повышается от 1,7 до 21,8 м³/га в связи с изменением высоты и диаметра деревьев.

Одним из индикаторов динамики развития лесных насаждений является фитомасса древостоя и ее фракционный состав [22, 27], которые зависят от возраста и густоты стояния деревьев. В возрастном интервале 9–25 лет запасы общей надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии с увеличением возраста культур и уменьшением густоты стояния деревьев повышаются от 2,6 до 18,0 т/га (см. табл. 1, 2).

В 9-летнем возрасте культур сосны основная доля фитомассы в абсолютно сухом состоянии приходится на хвою (57,7 %), наименьшая – на кору (7,7 %). Остальные фракции занимают промежуточное положение: древесина ствола – 23,1 %, живые ветви – 11,5 % (табл. 2). К 15-летнему возрасту культур, после смыкания крон в рядах, картина изменяется. Основная доля фитомассы приходится на древесину ствола (31,4 %), хвою (30,2 %) и живые ветви (29,1 %), остальное – на сухие сучья (1,2 %). К 25-летнему возрасту, после смыкания крон в рядах и междурядьях, основной процент фитомассы, приходящийся на древесину, увеличивается до 47,8 %, на сухие сучья – до 3,9 %.

Таким образом, в возрастном диапазоне 15–25 лет стволовая древесина накапливает основную часть надземной фитомассы древесного яруса культур сосны обыкновенной. С возрастом ее доля в общей надземной фитомассе древостоев повышается.

Заключение

Установлено, что в исследованном возрастном интервале (9–25 лет) запасы древостоев сосны обыкновенной постепенно увеличиваются и достигают 21,8 м³/га в 25-летнем возрасте. Масса стволовой древесины – наиболее

важный элемент продуктивности древостоев, с возрастом в общей надземной массе закономерно повышается как в абсолютных, так и относительных величинах. В процентном выражении масса стволовой древесины в надземной фитомассе возрастает с 23,1 % в 9-летних до 47,8 % в 25-летних культурах. Для такой фракции фитомассы, как хвоя, присуща обратная зависимость. В процентном выражении масса ассимиляционного аппарата в надземной фитомассе уменьшается с 57,7 % в 9-летних до 15,0 % в 25-летних культурах. Для коры и ветвей выявить каких-либо закономерностей не удалось.

Полученные результаты могут быть использованы для формирования банка данных о фитомассе основных лесообразующих пород Монголии, при проектировании лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности культур, и противопожарных мероприятий, поскольку содержат данные о запасе и пространственном распределении горючих веществ, а также при прогнозировании численности хвое- и листогрызущих насекомых, так как характеризуют потенциальную кормовую базу вредителей.

Для достижения оптимальной биологической продуктивности искусственных насаждений в молодых посадках сосны необходимо своевременно проводить агротехнические и лесоводственные уходы, улучшающие условия роста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Гельфанд Е.Д., Мелехов В.И., Клевцов Д.Н. Возрастное изменение показателей надземной фитомассы культур сосны северной подзоны тайги // Лесн. журн. 2012. № 2. С. 50–52. (Изв. высш. учеб. заведений). [Babich N.A., Gelfand E.D., Melekhov V.I., Klevtsov D.N. Age Variability of Superterranean Phytomass Indices of the Homogeneous Scots Pine Stands in the Northern Boreal Subzone. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2012, no. 2, pp. 50–52]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/95c/gber7.pdf>
2. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса культур сосны и ели в европейской части России. Архангельск: СОЛТИ, 2004. 112 с. [Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *The Above-Ground Phytomass Characteristics of Pine and Spruce Plantations in the European Part of Russia*. Arkhangelsk, Solombal'skaya tipografiya Publ., 2004. 112 p.].
3. Коротков И.А., Цэдэндаш Г. Карта лесов Монгольской Народной Республики (М. 1:1500000). М.: ГУГК МНР и ГУГК СССР, 1983. [Korotkov I.A., Tsedendash G. *Forest Map of Mongolian People's Republic (Scale 1:1500000)*. Moscow, General Directorate of Geodesy and Cartography of the Mongolian People's Republic, General Directorate of Geodesy and Cartography of the USSR Publ., 1983].
4. Краснощечков Ю.Н. Почвенный покров и почвы горных лесов Северной Монголии. Новосибирск: Наука, 2013. 196 с. [Krasnoshchekov Yu.N. *Soil Cover and the Soils of Mountain Forests in Northern Mongolia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 196 p.].
5. Лобанов А.И., Булган-Эрдэнэ Б., Цэдэндаш Г., Дугаржав Ч., Доржсүрэн Ч., Гэрэлбаатар С., Хадбаатар С. Опыт улучшения качественного состава лесов Монголии // Наука сегодня: теоретические и практические аспекты: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Вологда, 26 дек. 2018 г. Вологда, 2018. С. 15–17. [Lobanov A.I., Bulgan-Erdene B., Tsedendash G., Dugarjav Ch., Dorjsuren Ch., Gerelbaatar S., Khadbaatar S. Experiences for the Stand Quality Improvement in Mongolia. *Science Today: Theoretical and Practical Aspects: Proceedings of the Int. Sci-Pract. Conf., Vologda, December 26, 2018*. Vologda, 2018, pp. 15–17].

6. Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. Л.: ЛТА, 1967. 50 с. [Ogievskiy V.V., Khirov A.A. *Inspection and Study of Forest Plantations*. Leningrad, LTA Publ., 1967. 50 p.]
7. Плешиков Ф.И., Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф. и др. Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с. [Pleshikov F.I., Vaganov E.A., Vedrova E.F. et al. *Forest Ecosystems in the Yenisei Meridian*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 356 p.]
8. Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука, 1978. 166 с. [Semechkina M.G. *The Phytomass Structure of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 166 p.]
9. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с. [Usoltsev V.A. *Biological Productivity of the Northern Eurasian Forests: Methods, Database and Its Applications*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2007. 636 p.]
10. Усольцев В.А., Гаврилин Д.С., Часовских В.П., Борников А.В., Норицына Ю.В. География фитомассы, чистой первичной и удельной чистой первичной продукции лиственничников в пределах Евразии // Сиб. лесн. журн. 2014. № 3. С. 76–90. [Usoltsev V.A., Gavrillin D.S., Chasovskikh V.P., Bornikov A.V., Noritsina Yu.V. Geography of Phytomass, Net Primary and Specific Primary Production of Larch Forest within Eurasia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2014, no. 3, pp. 76–90].
11. Цогт З., Гэрэлбаатар С., Батнасан М., Лобанов А.И. Надземная фитомасса культур *Pinus sylvestris* L. в условиях Западного Хэнтэя (Монголия) // Ботанические исследования в Сибири. Красноярск: Поликом, 2013. Вып. 21. С. 79–90. [Tsogt Z., Gerelbaatar S., Batnasan M., Lobanov A.I. Above-Ground Phytomass of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Plantations Growing in the Western Khentey Mountains, Mongolia. *Botanicheskiye issledovaniya v Sibiri*, Krasnoyarsk, 2013, iss. 21, pp. 79–90].
12. Baishya R., Barik S.K., Upadhaya K. Distribution Pattern of Aboveground Biomass in Natural and Plantation Forests of Humid Tropics in Northeast India. *Tropical Ecology*, 2009, vol. 50(2), pp. 295–304.
13. Chatzichristaki Ch., Zagas Th. The Contribution of Natural and Artificial Regeneration at the Restoration of Fire-Affected Peri-Urban Forest of Thessaloniki (Northern Greece). *Global NEST Journal*, 2017, no. 19. no. 1, pp. 29–36.
14. Gerelbaatar S. *Specifics of the Formation of Scots Pine Plantations in Mongolia*: Cand. Biol. Sci. Diss. Ulaanbaatar, 2011. 103 p. (In Mongolian).
15. Gerelbaatar S., Baatarbileg N. Above-Ground Biomass Allocation in a Planted Forest in a Semi-Arid Region of Northern Mongolia. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 216–220.
16. Gerelbaatar S., Batsaikhan G., Tsogtbaatar J., Battulga P., Baatarbileg N., Gradel A. Assessment of Early Survival and Growth of Planted Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings under Extreme Continental Climate Conditions of Northern Mongolia. *Journal of Forestry Research*, 2019, pp. 1–14. DOI: [10.1007/s11676-019-00935-8](https://doi.org/10.1007/s11676-019-00935-8)
17. Gerelbaatar S., Byambagerel S., Baatarbileg N., Dugarjav Ch. Effects of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Plantations on Plant Diversity in Northern Mongolia. *Mongolian Journal of Biological Sciences*, 2018, no. 16(1), pp. 59–70.
18. *Meteorological Reference Book of People's Republic of Mongolia*. Ulaanbaatar, 1971, vol. 1. 319 p. (In Mongolian).
19. Morhart C., Sheppard J.P., Schuler J.K., Spiecker H. Above-Ground Woody Biomass Allocation and within Tree Carbon and Nutrient Distribution of Wild Cherry (*Prunus avium* L.) – A Case Study. *Forest Ecosystems*, 2016, vol. 3, art. 4. DOI: [10.1186/s40663-016-0063-x](https://doi.org/10.1186/s40663-016-0063-x)
20. Nouvellon Y., Laclau J.P., Epron D., Maire G.L., Bonnefond J.-M., Gonçalves J.L.M., Bouillet J.-P. Production and Carbon Allocation in Monocultures and

Mixed-Species Plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiology*, 2012, vol. 32, pp. 680–695. DOI: [10.1093/treephys/tps041](https://doi.org/10.1093/treephys/tps041)

21. Repola J., Ahnlund Ulvcrna K. Modelling Biomass of Young and Dense Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Dominated Mixed Forests in Northern Sweden. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 5, art. 1190. DOI: [10.14214/sf.1190](https://doi.org/10.14214/sf.1190)

22. Satoo T., Madgwick H.A.I. *Forest Biomass*. London, Kluwer Acad. Publ., 1982. 160 p.

23. Tsogtbaatar J. Deforestation and Reforestation Needs in Mongolia. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 201, iss. 1, pp. 57–63. DOI: [10.1016/j.foreco.2004.06.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.06.011)

24. Tsogtbaatar J. Deforestation and Reforestation of Degraded Forestland in Mongolia. *The Mongolian Ecosystem Network*. Tokyo, Springer, 2013, pp. 83–98. DOI: [10.1007/978-4-431-54052-6_7](https://doi.org/10.1007/978-4-431-54052-6_7)

25. Yang B., Xue W., Yu Sh., Zhou J., Zhang W. Effects of Stand Age on Biomass Allocation and Allometry of *Quercus acutissima* in the Central Loess Plateau of China. *Forests*, 2019, vol. 10(1), art. 41. DOI: [10.3390/f10010041](https://doi.org/10.3390/f10010041)

26. Zhang X., Zhang X., Han H., Shi Zh., Yang X. Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in an Age-Sequence of Mongolian Pine Plantations in Horqin Sandy Land, China. *Forests*, 2019, vol. 10(2), art. 197. DOI: [10.3390/f10020197](https://doi.org/10.3390/f10020197)

27. Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europa. *Silva fennica monographs*, 2005, no. 4, pp. 1-2, 5-63.

AGE-RELATED DYNAMICS OF ABOVE-GROUND PHYTOMASS STRUCTURE OF SCOTS PINE PLANTATIONS AGED UP TO 25 IN THE WESTERN KHENTII MOUNTAINS OF NORTHERN MONGOLIA

Z. Tsogt¹, Candidate of Agriculture; ORCID: [0000-0001-6304-405X](https://orcid.org/0000-0001-6304-405X)

Ch. Dugarjav¹, Acad. MAS, Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: [0000-0002-9880-8838](https://orcid.org/0000-0002-9880-8838)

A.I. Lobanov², Candidate of Biology; ORCID: [0000-0003-0505-8212](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212)

S. Gerelbaatar³, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-9561-5256](https://orcid.org/0000-0002-9561-5256)

B. Bulgan-Erdene³, Master; ORCID: [0000-0003-3566-0837](https://orcid.org/0000-0003-3566-0837)

¹Institute of General and Experimental Biology, Mongolian Academy of Sciences, Zhukov avenue, 77, Ulaanbaatar, 210351, Mongolia; e-mail: ztsogt@yahoo.com, chdugaa@yahoo.com

²Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, P.O. Box 709, Abakan, Republic of Khakassia, 655019, Russian Federation; e-mail: anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

³National University of Mongolia, University Street, 3, Ulaanbaatar, 14201, Mongolia; e-mail: gerelbaatar@seas.num.edu.mn, bbulga4421@gmail.com

The evaluation of forest productivity has been one of the main objectives of forest science for the last 170 years. Forest science in recent decades has highlighted the priority and significance of research aimed at identifying the most significant parameter of forest stands productivity – the mass of stem wood. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is the main tree species, which is generally used for artificial reforestation in coniferous boreal forests of Mongolia. The research purpose was to study the age-related dynamics of above-ground phytomass structure of Scots pine plantations growing in the western Khentii Mountains of northern Mongolia. The study involved differently aged monocultures ranging from 9 to 25 years, artificially established by filling-up Scots pine seedlings. Model trees were selected from temporary sample plots (10 from each). The phytomass of each sampled tree was separated into the following fractions: dry and live branches, needles, bark and stem wood. We have found a gradual growth in tree volume with increasing plantation age, and at the age of 25

the total tree volume reached $21.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. A regular growth of relative proportion for stem wood phytomass fraction is observed in total above-ground phytomass with age. The relative proportion of stem wood in above-ground phytomass increased from 23.1 % (9-year old) to 47.8 % (25-year old) in the studied plantations. There is an inverse correlation for the needles phytomass fraction. Percentage of needles in the above-ground phytomass decreases from 57.7 % in 9-year-old plantations to 15.0 % in 25-year-old ones. The obtained results can be used in estimation of tree phytomass in forest plantations of northern Mongolia. Therefore, the findings of this study might be useful to develop a forest management plan aimed at improvement of forest productivity, and quality of forest conservation measures against pests and fires.

For citation: Tsogt Z., Dugarjav Ch., Lobanov A.I., Gerelbaatar S., Bulgan-Erdene B. Age-Related Dynamics of Above-Ground Phytomass Structure of Scots Pine Plantations Aged up to 25 in the Western Khentii Mountains of Northern Mongolia. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 208–215. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.208

Keywords: forest plantations, Scots pine, above-ground phytomass, fractions, western Khentey Mountains, northern Mongolia.

Поступила 25.04.19 / Received on April 25, 2019

УДК 630*18

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.216

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ И ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

*Е.Б. Карбасникова¹, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: [0000-0003-2850-9362](https://orcid.org/0000-0003-2850-9362)**О.С. Залывская², канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: [0000-0002-7520-6295](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295)**О.В. Чухина¹, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: [0000-0003-0318-4549](https://orcid.org/0000-0003-0318-4549)*¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555;e-mail: helen15@yandex.ru, Dekanagro@molochnoe.ru²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: o--s@yandex.ru

Одним из путей нивелирования влияния опасных факторов среды на комфортность проживания в городе признается создание зеленых насаждений целевого состава. Цель данной работы – проанализировать содержание тяжелых металлов в почве и древесных растениях на разной удаленности от автомобильных дорог в урбаносреде (г. Вологда). Для анализа выбраны породы, преобладающие в зеленых насаждениях изучаемого населенного пункта. В большинстве объектов встречается береза пушистая (*Betula pubescens*) и ель колючая (*Picea pungens*), в живых изгородях вдоль дорог наиболее популярен кустарник – карагана древовидная (*Caragana arborescens*). Установлено содержание высокотоксичных поллютантов (кадмия, свинца, цинка, меди, никеля, хрома). В почвах г. Вологды не зафиксировано наличия подвижных форм тяжелых металлов, концентрация которых бы превышала предельно допустимую. Однако содержание цинка и кадмия у автомобильных дорог выше фонового значения для европейской части России. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах по мере удаления от дороги снижается. Такая же тенденция отмечена и для ассимиляционного аппарата исследуемых деревьев и кустарников. В листьях и хвое дендрофлоры больше всего накапливается цинка, второе место занимает медь, третье – свинец. Определено, что карагана древовидная и береза пушистая способны аккумулировать тяжелые металлы в листьях. Выявлено, что коэффициент биологического поглощения выше у таких элементов, как медь, цинк и свинец.

Для цитирования: Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Чухина О.В. Содержание тяжелых металлов в почве и древесной растительности в условиях городской агломерации // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 216–223. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.216

Ключевые слова: тяжелые металлы, экологическая обстановка, загрязняющие вещества, мониторинг, тест-растения.

Введение

Урбанизированная территория содержит большое количество загрязнителей, в том числе тяжелых металлов – ядов, действующих на организм человека на клеточном уровне. К тяжелым металлам относятся металлы переходных групп, атомная масса которых составляет 50 и более единиц. Наиболее токсичны ртуть, олово, кобальт, никель, свинец и хром [1, 5, 10]. Туда входят и физиологически необходимые для живых организмов элементы (цинк, медь, марганец, железо, кобальт, молибден), а также и металлы, действие которых

пока до конца не изучено (свинец, никель, кальций, ртуть). Все обнаруженные в растениях химические элементы так или иначе участвуют в важных физиологических и биохимических процессах [13, 14, 18].

Свинец и цинк – очень опасные для здоровья человека тяжелые металлы. При этом свинец, который поступает в организм с вдыхаемым воздухом, намного токсичнее, чем тот, который мы получаем с пищей или водой [7, 9, 11, 12].

Одним из путей нивелирования влияния опасных факторов среды на комфортность проживания в городе является создание зеленых насаждений целевого состава. Проблема санитарно-гигиенической роли городской дендрофлоры особенно актуализировалась в конце XX – начале XXI в.

Одна из наиболее важных задач при проектировании насаждений в урбаносреде – подбор ассортимента деревьев и кустарников, сохранение их устойчивости и выполнение ими функций по оздоровлению среды, поэтому в условиях городов необходимо учитывать способность древесных растений накапливать тяжелые металлы [2].

Транспорт является основным источником загрязнения природной среды. С увеличением количества автотранспортных средств загрязнение воздуха неуклонно растет. Тяжелые металлы поступают в околodорожное пространство в результате работы двигателей и при других воздействиях (содержатся в материалах автопокрышек, кузовов, подшипников, вкладышей, тормозных масел).

По литературным данным [2, 4], свинец аккумулируется в верхнем (0...5 см) слое почвы. Отходы от движения автомобилей оказывают разнообразное воздействие на растения и почву на полосе шириной 50...100 м и более. Распространение такого влияния зависит от климатических условий района исследования (интенсивность жидких осадков в летний период), дендрологического состава придорожных посадок, биологических особенностей культивируемых видов древесной и кустарниковой растительности и других не менее важных факторов [14, 17, 20].

Необходимо рассматривать систему «почва–растение» как структуру, объединенную потоком химических элементов. В связи с тем, что процессы аккумуляции тяжелых металлов в почве и растениях городской среды тесно связаны, их предлагается исследовать совместно [8, 16, 19].

Цель данной работы – проанализировать содержание тяжелых металлов в почве и древесных растениях на разной удаленности от автомобильных дорог в урбаносреде (г. Вологда).

Объекты и методы исследования

Отбор образцов почвы производился в зеленых насаждениях центральной части г. Вологды согласно рекомендациям ГОСТ 17.4.3.01–17 весной после таяния снега в верхнем слое почвы. Получены образцы для анализа вблизи дороги и на расстоянии 50 м от нее. В качестве контроля была взята почвенная проба за пределами городской черты, на удаленной от автомобильных дорог и промышленных предприятий территории.

Схема размещения мест отбора почвенных образцов приведена на рисунке.

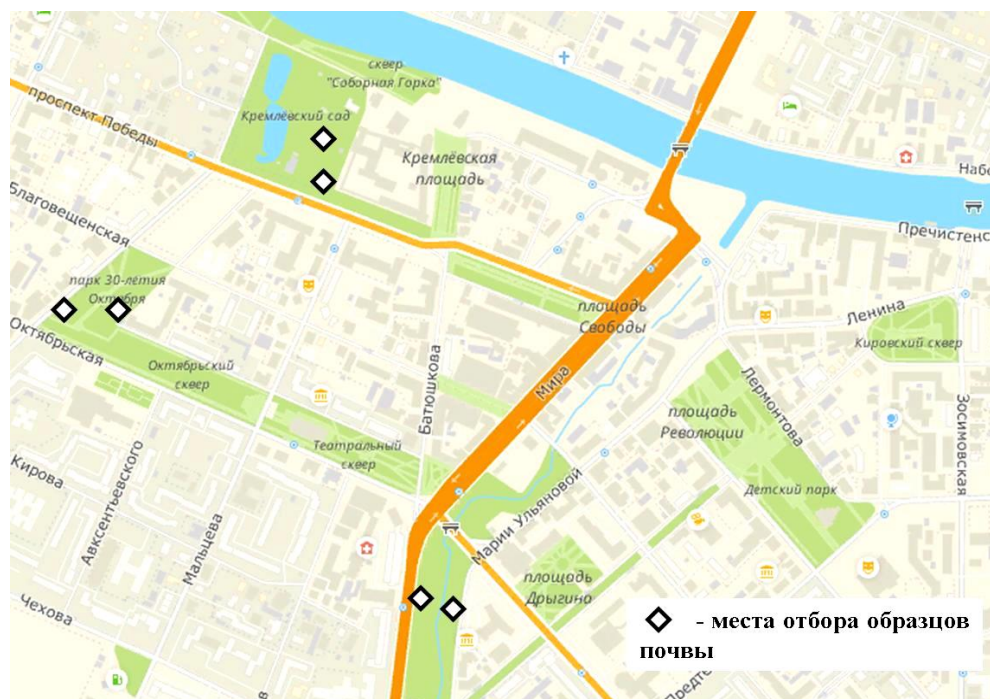


Рис. 1. Места отбора проб в г. Вологда

Fig. 1. Sampling point in Vologda

Для анализа растительного материала выбраны породы, преобладающие в зеленых насаждениях г. Вологды: из лиственных деревьев – береза пушистая (*Betula pubescens*); из хвойных – ель колючая (*Picea pungens*); из кустарников – карагана древовидная (*Caragana arborescens*), наиболее часто встречающаяся в живых изгородях вдоль дорог.

Отбор листьев и хвои выполнен на тех же участках, где были получены образцы почв. Сбор растительного материала производился в сентябре у 15 экземпляров каждой породы на высоте 1,5 м со всех сторон растения. Масса каждого растительного образца, взятого для анализа, составила 0,7 кг при естественной влажности.

Анализ образцов почвы и листвы (хвои) на содержание тяжелых металлов выполнен в ФГБУ «Агрохимцентр «Вологодский» с использованием атомно-абсорбционной спектрометрии с предварительной экстракцией кислотами.

В ходе экспериментов определяли концентрацию тяжелых металлов (кадмия (Cd), свинца (Pb), цинка (Zn), никеля (Ni), меди (Cu), хрома (Cr)), для которых разработаны критерии предельно-допустимых концентраций (ПДК).

В ходе камеральной обработки установлено содержание тяжелых металлов в растительных организмах, характеризующееся коэффициентом биологического поглощения (КБП), равным отношению содержания металла в сухой массе растения к его содержанию в почве [9]. Кроме того, проведен сравнительный анализ с ПДК [3] и фоновыми значениями. В качестве фона использовали данные для дерново-подзолистых почв европейской части России [6]. Для растений сравнивали содержание с усредненными данными для тяжелых металлов в растительности на незагрязненных почвах [4].

Результаты исследования и их обсуждение

Почвы, для которых проведен анализ на содержание подвижных форм тяжелых металлов, относятся к дерново-подзолистому типу и имеют кислую и слабокислую реакцию.

Высокотоксичные поллютанты в почве, согласно ГОСТ 17.4.3.01–17, делятся на три класса опасности. Cd, Pb, Zn относятся к первому (высокому) классу опасности, Ni, Cu, Cr – ко второму (умеренному). Установлено, что содержание тяжелых металлов этих двух групп в почве города (в непосредственной близости от автодороги и на расстоянии 50 м от нее) ниже ПДК или близко к фоновым значениям (табл.1).

Таблица 1

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве (мг/кг)

Место отбора проб	1-й класс опасности			2-й класс опасности		
	Cd	Pb	Zn	Ni	Cu	Cr
Фоновое значение для России	0,01	3,58	12,25	–	1,20	8,75
В Вологодской области (контроль)	0,04±0,002	1,47±0,6	7,10±0,8	–	0,38±0,01	0,86±0,04
Вблизи дороги	0,05±0,002	1,80±0,04	14,10±1,1	3,51±0,5	0,50±0,02	1,02±0,06
На удалении 50 м от дороги	0,04±0,001	1,77±0,8	9,70±1,3	2,67±0,5	0,45±0,02	0,62±0,02
ПДК [3]	0,20	6,00	23,0	4,00	3,00	6,00

Полученные результаты свидетельствуют, что уровень загрязнения почвы тяжелыми металлами не превышает ПДК. В контрольном образце все изученные элементы содержатся в меньшем количестве, чем в урбанизированных почвах. При сравнении содержания подвижных форм тяжелых металлов вблизи дороги и на расстоянии 50 м от нее установлено, что при удалении от источника загрязнения (автомобильной дороги) их количество снижается. Наиболее существенное уменьшение характерно для хрома (на 39 %), цинка (на 31 %) и никеля (на 24 %). Сопоставляя с фоновыми показателями по России, можно утверждать, что в Вологде у кромки проезжей части дороги содержание кадмия и цинка выше фоновых значений для дерново-подзолистых почв.

У растений существует несколько вариантов систем контроля за поступлением токсичных элементов, которые попадают в листья и плоды, оказывая существенное влияние на процессы жизнедеятельности: фотосинтез, дыхание, деятельность ферментов и др. Толерантность к тяжелым металлам контролируется на генетическом уровне, а также в значительной мере зависит от периода онтогенеза растения.

По результатам накопления тяжелых металлов в ассимиляционной части дерева можно расположить в следующие ряды, где в числителе приведены данные для деревьев, расположенных вблизи автодороги, в знаменателе – на удалении 50 м:

береза пушистая	$\frac{Zn}{Zn} \rangle \frac{Cu}{Pb} \rangle \frac{Pb}{Cu} \rangle \frac{Ni}{Cr} \rangle \frac{Cr}{Ni} \rangle \frac{Cd}{Cd}$;
ель колючая	$\frac{Zn}{Zn} \rangle \frac{Cu}{Pb} \rangle \frac{Pb}{Cu} \rangle \frac{Cr}{Cr} \rangle \frac{Ni}{Ni} \rangle \frac{Cd}{Cd}$;
карагана древовидная	$\frac{Zn}{Zn} \rangle \frac{Cu}{Cu} \rangle \frac{Pb}{Pb} \rangle \frac{Cr}{Cr} \rangle \frac{Ni}{Ni} \rangle \frac{Cd}{Cd}$.

Как видно из данных табл. 2, во всех образцах растений больше всего накапливается цинка, меньше – кадмия (более чем в 7 раз ниже фонового значения (нормы содержания в растениях [4]) – 0,78 мг/кг). Второе место по степени поглощения занимает медь, третье – свинец.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в листе и хвое древесных растений (мг/кг) и значение КБП

Элемент	Норма	Ель колючая				Карагана древовидная				Береза пушистая			
		у кромки дороги	КБП	на удалении 50 м	КБП	у кромки дороги	КБП	на удалении 50 м	КБП	у кромки дороги	КБП	на удалении 50 м	КБП
Cu	9,90	0,40± ±0,17	0,80	0,15± ±0,07	0,30	16,90± ±6,74	33,80	8,70± ±3,42	19,20	29,20± ±11,60	58,50	0,28± ±0,12	0,60
Zn	53,30	8,01± ±0,73	0,56	6,1± ±0,55	0,62	81,2± ±7,34	5,75	67,10± ±6,06	6,90	191,20± ±17,27	13,56	19,90± ±1,80	2,05
Pb	4,10	0,34± ±0,07	0,18	0,50± ±0,09	0,28	1,48± ±0,27	0,82	0,95± ±0,18	0,53	0,62± ±0,12	0,34	1,09± ±0,20	0,61
Cd	0,78	<0,01	0,20	<0,01	0,25	0,01	0,20	<0,01	0,20	<0,01	0,20	<0,01	0,20
Ni	8,10	0,025± ±0,01	–	0,03± ±0,01	–	0,34± ±0,07	–	0,13± ±0,03	–	0,29± ±0,06	–	0,04± ±0,01	–
Cr	1,30	0,06± ±0,001	0,05	0,08± ±0,001	0,12	0,45± ±0,07	0,44	0,14± ±0,02	0,22	0,20± ±0,03	0,19	0,07± ±0,01	0,11

Содержание тяжелых металлов в ассимиляционном аппарате при удалении от автодороги уменьшается. Их накопление у лиственных пород (березы пушистой и караганы древовидной) выше, чем у хвойных (ели колючей). Для некоторых элементов (цинка, меди, никеля, хрома) превышение составляет более чем в 2 раза. В случае, если содержание никеля и хрома в листьях березы пушистой вблизи автодороги принять за 100 %, то на удалении 50 м оно составляет соответственно 14,6 и 34,6 %. На удалении 50 м от автодороги содержание свинца, никеля, хрома в листьях караганы древовидной уменьшается на 35,7; 62,1 и 69,9 % по сравнению с показателями для деревьев вблизи проезжей части.

Необходимо отметить высокое содержание цинка в листьях караганы древовидной и березы пушистой в условиях эксперимента, превышающее норму [4]. Кроме того, для данных видов отмечены высокие значения КБП по меди и цинку. Полученные результаты свидетельствуют о том, что карагана

древовидная и береза пушистая в наибольшей мере обладают способностью накапливать тяжелые металлы.

Заключение

В почвах г. Вологды не зафиксировано содержания подвижных форм тяжелых металлов, превышающего ПДК, однако содержание цинка и кадмия у автомобильных дорог выше фонового значения для европейской части России. Количество тяжелых металлов в почвах и растениях уменьшается по мере удаления от автомобильных дорог. Коэффициент биологического поглощения выше для таких элементов, как медь, цинк. Карагана древовидная и береза пушистая способны накапливать тяжелые металлы в листьях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев С.В., Молчанов А.А. Плодоношение сибирской лиственницы в северных условиях // Советский Север: газ. 1938. № 8. С. 62–72. [Alekseev S.V., Molchanov A.A. Fruiting of Siberian Larch in Northern Conditions. *Sovetskiy Sever*, 1988, no. 8, pp. 62–72].
2. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Долинская И.С. Интродуценты и экстразональные виды в антропогенной среде (на примере г. Вологды): моногр. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 184 с. [Babich N.A., Karbasnikova E.B., Dolinskaya I.S. *Introduced and Extrazonal Species in the Anthropogenic Environment (On the Example of Vologda)*: Monography. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2012. 184 p.].
3. ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы. М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с. [GN 2.1.7.2041–06. *Maximum Allowable Concentration (MAC) of Chemical Substances in Soils: Hygiene Standards*. Moscow, Federal Hygienic and Epidemiological Center of Rosпотребнадзор Publ., 2006. 15 p.].
4. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 150 с. [Il'in V.B. *Heavy Metals in the Soil–Plant System*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 150 p.].
5. Никаноров А.М., Хоружая Т.А. Экология. М.: Приор, 1999. 304 с. [Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A. *Ecology*. Moscow, Prior Publ., 1999. 304 p.].
6. Обзор фонового состояния окружающей природной среды СССР за 1985 г. / под ред. Ю.А. Израэля, Ф.Я. Ровинского. М.: Гидрометеиздат, 1986. 110 с. [A Review of the Background Environmental Conditions of the USSR for 1985. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 110 p.].
7. Орлов Д.С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 334 с. [Orlov D.S. *Ecology and Biosphere Protection under Chemical Pollution*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 334 p.].
8. Парибок Т.А., Леина Г.Д., Сазыкина Н.А., Топорский В.Н., Николаева Т.И., Дьячкова Т.Б. Накопление свинца в городских растениях // Ботан. журн. 1981. Т. 66, № 11. С. 1646–1654. [Paribok T.A., Leina G.D., Sazykina N.A., Toporskiy V.N., Nikolayeva T.I., D'yachkova T.B. Lead Accumulation in Urban Plants. *Botanicheskiy Zhurnal*, 1981, vol. 66, no. 11, pp. 1646–1654].
9. Снакин В.В., Кузнецов А.В., Платонов И.Г., Присяжная А.А., Соколов О.А., Хрисанов В.Р., Рухович О.В. Свинец в почвах и растениях России // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: обз. информ. М., 1988. Вып. 11. С. 73–90. [Snakin V.V., Kuznetsov A.V., Platonov I.G., Prisyazhnaya A.A., Sokolov O.A., Khrisanov V.R., Rukhovich O.V. Lead in Soils and Plants of Russia. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnnykh resursov: obzornaya informatsiya*, 1988, vol. 11, pp. 73–90].

10. Филонова Е.Н. О гигиеническом нормировании тяжелых металлов в почвах // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 3. С. 30–35. [Filonova E.N. On the Hygienic Fixing of Heavy Metals in the Soil. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti* [Life Safety], 2009, no. 3, pp. 30–35].
11. Фомичева Ю.С. Свинец в окружающей среде и его влияние на человека // Материалы междунар. молодеж. экол. форума стран Баренц-региона. Архангельск, 2001. С. 211–212. [Fomicheva Yu.S. Environmental Lead and Its Impact on Humans. *Proceedings of the International Youth Ecological Forum of the Countries of the Barents Region*. Arkhangelsk, 2001, pp. 211–212].
12. Abadin H., Ashizawa A., Stevens Y.-W., Lladós F., Diamond G., Sage G., Citra M., Quinones A., Bosch S.J., Swarts S.G. *Toxicological Profile for Lead*. Atlanta, GA, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), 2007. 528 p.
13. Antonovics J., Bradshaw A.D., Turner R.G. Heavy Metal Tolerance in Plants. *Advances in Ecological Research*, 1971, vol. 7, pp. 1–85. DOI: [10.1016/S0065-2504\(08\)60202-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60202-0)
14. Antosiewicz D.M. Adaptation of Plants to an Environment Polluted with Heavy Metals. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 1992, vol. 61, no. 2, pp. 281–299. DOI: [10.5586/asbp.1992.026](https://doi.org/10.5586/asbp.1992.026)
15. Kabala C., Chodak T., Szerszen L., Karczewska A., Szopka K., Fratzczak U. Factors Influencing the Concentration of Heavy Metals in Soils of Allotment Gardens in the City of Wrocław, Poland. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, vol. 18, no. 7, pp. 1118–1124.
16. Kim Y.-Y., Yang Y.-Y., Lee Y. Pb and Cd Uptake in Rice Roots. *Physiologia Plantarum*, 2002, vol. 116, iss. 3, pp. 368–372. DOI: [10.1034/j.1399-3054.2002.1160312.x](https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1160312.x)
17. Lu Y., Zhu F., Chen J., Gan H., Guo Y. Chemical Fractionation of Heavy Metals in Urban Soils of Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, vol. 134, no. 1-3, pp. 429–439. DOI: [10.1007/s10661-007-9634-1](https://doi.org/10.1007/s10661-007-9634-1)
18. Macnair M.R. The Genetics of Metal Tolerance in Vascular Plants. *New Phytologist*, 1993, vol. 124, iss. 4, pp. 541–559. DOI: [10.1111/j.1469-8137.1993.tb03846.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03846.x)
19. Maina H.M., Egila J.N., Shagal M.H. Chemical Speciation of Some Heavy Metals in Sediments in the Vicinity of Ashaka Cement Factory, Gombe State, Nigeria. *Journal of Research in Environmental Science and Toxicology*, 2012, vol. 1, iss. 7, pp. 186–194.
20. Vink A.P.A. *Landscape Ecology and Land Use*. New York, NY, Longman, 1983. 264 p.

HEAVY METALS CONTENT IN SOILS AND WOODY VEGETATION OF URBAN AREA

E.B. Karbasnikova¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0003-2850-9362](https://orcid.org/0000-0003-2850-9362)

O.S. Zalyvskaya², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-7520-6295](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295)

O.V. Chukhina¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0003-0318-4549](https://orcid.org/0000-0003-0318-4549)

¹Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: helen15@yandex.ru, Dekanagro@molochnoe.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: o--s@yandex.ru

Creation of green areas of target composition is one of the ways of levelling the influence of hazardous environmental factors on the comfort of living in the city. The research purpose is content analysis of heavy metals in soils and woody plants at different distances from roads of the urban environment (Vologda). Breeds prevailing in the green areas of the studied settlement were selected for the analysis. Downy birch (*Betula pubescens*) and blue spruce

(*Picea pungens*) are found in a majority of objects; Siberian pea shrub (*Caragana arborescens*) is the most popular shrub in hedges along the roads. The content of highly toxic pollutants (cadmium, lead, zinc, copper, nickel, chromium) has been found. The presence of active forms of heavy metals, the concentration of which would exceed the maximum allowable concentration, has not been recorded in the soils of Vologda. However, the content of zinc and cadmium near the roads is higher than the background value for the European part of Russia. The content of active forms of heavy metals in soils near the road and with distance from it reduces. The same trend was noted for the assimilation apparatus of the studies trees and shrubs. In leaves and needles of dendroflora, zinc accumulates the best of all, copper takes the second place, and lead takes the third place. It was determined that Siberian pea shrub and downy birch are able to accumulate heavy metals in leaves. It was found that the biological absorption factor is higher for elements such as copper, zinc, and lead.

For citation: Karbasnikova E.B., Zalyvskaya O.S., Chukhina O.V. Heavy Metals Content in Soils and Woody Vegetation of Urban Area. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 216–223. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.216

Keywords: heavy metals, environmental situation, pollutants, monitoring, test plant.

Поступила 05.04.18 / Received on April 05, 2018



Поздравляем!

3 ноября 2019 года отмечает юбилей профессионал своего дела, бес-
сменный редактор «Лесного журнала» **Любовь Семёновна Окулова**.

Талантливый и ответственный специалист, она оперативно решает
самые сложные и важные задачи. Во многом благодаря ее работе журнал
занимает лидирующие позиции среди научных изданий.

Творческая энергия, светлый ум и широчайший кругозор Л.С. Оку-
ловой снискали заслуженное уважение авторов, читателей журнала и кол-
лег. Коллектив редакции высоко ценит ее активную жизненную позицию,
отзывчивость, постоянную самоотдачу и преданность любимому делу.

Желаем Любове Семёновне жизненного оптимизма, успехов и ис-
полнения желаний. Пусть не иссякают в сердце любовь и согласие, добро
и справедливость. Крепкого здоровья, счастья и благополучия на долгие
годы!

С Юбилеем Вас, Любовь Семёновна!

Коллектив редакции «Лесной журнал»

