

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

4/376

2020

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф., акад. РАЕ (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Моисеев Н.А., д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
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)
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)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельмани Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833
Issued as part of the
“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958
Published 6 times a year

4/376

2020

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof., Member of the Russian Academy of Natural History (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)
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)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
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)
Telysheva G.M., Doctor of Chemistry, Prof. (Latvia, Riga)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Г.А. Иванова, В.А. Иванов.</i> Зональность лесных горючих материалов и их пирогенная трансформация в сосняках Средней Сибири.....	9
<i>Б.В. Бабилов, М.Б. Субота.</i> Формирование и динамика биотопа культур сосны на торфяных почвах после гидромелиорации.....	27
<i>Е.А. Флюрик, Н.В. Бушкевич.</i> Определение технологических свойств листьев и плодов голубики.....	40
<i>С.К. Фарбер, Н.С. Кузьмик.</i> Формирование цифровой модели влажности почв на основе показателей рельефа местности и по материалам лесоустройства.....	53
<i>Я.А. Неронова.</i> Микроструктура древесины культур сосны различной исходной густоты на осушенной торфяной почве после применения удобрений и гербицидов.....	68
<i>В.Н. Коновалов, Л.В. Зарубина.</i> Транспорт, распределение и потребление ^{14}C -ассимилятов у сосны и ели в северотаежных фитоценозах при различном световом и азотном питании.....	77
<i>В.И. Турусов, Ю.И. Чевердин, В.А. Беспалов, Т.В. Титова.</i> Изменения физических свойств черноземов сегрегационных в агролесоландшафтах Центрального Черноземья.....	95
<i>R.V. Schekalev, A.A. Martynyuk, V.I. Melekhov.</i> Variability Properties of <i>Pinus sylvestris</i> L. Wood in Growing Stock under Technogenic Impact.....	113

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>А.Н. Заикин, С.А. Коньшакова, В.В. Сиваков, С.Г. Кузнецов, Н.А. Булхов.</i> Технологический ресурс лесозаготовительной техники лесхозов Республики Башкортостан.....	123
---	-----

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>Ш.Г. Зарипов, В.А. Корниенко.</i> Влияние технологии сушки лиственничных пиломатериалов на длительность процесса обезвоживания.....	134
<i>А.А. Тамби, С.А. Угрюмов, А.Р. Бирман, И.А. Черноградская.</i> Основные размерно-качественные характеристики круглых лесоматериалов, заготавливаемых в Архангельской области.....	147
<i>А.Г. Черных, Е.В. Данилов, П.С. Коваль.</i> Расчет жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами.....	157

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<i>Т.А. Королева, Л.А. Миловидова, Г.В. Комарова, А.А. Дряхлицын, В.В. Медведев, В.Г. Мосеев.</i> Применение окислительного щелочения в процессе отбелки лиственной сульфатной целлюлозы.....	168
---	-----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- E.V. Popov, A.V. Ruslanova, V.V. Sopilov, N. Zdravovic, S.M. Mamedov, B.V. Labudin.* Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear..... 178
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>G.A. Ivanova, V.A. Ivanov.</i> Zonality of Forest Fuels and Their Pyrogenic Transformation in Pine Forests of Central Siberia.....	9
<i>B.V. Babikov, M.B. Subota.</i> Formation and Dynamics of the Biotope of Pine Plantations on Peat Soils after Irrigation Improvement.....	27
<i>E.A. Flyurik, N.V. Bushkevich.</i> Performance Measurement of Blueberry Leaves and Fruits.....	40
<i>S.K. Farber, N.S. Kuzmik.</i> Formation of a Digital Elevation Model of Soil Moisture Adopted from Terrain Parameters and Forest Management Materials.....	53
<i>Ya.A. Neronova.</i> Wood Microstructure of Pine Plantations with Different Initial Stocking Rate on Drained Peat Soil upon Fertilization and Herbicide Treatments.....	68
<i>V.N. Konovalov, L.V. Zarubina.</i> Transport, Distribution and Consumption of Pine and Spruce ¹⁴ C-Assimilates in Northern Phytocenoses under Different Illumination and Nitrogen Nutrition.....	77
<i>V.I. Turusov, Yu.I. Cheverdin, V.A. Bespalov, T.V. Titova.</i> Changes in the Physical Properties of Segregational Chernozems in Agroforest Landscapes of the Central Chernozem Region.....	95
<i>R.V. Schekalev, A.A. Martynyuk, V.I. Melekhov.</i> Variability Properties of <i>Pinus sylvestris</i> L. Wood in Growing Stock under Technogenic Impact.....	113

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>A.N. Zaikin, S.A. Konshakova, V.V. Sivakov, S.G. Kuznetsov, N.A. Bulkhov.</i> Technological Resources of Harvesting and Logging Machinery of Bashkortostan Forestries.....	123
---	-----

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>Sh.G. Zaripov, V.A. Kornienko.</i> The Influence of Larch Lumber Drying Technology on the Duration of Dehydration.....	134
<i>A.A. Tambi, S.A. Ugryumov, A.R. Birman, I.A. Chernogradskaya.</i> Dimensional and Qualitative Characteristics of Round Timber Harvested in Arkhangelsk Region	147
<i>A.G. Chernykh, E.V. Danilov, P.S. Koval.</i> Stiffness Analysis of Connections of LVL Structures with Claw Washers.....	157

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- T.A. Koroleva, L.A. Milovidova, G.V. Komarova, A.A. Dryakhlitsyn, V.V. Medvedev, V.G. Moseev.* The Use of Oxidative Alkali Treatment for Sulphate Hardwood Pulp Bleaching..... 168

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- E.V. Popov, A.V. Ruslanova, V.V. Sopilov, N. Zdravovic, S.M. Mamedov, B.V. Labudin.* Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear..... 178
-



УДК 630*431

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-9-26

ЗОНАЛЬНОСТЬ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПИРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В СОСНЯКАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

Г.А. Иванова¹, *д-р биол. наук*; *ResearcherID: R-8916-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-8106>

В.А. Иванов², *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: AAE-3176-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6201-2133>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036;

e-mail: gaivanova@ksc.krasn.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, ул. Мира, д. 82, г. Красноярск, Россия, 660049;

e-mail: ivanovv53@yandex.ru

Пожары в лесах Сибири возникают ежегодно и наносят огромный ущерб природе. Поэтому актуальны исследования природной пожарной опасности лесов, одной из составляющих которой являются напочвенные лесные горючие материалы. Проведенные исследования на 53 лесных участках в сосняках, произрастающих вдоль Енисейского меридиального трансекта, выявили, что запасы напочвенных лесных горючих материалов в сосновых насаждениях разных зон Средней Сибири определяются географической широтой и возрастают от зоны лесостепи к подзоне северной тайги. Наибольшие запасы лесных горючих материалов сосредоточены в сосняках северной и средней тайги. В их составе преобладают запасы подстилки, доля которой увеличивается от зоны лесостепи (57,4 %) к зоне северной тайги (71,3 %). Полученные уравнения динамики запасов травяно-кустарничкового яруса в течение сезона могут быть применимы и к травяным типам сосняков. Сгорание напочвенных лесных горючих материалов в сосняках при низовых пожарах разной интенсивности варьирует от 10,8 до 31,4 т/га, что составляет 26,1...74,1 % от их запаса до пожара. Интенсивность пожаров определяет не только количество сгоревших лесных горючих материалов, но и их постпирогенное накопление независимо от зонально-экологических условий. Варьирование запасов горючих материалов на лесных участках связано с пирогенным воздействием и периодом восстановления после последнего пожара, а также с мозаичным распределением растительности. Предложены уравнения накопления напочвенных лесных горючих материалов после пожаров разной интенсивности, которые могут быть применены для сосновых лесов Средней Сибири. При длительном отсутствии пожаров в сосняках происходят смена доминантов в напочвенном покрове и уменьшение продуктивности травяно-кустарничкового яруса. Развитие мохового покрова содействует снижению запасов подстилки. Полученные данные о запасах напочвенных лесных горючих материалов и их трансформации при пожаре обеспечивают основу для понимания и моделирования поведения пожаров, оценки эмиссии и воздействия пожаров на запасы лесных горючих материалов и могут быть использованы для совершенствования существующих глобальных и региональных моделей.

Для цитирования: Иванова Г.А., Иванов В.А. Зональность лесных горючих материалов и их пирогенная трансформация в сосняках Средней Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 9–26. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-9-26

Финансирование: Работа выполнена при поддержке СО РАН и РФФИ (грант № 07-04-00562, грант № 19-58-80002 БРИКС-т).

Ключевые слова: лесные пожары, лесные горючие материалы, запасы, напочвенные лесные горючие материалы, интенсивность пожара, сосняки, Средняя Сибирь.

Введение

Ежегодно на территории Средней Сибири регистрируются лесные пожары. Их возникновение и распространение определяются не только наличием антропогенных или природных источников огня, но также видом, структурой и запасом горючих материалов, их влагосодержанием. Лесной горючий материал (ЛГМ) – это растения и их остатки различной степени разложения, которые могут гореть при пожарах и признаются достаточно однородными [12]. При этом ЛГМ образуют структурный слой, по которому и распространяется горение [11].

ЛГМ различаются по своим пирогенным свойствам, местоположению в биогеоценозе и функциям при пожаре: проводники горения, поддерживающие горение, задерживающие распространение горения [11]. В канадской и американской национальных системах оценки пожарной опасности все растительные горючие материалы также разделены по их положению в биогеоценозе: почвенные, напочвенные и кроновые [27, 31].

На формирование запасов ЛГМ оказывает влияние целый ряд экологических факторов [3, 6, 9–11, 13, 22, 26, 29, 36]. Анализируя имеющиеся литературные источники с точки зрения формирования ЛГМ, необходимо отметить следующее:

в каждом биогеоценозе формируется свой комплекс горючих материалов. Запасы ЛГМ определяются не только типом растительности и условиями увлажнения, но и лесными пожарами. По роли в возникновении и распространении горения их можно дифференцировать на группы [11, 24]. Запасы ЛГМ меняются в течение сезона, как и их функции [13];

основные проводники горения, к которым отнесены опад и подстилка, играют важную роль в процессе горения. Варьирование запаса подстилки в зависимости от типа леса определяет их различия в пирологическом отношении [16, 17, 35]. Поступление опада и его трансформация в подстилку, а также скорость разложения подстилки сбалансированы [7, 19], что обуславливает относительную стабильность запаса подстилки в течение вегетационного периода;

запас надземной вегетирующей фитомассы зависит от типа леса, возраста древостоя и его густоты [3, 6, 9–11, 13, 22]. В пределах однородных лесных участков запасы ЛГМ варьируют в связи с синузильностью живого напочвенного покрова, обусловленной неоднородностью полого древостоя [13, 22].

Цель исследования – анализ зонально-географических особенностей формирования запасов ЛГМ в сосняках Средней Сибири и их трансформации при воздействии лесных пожаров.

Объекты и методы исследования

Работы проводились в сосняках таежной, подтаежной и лесостепной

зон в границах Средней Сибири (рис. 1). Рассматриваем западную часть Средней Сибири вдоль Енисейского меридиального трансекта, который простирается с севера на юг от 70° с.ш. до 52° с.ш. в пределах границ Красноярского края [15]. Описание геологических и орографических условий Средней Сибири подробно приведено в [23].

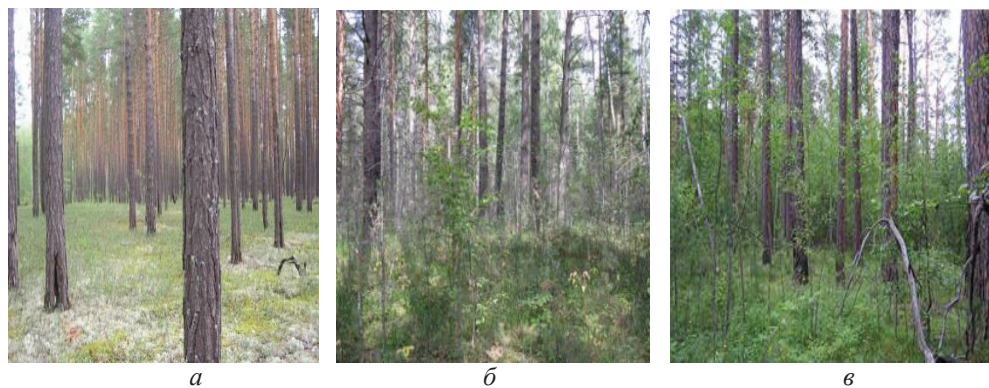


Рис. 1. Сосняки Средней Сибири: *а* – среднетаежный сосняк лишайниково-зеленомошный; *б* – южно-таежный сосняк кустарничково-разнотравно-зеленомошный; *в* – лесостепной сосняк разнотравно-зеленомошный

Fig. 1. Pine forests of Central Siberia: *a* – middle taiga lichen-green moss pine forest; *б* – southern taiga shrub-grass-green moss pine forest; *в* – forest-steppe grass-green moss pine forest

Разнообразие климатических и лесорастительных условий данной территории способствует появлению в течение пожароопасного сезона условий для возникновения лесных пожаров в той или иной ее части. Анализ горимости лесов [8] показал, что условия для возникновения подобных пожаров появляются ежегодно на территории Средней Сибири. Основное их количество приходится на районы светлохвойной тайги. Длительность пожароопасного сезона на этой территории возрастает с севера на юг от 88 до 173 дн. и зависит от географической широты. В лесах Средней Сибири проявляется очередность: на географических широтах 50...55° с.ш. лесные пожары могут возникать уже в апреле–начале мая; на широте 55...60° с.ш. – в мае–июне; севернее 60° с.ш. – в июне, а их максимум отмечается в июле.

В подзоне северной тайги максимум пожаров приходится на июнь–июль, основная часть пожаров в подзоне средней тайги – на июль. В южной подзоне тайги помимо летнего максимума (июль) наблюдается и весенний (май). В подтаежной и лесостепной зонах максимум приходится на май, когда сходит снежный покров и горят травяные типы леса, здесь пожары могут возникать в течение всего пожароопасного сезона при наступлении засушливых периодов [8].

Отбор запасов ЛГМ проводили на 53 пробных площадях (постоянных и временных) в различных типах сосновых насаждений разных лесорастительных зон, расположенных вдоль Енисейского меридиана в пределах Красноярского края от п. Туруханск на севере до южной границы с Республикой Тыва (рис. 2).

Запасы напочвенных ЛГМ в насаждениях определяли с использованием общепринятых методов [11, 28, 38]. На каждой пробной площади закладывали от

10 до 25 площадок размером 20×25 см. В запасы напочвенных ЛГМ входят: травы и кустарнички, мхи и лишайники, опад, подстилка, упавшие ветви и валеж,

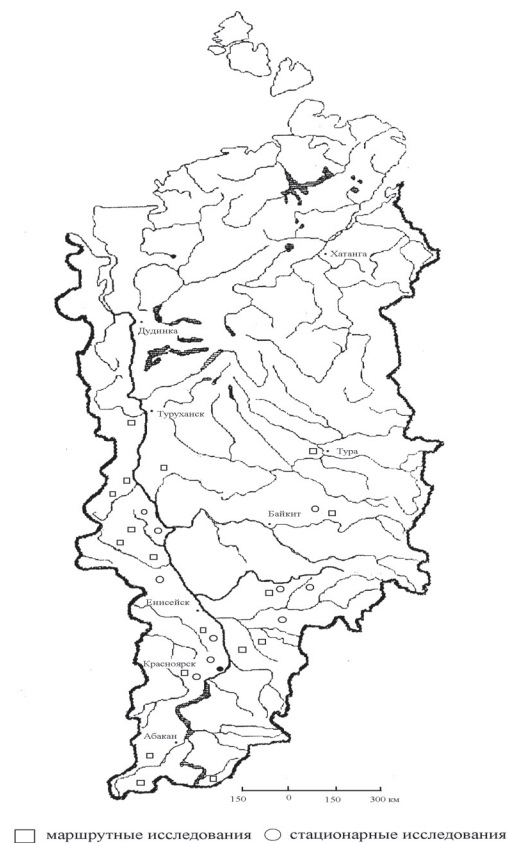


Рис. 2. Схема размещения пробных площадей (стационарных и временных) в сосняках Средней Сибири (в границах Красноярского края)

Fig. 2. The distribution of the experimental plots (stationary and temporary) in pine forests of Central Siberia (Krasnoyarsk Krai)

запас которых определяли отдельно. При этом придерживались положения, принятого в почвоведении, что подстилка – это верхний горизонт почвы (A_0), состоящий из отмерших частей растений с различной степенью разложения и потерей естественной структуры. Отмершие части растений без признаков разложения и потери структуры относили к опад, как это принято в пирологии, так как они отличаются по своей функции при пожаре [11].

С лесопирологической точки зрения очень важно отделять опад от подстилки, так как он, наряду с лишайниками и мхами, является наиболее активным проводником горения, представленным отмершими частями растений на поверхности мхов и лишайников или включенным в них в виде ветоши или отмершего травостоя. В сосняках разнотравно-брусничных отмершие травы и отчасти хвоя висят на кустиках брусники. Только в типах леса с мертвым напочвенным покровом опад расположен непосредственно на подстилке. К опад относятся части растений, отмершие в 1-2 предшествующих года, но не потерявшие своей формы, опавшие, но еще слабо контактирующие с подстилкой, а также отмерший травостой.

Запасы упавших древесных горючих материалов, к которым относятся ветви и валеж разной степени деструкции, учитывали с использованием метода пересеченных трансектов [30, 33, 37]. Все запасы напочвенных ЛГМ представлены в абс. сухом состоянии.

На постоянных пробных площадях в среднетаежных и южно-таежных сосняках Красноярского края в 2000–2003 гг. были проведены эксперименты по моделированию поведения пожаров разной интенсивности [9, 34]. Эксперименты представляли собой контролируемые выжигания, максимально приближенные к естественным пожарам, при которых моделировалось распространение фронтальной кромки пожара. После выжиганий в течение 14 лет проводился послепожарный мониторинг изменения запасов ЛГМ на этих лесных участках, результаты которого также изложены в статье.

На примере лесостепных сосняков проанализировано формирование запасов ЛГМ после пожаров за более длительный срок на постоянных пробных площадях экспериментальной базы «Погорельский бор» Института леса СО РАН.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных по 53 лесным участкам показал, что запасы напочвенных ЛГМ в сосняках Средней Сибири уменьшаются при продвижении с севера на юг от северной и средней тайги к лесостепи и связаны с географической широтой; коэффициент корреляции 0,59 (рис. 3).

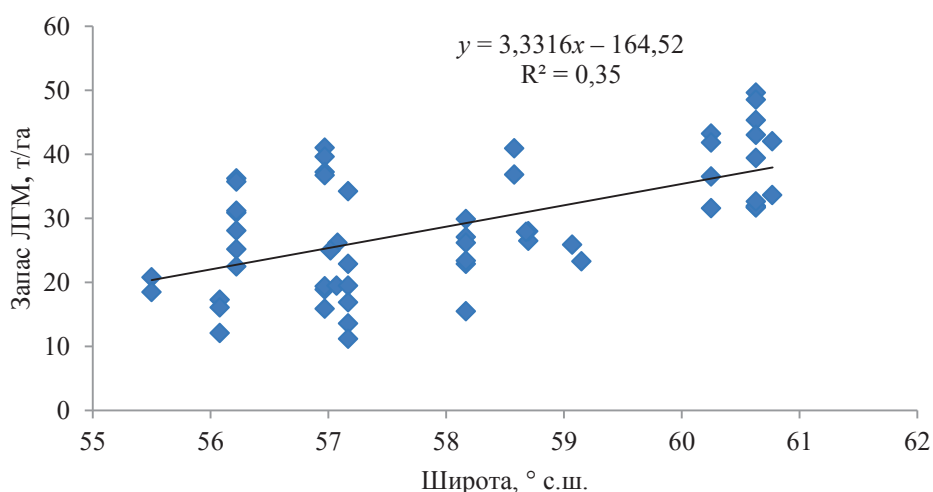


Рис. 3. Распределение запасов напочвенных ЛГМ в сосняках в зависимости от географической широты

Fig. 3. Distribution of surface forest fuel loads in pine forests depending on geographical latitude

При статистической обработке использованы данные о запасах ЛГМ на 16 участках в северной и средней тайге, 20 участках в южной тайге и 17 участках в лесостепной зоне, на которых отобрано более 725 образцов ЛГМ. Наибольшие запасы напочвенных ЛГМ выявлены в сосняках северной и средней тайги, где они составляют 40 т/га и выше (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1, основные статистические показатели (средний запас ЛГМ ($M \pm m$), среднее квадратическое отклонение ($\sigma \pm m_\sigma$), коэффициент вариации ($V \pm m_v$), точность опыта ($P \pm m_p$)) достоверны.

Таблица 1

Запасы напочвенных ЛГМ в сосняках разных лесорастительных зон

Зона, подзона	$M \pm m$	$\sigma \pm m_\sigma$	$V \pm m_v$	$P \pm m_p$	В том числе подстилка, % от запаса
	т/га		%		
Северная тайга	38,3±2,6	3,6±1,0	9,4±2,7	3,9±1,1	71,3
Средняя тайга	38,1±2,1	7,1±2,0	18,6±3,8	5,6±1,1	69,9
Южная тайга	29,2±1,6	7,5±1,2	25,7±3,2	5,5±0,7	62,6
Лесостепь	23,0±1,7	7,0±1,2	30,0±5,5	7,4±1,8	57,4

Приведенные данные по запасам напочвенных ЛГМ относятся к моменту наибольшего развития живого напочвенного покрова в пределах вегетационного периода. Существенность различий между средними запасами напочвенных ЛГМ в сосняках северной и средней тайги и их запасами в сосняках южной тайги и лесостепи составляет 3,29 и 5,49 соответственно, т. е. достоверна. Во всех случаях определяющим является запас подстилки, которая аккумулирует влагу и влияет на пожарное созревание лесных участков. Наблюдается тенденция увеличения доли подстилки в запасах напочвенных ЛГМ от зоны лесостепи к подзоне северной тайги (от 57,4 до 71,3 %).

Лесная подстилка, как и опад, по роли в процессе горения отнесена к проводникам горения. Она гигроскопична, отличается плотной структурой с большой долей порошкообразных частиц и горит беспламенно (тлеет).

Варьирование запасов подстилки вызывает различия в скорости пожарного созревания напочвенных ЛГМ и их горении при пожаре [11].

Ранее нами выявлено [13], что на запасы ЛГМ влияет густота древостоев. Установлена тесная (отрицательная) связь запасов сосняков бруснично-разнотравных красноярской лесостепи с количеством деревьев на 1 га; коэффициент корреляции 0,71 (рис. 4). Позднее подобная связь запасов с густотой древостоя была подтверждена и для таежных сосняков [32].

Влияние сомкнутости полога проявляется также в синузильности живого напочвенного покрова и, соответственно, в варьировании запасов напочвенных ЛГМ. Так, в лесостепных сосняках разнотравно-брусничных установлено возрастание запаса трав и кустарничков в зависимости от удаленности от ствола дерева (коэффициент корреляции 0,92). Это согласуется с выводами Н.Н. Лашинского [14] о том, что по мере удаления от стволов масса трав увеличивается и достигает максимума в межкروновых пространствах.

Варьирование запасов напочвенных ЛГМ по площади, связанное с синузильностью травяно-кустарничкового яруса, также выявлено и в таежных сосняках. В массиве среднетаежных сосняков лишайниково-зеленомошных (перестойных, IV класса бонитета) средние запасы напочвенных ЛГМ варьировали по участкам от 39,00 до 62,00 т/га (коэффициент вариации 31...43 %), т. е. изменчивость большая. Средние запасы напочвенных ЛГМ в этом типе сосняков

составляли 48,21 т/га, при этом на долю подстилки приходилось 44...69 % от запаса напочвенных ЛГМ (табл. 2).

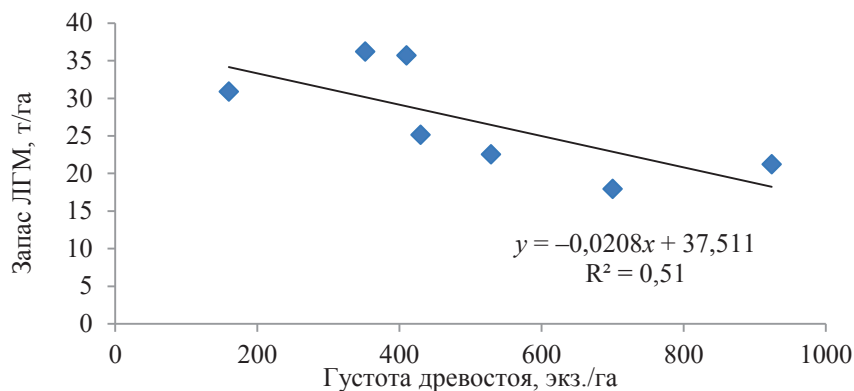


Рис. 4. Зависимость запаса напочвенных ЛГМ от густоты древостоя в лесостепных сосняках разнотравно-брусничных

Fig. 4. Dependence of surface forest fuel loads on stand density in forest-steppe grass-cowberry pine forests

Таблица 2

Запасы напочвенных ЛГМ в среднетаежных сосняках лишайниково-зеленомошных (т/га)

№ участка	Травы, кустарнички	Мхи, лишайники	Опад	Подстилка	УДГМ	Итого
1	0,24±0,07	12,98±1,83	0,99±0,11	35,38±2,62	12,84±3,02	62,43±2,06
2	0,23±0,08	11,61±1,45	1,85±0,25	31,64±2,70	9,00±3,12	54,33±2,64
3	0,48±0,10	5,63±0,91	1,56±0,31	24,05±2,32	8,17±3,04	39,89±2,77
4	0,40±0,08	6,55±0,82	1,81±0,20	30,67±1,86	4,76±1,78	44,19±1,81
5	0,65±0,08	6,64±1,12	2,94±0,63	21,68±2,61	16,88±5,56	48,79±2,24
6	0,68±0,07	5,69±1,14	2,56±0,26	22,92±2,04	9,59±3,55	41,44±2,13
7	0,47±0,10	6,61±1,33	1,78±0,19	23,71±2,20	8,74±3,53	41,31±2,20
8	0,22±0,07	10,70±1,72	1,11±0,14	31,00±3,21	5,65±2,14	48,68±3,06
9	0,27±0,09	11,72±1,93	1,10±0,15	35,44±4,40	4,40±1,36	52,93±3,14
Среднее	0,40±0,10	8,68±1,90	1,74±0,23	28,50±2,72	8,89±1,32	48,21±2,50

Примечания. 1. Всего при статистической обработке на каждом участке использованы данные по 125 образцам ЛГМ, т. е. по 1125 образцам на всех участках. 2. УДГМ – упавшие древесные горючие материалы (ветви и валеж).

На долю мхов и лишайников приходилось 13...22 % от запаса напочвенных ЛГМ (5,63...12,98 т/га). Доля опада составляет от 2 до 6 % (0,99... 2,94 т/га), УДГМ – от 8 до 35 % (4,40...16,88 т/га), травы и кустарничков – до 2 % (0,24...0,68 т/га).

В сосняках лишайниково-зеленомошных общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса варьировало от 15 до 40 %. В его видовом составе брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) – сор.; черника (*V. myrtillus* L.) –

сор₁₋₂; багульник (*Ledum palustre* L.) – sp.; вейник (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth.) – un. Степень покрытия мхами и лишайниками составляла от 80 до 100 %. Доминирующее положение занимает *Pleurozium schreberi* (Wild ex Brid.) Mitt. с примесью *Dicranum polysetum* Sw. Лишайниковый покров представлен различными видами эпигейных лишайников из рода *Cladonia* Web., реже из рода *Cetraria* (*Cladina rangiferina* L. (Web. ex Wigg); *Cl. stellaris* (Opiz) Pousar and Verda; *Cl. arbuscula* (Wallr.); *Cl. gracilis* (L) Wild и др.). Запасы мхов и лишайников значительно превышали запасы трав и кустарничков (табл. 2).

Наблюдения за сезонной динамикой опада и подстилки в лесостепных сосняках позволили выявить варьирование их запасов в течение вегетационного периода. На рис. 5 приведены данные о сезонной динамике запасов опада и подстилки в лесостепных сосняках разнотравно-брусничных, обобщенные по 4 постоянным пробным площадям, т. е. каждое значение обозначает средний запас, рассчитанный по 40 площадкам.

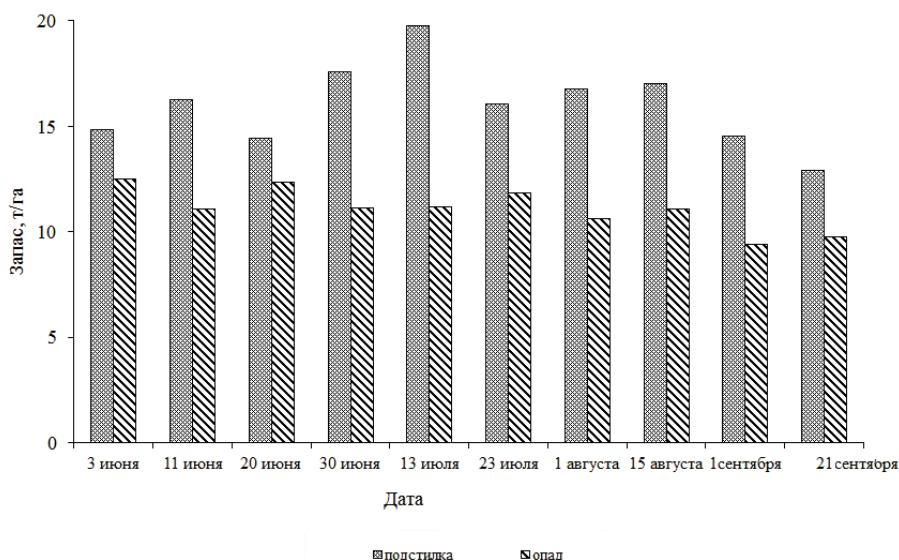


Рис. 5. Сезонная динамика запаса опада и подстилки в лесостепном сосняке разнотравно-брусничном

Fig. 5. Seasonal loads dynamics of litter and duff in forest-steppe grass-cowberry pine forest, t/ha

Наблюдается тенденция снижения запасов опада и подстилки от весны к осени. Происходящее осенью отмирание трав увеличивает запас опада за счет их ветоши. В течение зимы также отмечается опад хвой, шишек, частичек коры, веточек с деревьев, которые весной после стаивания снежного покрова пополняют запас опада. Установлено [25], что запас древесного опада в сосняках изменяется по годам в пределах 6...10 % от его запаса в абс. сухом состоянии.

По мнению ряда исследователей [1, 4, 5, 20], деструкция вновь поступившего опада и образование подстилки происходят за счет физического разрушения, обусловленного резким перепадом дневных и ночных температур на поверхности почвы, и активизации процессов разложения. Известно, что по-

ступление опада, его преобразование в подстилку, а также скорость разложения подстилки сбалансированы [7].

Сезонные изменения запаса трав и кустарничков, связанные с фенологическими стадиями их развития, также влияют на варьирование запасов напочвенных горючих материалов. Сезонная динамика запаса трав и кустарничков в лесостепном сосняке разнотравно-брусничном хорошо аппроксимируется уравнением параболы 2-го порядка (рис. 6), где каждое значение – средний запас трав и кустарничков на 20 площадках.

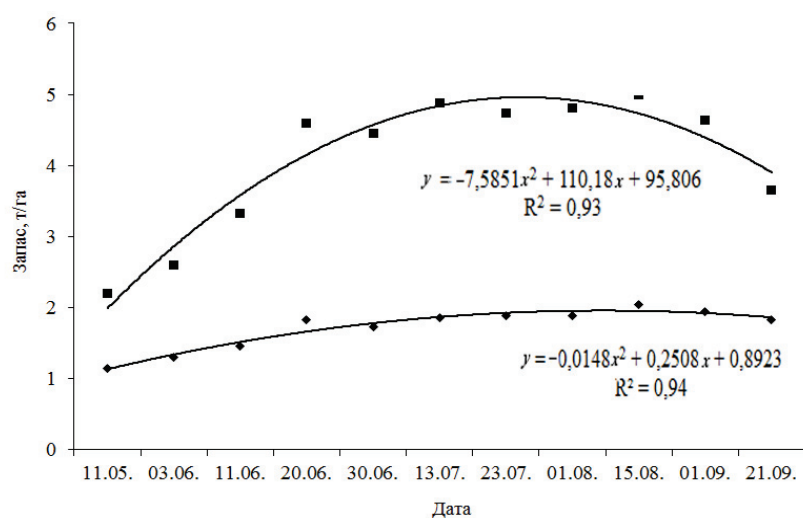


Рис. 6. Сезонная динамика запасов трав и кустарничков в лесостепном сосняке в вегетирующем (верхняя линия) и абс. сухом состоянии (нижняя линия)

Fig. 6. Seasonal dynamics of herb and shrub loads in the forest-steppe (upperpine forest in vegetative line) and absolutely dry (lower line) conditions

После схода снежного покрова в начале вегетационного периода брусника имеет сохранившуюся значительную массу (1,1...1,2 т/га в абс. сухом состоянии). В течение вегетационного периода происходит нарастание зеленой массы трав и кустарничков, максимум которого приходится на конец июля – начало августа. При этом по массе в абс. сухом состоянии преобладает брусника, а в вегетирующем – травянистые растения. Осенью происходит отмирание трав и запас опада за счет их ветоши увеличивается на 0,5...0,6 т/га (в абс. сухом состоянии).

Повторяющиеся лесные пожары оказывают влияние на формирование запасов напочвенных ЛГМ. В то же время сгорание ЛГМ при пожаре определяет послепожарные процессы (отпад древостоя, трансформацию фитомассы, направленность сукцессии и лесовозобновления независимо от зонально-экологических условий). Все эти процессы взаимосвязаны и воздействуют на послепожарное накопление ЛГМ [9].

Полнота сгорания и запас сгоревших ЛГМ в среднетаежных и южно-таежных сосняках при контролируемых низовых пожарах разной интенсивности

приведены в табл. 3. Средние значения сгоревшего запаса ЛГМ рассчитаны по 25 точкам.

В сосняках при низовом пожаре сгорают в основном напочвенные ЛГМ (мхи и лишайники, опад, упавшие мелкие ветви и сучья, частично подстилка и валеж). Травы и кустарнички сгорают вместе с опадом, лишайниками и мхами или погибают от термического воздействия. Ранее нами выявлено, что количество ЛГМ, сгорающих при пожаре, связано с предшествующими погодными условиями, которые определяют их высыхание [9].

Таблица 3

Полнота сгорания ЛГМ при пожарах разной интенсивности в сосняках

№ участка	Интенсивность пожара	Виды ЛГМ, % от запаса до пожара				Всего ЛГМ	
		Травы, кустарнички	УДГМ	Опад	Мхи, лишайники, подстилка	т/га	% от общего запаса
Средне-таежные сосняки							
1	Высокая	100	45,7	100	80,8	30,7±1,7	74,1
2	Средняя	100	30,4	100	45,0	23,9±1,5	45,2
3	Низкая	100	6,3	100	26,3	10,8±1,2	26,1
Южно-таежные сосняки							
4	Высокая	100	26,6	100	46,5	31,4±2,0	63,7
5	Средняя	100	33,0	100	32,7	19,2±1,6	44,1
6	Низкая	100	49,1	100	21,6	11,3±1,2	34,6

Примечание. Пожары интенсивностью до 2000 кВт/м – низкоинтенсивные; 2001...4000 кВт/м – среднеинтенсивные; более 4000 кВт/м – высокоинтенсивные [34].

По наблюдениям М.З. Мусина [18], в сосновых древостоях казахского мелкосопочника количество опада после пожара увеличивается, а скорость разложения опавшей хвои и веточек остается неизменной, в результате запас опада и подстилки некоторое время возрастает. Происходит накопление напочвенных ЛГМ, причем их может стать больше, чем до пожара. После достижения максимума в накоплении напочвенных ЛГМ наступает фаза уменьшения запасов опада и подстилки примерно до допожарного количества. Аналогичные тенденции отмечены М.Д. Евдокименко [7] для сосняков Забайкалья.

В результате сгорания при пожаре запас напочвенных ЛГМ уменьшился, но послепожарный отпад деревьев способствовал их последующему накоплению. Интенсивность горения также влияет на величину послепожарного отпада деревьев [10] и, следовательно, на количество и состав древесного опада. Если до горения все фракции (хвоя, кора, шишки, веточки) в опаде были представлены равномерно, то через 2 года после пожара в его составе количество хвои увеличилось до 84 %, а в последующие годы наблюдалось отмирание коры и повышение ее доли в опаде до 40 % [9]. Это согласуется с выводами о послепожарном увеличении доли хвои [4, 7].

Отпад деревьев обуславливает возрастание запаса не только древесного опада, но и ветвей, и валежа. Через 13 лет после высокоинтенсивного пожара вследствие вывала сухостоя в южно-таежном сосняке лишайниково-зеленомошное количество валежа увеличилось в 2 раза и в 4 раза по сравнению с допожарным запасом в среднетаежном сосняке этого же типа леса.

Послепожарное накопление напочвенных ЛГМ определяется не только интенсивностью пожара, но и давностью его воздействия. Наиболее интенсив-

ное накопление ЛГМ в сосняках после пожаров, независимо от их интенсивности, наблюдается в первые 3–5 лет, когда происходит отпад деревьев (рис. 7).

В среднетаежном сосняке запас напочвенных ЛГМ достиг допожарного значения через 5 лет после высокоинтенсивного пожара, дальнейшее его накопление происходило лишь за счет вывала сухостоя и разрастания трав и кустарничков (рис. 7, а). В южно-таежном сосняке запас напочвенных ЛГМ достиг максимума (лишь 74 % от допожарного значения) через 3 года после высокоинтенсивного пожара (рис. 7, б), затем накопление замедлилось, так как отпад деревьев прекратился и в связи с тем, что в южно-таежной зоне деревья в состоянии сухостоя могут сохраняться в течение длительного времени и не вываливаться. В последующие годы накопление ЛГМ снизилось и регулировалось лишь разложением опада и подстилки и разрастанием растительности.

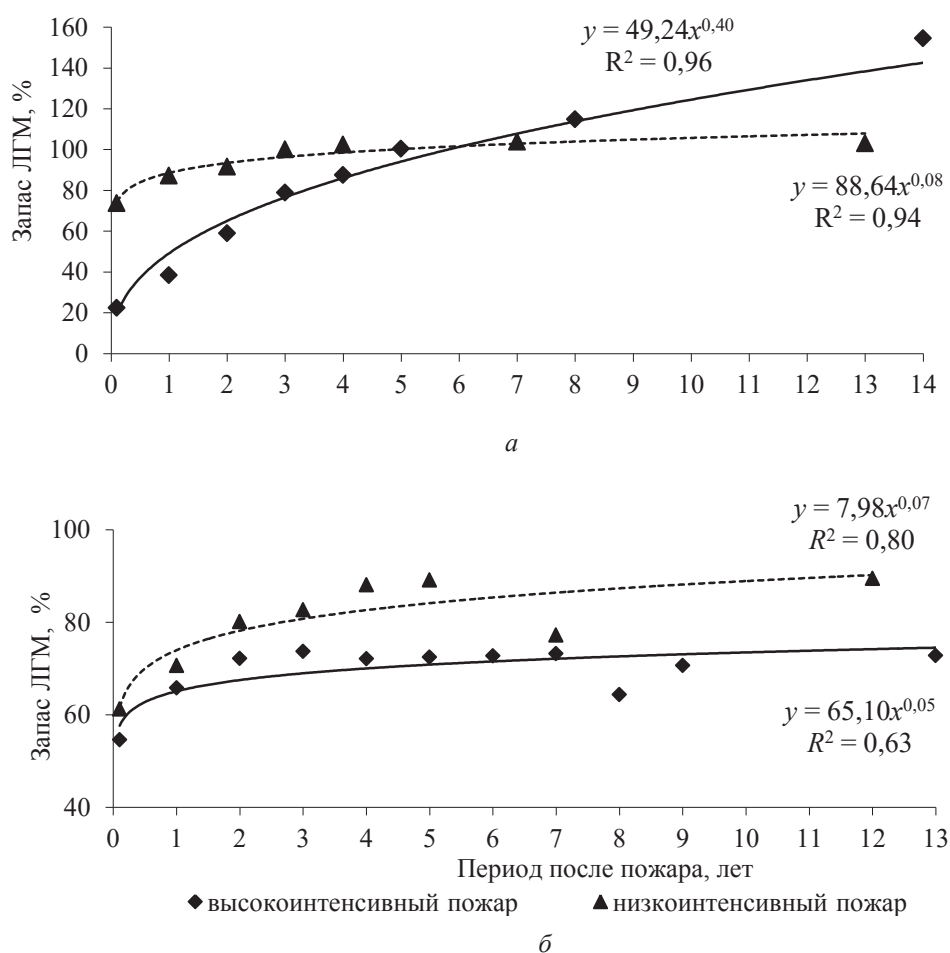


Рис. 7. Динамика запасов напочвенных ЛГМ в среднетаежных (а) и южно-таежных (б) сосняках после пожаров высокой и низкой интенсивности (% от допожарного запаса)

Fig. 7. Dynamics of surface forest fuel loads in the middle taiga (а) and southern taiga (б) pine forests after high and low intensity fires (% of pre-fire reserves)

После пожаров низкой интенсивности через 5 лет запас напочвенных ЛГМ в среднетаежных сосняках достиг допожарного уровня после пирогенного воздействия (рис. 7, а), а в южно-таежных сосняках – своего максимума (около

90 % от допожарного значения) (рис. 7, б). В последующие годы запас сохранялся на этом уровне.

Мы проанализировали также формирование запасов ЛГМ после низового пожара (1958 г.) за более длительный срок на примере лесостепных сосняков Погорельского бора, где были заложены постоянные пробные площади. По литературным данным [21], сразу после пожара 1958 г. в напочвенном покрове здесь было представлено разнотравье, а сосняки относились к разнотравному типу леса. Сосняки в течение 60 лет после воздействия пожара претерпевали трансформацию: сосняки разнотравные – сосняки бруснично-ирисово-осочковые – сосняки бруснично-разнотравные (разнотравно-брусничные) – сосняки разнотравно-зеленомошные и бруснично-зеленомошные.

Как и в сосняках других лесорастительных зон, отпад деревьев и интенсивное накопление напочвенных ЛГМ до их максимального запаса происходили в первые годы после пожара. Через 20 лет после пирогенного воздействия количество опада стабилизировалось, произошло разрастание кустарничков, сосняки из разнотравных трансформировались в бруснично-разнотравные и разнотравно-брусничные. Запасы напочвенных ЛГМ в этот период были довольно стабильны, т. е. скорости поступления опада на поверхность почвы и его разложения были близки (табл. 4).

Таблица 4

Послепожарное изменение запасов напочвенных ЛГМ (т/га)

в лесостепных сосняках						
№ участка	Тип леса	Травы, кустарнички	Мхи	Опад	Подстилка	Всего ЛГМ
<i>Через 20 лет после пожара</i>						
1	Бруснично-разнотравный	1,70±0,28	0,20±0,02	12,09±1,10	22,21±1,85	36,20±2,3
2	Разнотравно-брусничный	1,97±0,30	0,09±0,01	11,19±0,98	11,96±1,30	25,21±1,4
3	Бруснично-разнотравный	1,39±0,21	0,09±0,01	12,84±1,52	21,37±1,92	35,69±2,9
4	Разнотравно-брусничный	2,52±0,39	0,12±0,01	11,26±1,10	8,62±0,95	22,52±1,9
<i>Среднее</i>		1,90±0,27	0,12±0,01	11,84±1,21	16,0±1,71	29,90±2,2
<i>Через 40 лет после пожара</i>						
1	Разнотравно-зеленомошный	0,31±0,04	2,41±0,36	4,72±0,63	7,71±0,88	15,15±2,1
2	Разнотравно-зеленомошный	0,51±0,09	2,53±0,25	4,56±0,52	12,24±1,40	19,84±1,4
3	Злаково-зеленомошный	2,41±0,29	1,79±0,30	4,70±0,41	10,20±1,32	19,10±1,9
4	Бруснично-зеленомошный	0,64±0,28	3,22±0,39	7,78±0,75	9,12±1,28	20,76±2,7
<i>Среднее</i>		0,97±0,16	2,49±0,23	5,44±0,9	9,82±1,11	18,71±1,8

Примечания. 1. Запас по каждому виду ЛГМ рассчитан по 20 площадкам. 2. Показатель существенности различия (t) по средним запасам отдельных видов ЛГМ во всех случаях $t \geq 3$, т. е. различия существенны.

В последующий 20-летний период (до 40 лет после пожара) сосняки бруснично-разнотравные претерпели трансформацию в сосняки разнотравно-зеленомошные. Длительное отсутствие лесных пожаров способствовало фор-

мированию мохового покрова. Этому также сопутствовало и изменение сомкнутости полога насаждения за счет разрастания подлеска и подроста. Существенно изменился состав доминантов травяно-кустарничкового яруса и его запасы снизились в 2 раза (табл. 4). При этом за счет разрастания мхов *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not. общие запасы живого напочвенного покрова трансформированных разнотравно-брусничных сосняков увеличились в среднем до 3,46 т/га, а мхов возросли в среднем в 20 раз, достигнув 1,79...3,22 т/га. Повышение доли мхов в общем запасе напочвенных ЛГМ в сосняках бруснично-разнотравной группы типов леса в среднем на 13 % привело к образованию хорошо развитого мохового покрова, что преобразовало их фитоценотическую структуру. В соответствии с этим изменились условия разложения растительного материала и накопления опада и подстилки.

Если через 20 лет после пожара в сосняках разнотравно-брусничных доля опада составляла 94 % от общего запаса трав, мхов и опада, то через 40 лет в сосняках разнотравно-зеленомошных на долю опада уже приходилось 63 % запаса, а мхов – 29 %. Если в опаде преобладали (54 %) древесные компоненты (шишки, кора, мелкие веточки), а на хвою и ветошь трав приходилось 32 и 14 % соответственно, то через 40 лет в опаде преобладал очес мха (до 50 %).

Через 40 лет после пирогенного воздействия в лесостепных сосняках запас опада снизился почти в 3 раза и изменился его состав (уменьшилось количество ветоши мезофитных трав и листьев кустарничков, увеличилось содержание очеса мхов). Известно [2], что формирование мохового покрова содействует изменению гидротермического режима почв и повышению биогенности подстилок в сосняках бруснично-зеленомошных.

Таким образом, через 40 лет после пожара наряду со сменой доминантов в напочвенном покрове произошло снижение продуктивности травяно-кустарничкового яруса. Также изменился состав опада, а разрастание мхов способствовало изменению гидротермического режима почв, повышению биогенности подстилок и уменьшению их запасов.

Заключение

Проведенные исследования в сосняках Средней Сибири показали, что запасы и структура напочвенных ЛГМ определяются не только типом растительности и условиями увлажнения, но зональностью и периодичностью лесных пожаров. Запасы ЛГМ связаны с географической широтой и возрастают от зоны лесостепи к подзоне северной тайги. Во всех случаях преобладает запас подстилки, которая является аккумулятором влаги и заметно влияет на скорость пожарного созревания лесных участков, различающихся в зональном аспекте. Наблюдается тенденция увеличения доли запасов подстилки от лесостепи к подзоне северной тайги.

В пределах однородных лесных участков запасы ЛГМ варьируют в связи с синузильностью напочвенного покрова, обусловленной неоднородностью полога древостоя. Запасы отдельных видов ЛГМ меняются в течение сезона, как изменяется и их роль в возникновении и распространении лесного пожара. Поступление опада и его преобразование в подстилку, а также и скорость разложения подстилки сбалансированы, что обуславливает относительную стабильность запаса подстилки в течение вегетационного периода.

Повторяющиеся лесные пожары влияют на формирование запасов напочвенных ЛГМ. Интенсивность пожаров определяет не только количество

сгоревших лесных горючих материалов, но и послепожарные процессы, и накопление напочвенных ЛГМ независимо от зонально-экологических условий. При длительном отсутствии пожаров в напочвенном покрове сосняков, наряду со сменой доминантов, происходит снижение продуктивности травяно-кустарничкового яруса. Изменяется ботанический состав опада, а образование мохового покрова способствует повышению биогенности подстилок и уменьшению их запасов.

Экспериментальные данные по послепожарной динамике накопления ЛГМ позволяют сделать вывод, что уже через 2-3 года после пожара запасы напочвенных ЛГМ достигают такого количества, при котором возможно возникновение и распространение по ним повторных пожаров, что и наблюдается довольно часто. Необходимо проведение профилактических контролируемых выжиганий в целях снижения запасов напочвенных ЛГМ и предотвращения высокоинтенсивных пожаров.

Представленные нами данные о запасах и структуре ЛГМ и их динамике могут быть использованы для оценки риска возникновения и распространения пожара, его эмиссии и интенсивности, а также для расчета сил и средств при тушении пожара. Полученные данные по ЛГМ и их трансформации при пожаре для сосновых лесов обеспечивают базовую основу для понимания и моделирования поведения пожаров и их воздействия на экосистемные процессы, а данные о запасах ЛГМ могут быть использованы для совершенствования существующих глобальных и региональных моделей, включающих характеристики ЛГМ.

Уравнения, разработанные по послепожарной динамике накопления напочвенных ЛГМ в зависимости от интенсивности пожара и времени после пирогенного воздействия, а также информация о средних значениях запасов ЛГМ могут быть применимы к аналогичным сосновым лесам Средней Сибири, для которых отсутствуют данные. Полученные результаты также необходимы для оценки долгосрочного воздействия пожаров на запасы ЛГМ, их послепожарное восстановление и динамику растительности. Аналогичные данные по запасам ЛГМ требуются и для других типов лесов Средней Сибири, включая лиственничные и темнохвойные леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безкоровайная И.Н., Иванова Г.А., Тарасов П.А., Сорокин Н.Д., Богородская А.В., Иванов В.А., Конард С.Г., Макрае Д.Д. Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края // Сиб. экол. журн. 2005. № 1. С. 143–152. [Bezkorovainaya I.N., Ivanova G.A., Tarasov P.A., Sorokin N.D., Bogorodskaya A.V., Ivanov V.A., Konard S.G., McRae D.J. Pyrogenic Transformation of Pine Stand Soil in Middle Taiga of Krasnoyarsk Region. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal* [Siberian Journal of Ecology], 2005, no. 1, pp. 143–152].
2. Бугакова Т.М., Бузыкин А.И. Микрофлора и биологическая активность подстилок сосновых лесов Приангарья // Микробные ассоциации в лесных биогеоценозах. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1983. С. 101–115. [Bugakova T.M., Buzykin A.I. Microflora and Bioactivity of Pine Forest Litter of the Angara Region. *Microbial Associations in Forest Biogeocenoses*. Krasnoyarsk, ILID SO AN SSSR Publ., 1983, pp. 101–115].
3. Буряк Л.В., Лузганов А.Г., Матвеев П.М., Каленская О.П. Влияние низовых пожаров на формирование светлохвойных насаждений юга Средней Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2003. 195 с. [Buryak L.V., Luzganov A.G., Matveev P.M., Kalenskaya O.P.

The Influence of Ground Fires on the Formation of Coniferous Plantations in the South of Central Siberia. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2003. 195 p.].

4. Горшков В.В., Ставрова Н.И., Баккал И.Ю. Динамика восстановления лесной подстилки в бореальных сосновых лесах после пожаров // Лесоведение. 2005. № 3. С. 37–45. [Gorshkov V.V., Stavrova N.I., Bakkal I.Yu. Post-Fire Restoration of Forest Litter in Boreal Pine Forests. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2005, no. 3, pp. 37–45].

5. Горбачев В.Н., Попова Э.П., Сорокин Н.Д., Дмитриенко В.К. Почвенно-экологические исследования в лесных биогеоценозах. Новосибирск: Наука, 1982. 185 с. [Gorbachev V.N., Popova E.P., Sorokin N.D., Dmitrienko V.K. Soil-Ecological Studies in Forest Biogeocenoses. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 185 p.].

6. Диченков Н.А. Географичность запасов лесных горючих материалов // Лесохоз. информ. 1992. Вып. 257. С. 156–160. [Dichenkov N.A. Geographical Reserves of Forest Fuels. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 1992, iss. 257, pp. 156–160].

7. Евдокименко М.Д. Динамика лесной подстилки в сосняках Забайкалья после низовых пожаров // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. 62 с. [Evdokimenko M.D. Dynamics of Litter in the Pine Forests of the Transbaikalian Region after Surface Fires. *Role of Litter in Forest Biogeocenoses*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 62 p.].

8. Иванова Г.А., Иванов А.В. Зонально-географические особенности пожаров в сосновых лесах Средней Сибири // Пожары в лесных экосистемах Сибири: материалы всерос. конф. с междунар. участием. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2008. С. 132–133. [Ivanova G.A., Ivanov A.V. The Zone-Geographical Features of Forest Fires in Pine Forests of Central Siberia. *Fires in Forest Ecosystems of Siberia: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation*. Krasnoyarsk, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ., 2008, pp. 132–133].

9. Иванова Г.А., Конард С.Г., Макрае Д.Д., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Иванов А.В., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Кукавская Е.А., Орешков Д.Н., Перевозникова В.Д., Самсонов Ю.Н., Сорокин Н.Д., Тарасов П.А., Цветков П.А., Шишикин А.С. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы средне-нетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с. [Ivanova G.A., Conard S.G., McRae D.J., Bezkorovaynaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Kukavskaya E.A., Oreshkov D.N., Perevznikova V.D., Samsonov Yu.N., Sorokin N.D., Tarasov P.A., Tsvetkov P.A., Shishikin A.S. *The Impact of Fires on the Ecosystem Components of the Central Taiga Pine Forests of Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014. 232 p.].

10. Иванова Г.А., Жила С.В., Кукавская Е.А., Иванов В.А. Постпирогенная трансформация фитомассы древостоя в насаждениях Нижнего Приангарья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 6. С. 17–32. [Ivanova G.A., Zhila S.V., Kukavskaya E.A., Ivanov V.A. The Post-Fire Transformation of Forest Stand Phytomass in Plantations of the Lower Angara Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 6, pp. 17–32]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.6.17](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.17), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e8a/17_32.pdf

11. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопр. лесн. пирологии. Красноярск: ИЛИД, 1970. С. 5–58. [Kurbatskiy N.P. Studies of Loading and Characteristics of Forest Fuels. *Issues of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk, ILiD Publ., 1970, pp. 5–58].

12. Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии // Вопр. лесн. пирологии. Красноярск: ИЛИД, 1972. С. 171–231. [Kurbatskiy N.P. Terminology of Forest Pyrology. *Issues of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk, ILiD Publ., 1972, pp. 171–231].

13. Курбатский Н.П., Иванова Г.А. Пожароопасность сосняков лесостепи и пути ее снижения. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1987. 113 с. [Kurbatskiy N.P., Ivanova G.A. *Fire Hazard of Pine Forest-Steppe and Ways to Reduce It*. Krasnoyarsk, ILiD Publ., 1987. 113 p.].

14. Лащинский Н.Н. Структура и динамика сосновых лесов Нижнего Приангарья. М.: Наука, 1981. 272 с. [Lashchinskiy N.N. *Structure and Dynamics of Pine Forests of the Lower Angara Region*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 272 p.].
15. Лесные экосистемы Енисейского меридиана / под ред. Ф.И. Плешикова. Новосибирск: СО РАН, 2002. 356 с. [Forest Ecosystems of the Yenisei Meridian. Ed. by F.I. Pleshikov. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 356 p.].
16. Мелехов И.С. Об отложении лесной подстилки в зависимости от типа леса // Тр. АЛТИ. 1957. Вып. 17. С. 124–137. [Melekhov I.S. On the Deposition of Forest Litter, Depending on the Forest Type. *Trudy ALTI*, 1957, iss. 17, pp. 124–137].
17. Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с. [Molchanov A.A. *The Productivity of Organic Matter in Forests of Various Zones*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 275 p.].
18. Мусин М.З. Лесные пожары в борах Казахского мелкосопочника и их профилактика: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1974. 24 с. [Musin M.Z. *Forest Fires in the Woods of the Kazakh Upland and Their Prevention*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1974. 24 p.].
19. Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1969. 155 с. [Pozdnyakov L.K., Protopopov V.V., Gorbatenko V.M. *Biological Productivity of the Forests in Central Siberia and Yakutia*. Krasnoyarsk, ILiD SO AN SSSR Publ., 1969. 155 p.].
20. Попова Э.П. Особенности почвообразования в лесных биогеоценозах Приангарья в зависимости от давности пожаров // Генезис и география лесных почв. М.: Наука, 1980. С. 40–52. [Popova E.P. Features of Soil Formation in the Forest Biogeocenoses of the Angara Region Depending on Duration of Fires. *Genesis and Geography of Forest Soils*. Moscow, Nauka Publ., 1980, pp. 40–52].
21. Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука, 1978. 165 с. [Semechkina M.G. *The Structure of Phytomass of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 165 p.].
22. Софронов М.А., Баранов Н.М. Распределение по площади запасов мха, опада и подстилки // Моделирование и охрана лесов от пожаров. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1979. С. 99–108. [Sofronov M.A., Baranov N.M. Distribution by Area of Stocks of Moss, Litter and duff. *Forest Fire Simulation and Protection*. Krasnoyarsk, ILiD SO AN SSSR Publ., 1979, pp. 99–108].
23. Средняя Сибирь / под ред. И.П. Герасимова. М.: Наука, 1964. 480 с. [Central Siberia. Ed. by I.P. Gerasimov. Moscow, Nauka Publ., 1964. 480 p.].
24. Шешуков М.А. К вопросу составления пожарных карт // Сб. тр. ДальНИИЛХ. 1966. Вып. 8. С. 407–416. [Sheshukov M.A. To the Issue of Making Fire Maps. *Collection of Academic Papers of DalNILH*. 1966, iss. 8, pp. 407–416].
25. Щербakov И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А. Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. 224 с. [Shcherbakov I.P., Zabelin O.F., Karpel B.A. *Forest Fires in Yakutia and Their Influence on the Forest Nature*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 224 p.].
26. Albini F.A. *Estimating Wildfire Behavior and Effects*. USDA Forest Service. General Technical Report INT-30. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1976. 92 p.
27. Alexander M.E., Lawson B.D., Stocks B.J., Van Wagner C.E. *User Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System: Rate of Spread Relationships*. Ottawa, ON, Canadian Forest Service Fire Danger Group, 1984. 73 p.
28. Alexander M.E., Stocks B.J., Lawson B.D. *Fire Behavior in Black Spruce-Lichen Woodland: The Porter Lake Project*. Information Report NOR-X-310. Edmonton, AB, Northern Forestry Centre, 1991. 44 p.

29. Anderson H.E. *Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior*. General Technical Report INT-122. Ogden, UT, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. 22 p.
30. Brown J.K. A Planar Intersect Method for Sampling Fuel Volume and Surface Area. *Forest Science*, 1971, vol. 17(1), pp. 96–102.
31. Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D. *The National Fire-Danger Rating System*. General Technical Report INT-39. Ogden, UT, USDA Forest Service, 1978. 66 p.
32. Kukavskaya E.A., Ivanova G.A., Conard S.G., McRae D.J., Ivanov V.A. Biomass Dynamics of Central Siberian Scots Pine Forests Following Surface Fires of Varying Severity. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, vol. 23(6), pp. 872–876. DOI: [10.1071/WF13043](https://doi.org/10.1071/WF13043)
33. McRae D.J., Alexander M.E., Stocks B.J. *Measurement and Description of Fuels and Fire Behavior on Prescribed Burns: A Handbook*. Information Report O-X-287. Marie, ON, Great Lakes Forest Research Centre, 1979. 44 p.
34. McRae D.J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S.P., Samsonov Y.N. et al. Variability of Fire Behavior Fire Effects and Emissions in Scotch Pine Forests of Central Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, vol. 11, pp. 45–74. DOI: [10.1007/s11027-006-1008-4](https://doi.org/10.1007/s11027-006-1008-4)
35. Morgan P., Hady C.C., Swetnam T.W., Rollins M.G., Long D.G. Mapping Fire Regimes across Time and Space: Understanding Coarse and Fine-Scale Fire Patterns. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, vol. 10(4), pp. 329–342. DOI: [10.1071/WF01032](https://doi.org/10.1071/WF01032)
36. Ottmar R.D., Sandberg D.V., Riccardi C.L., Prichard S.J. An Overview of the Fuel Characteristic Classification System – Quantifying, Classifying, and Creating Fuelbeds for Resource Planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, vol. 37, no. 12, pp. 2383–2393. DOI: [10.1139/X07-077](https://doi.org/10.1139/X07-077)
37. Van Wagner C.E. The Line Intersect Method in Forest Fuel Sampling. *Forest Science*, 1968, vol. 14, no. 1, pp. 20–26.
38. Walker J.D., Stocks B.J. *The Fuel Complex of Mature and Immature Jack Pine Stands in Ontario*. Information Report O-X-229. Marie, ON, Great Lakes Forest Research Centre, 1975. 19 p.

ZONALITY OF FOREST FUELS AND THEIR PYROGENIC TRANSFORMATION IN PINE FORESTS OF CENTRAL SIBERIA

G.A. Ivanova¹, Doctor of Biology; ResearcherID: [R-8916-2016](https://orcid.org/0000-0002-3758-8106),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-8106>

V.A. Ivanov², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAE-3176-2019](https://orcid.org/0000-0002-6201-2133),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6201-2133>

¹Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, ul. Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: gaivanova@ksc.krasn.ru

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: ivanovv53@yandex.ru

Fires in the forests of Siberia occur annually and cause enormous damage to natural resources. Therefore, studies of the natural forest fire hazard, one of the components of which are forest fuels, are relevant. The research carried out on 53 sites in the pine forests growing along the Yenisei meridian transect revealed that surface fuel loads in pine stands of different zones of Central Siberia are defined by geographical latitude and increase from the forest-steppe zone to the northern taiga subzone. The largest forest fuel loads are concentrated

in the pine stands of the northern and middle taiga. Their composition is dominated by loads of duff, the fraction of which in surface fuel loads increases from the forest-steppe zone (57.4 %) to the northern taiga zone (71.3 %). The obtained dynamic equations of the reserves of grass-shrub understory over the season may be applicable to grassy types of pine forests. Combustion of surface forest fuels in pine forests during surface fires of different intensity varies from 10.8 to 31.4 t/ha, which is from 26.1 to 74.1 % of their loads before the fire. The intensity of fires determines not only the number of burned forest fuels, but also their post-pyrogenic accumulation regardless of zonal and environmental conditions. The variation of fuel loads in forest areas is related to pyrogenic effects and the recovery period after the last fire, as well as to the mosaic distribution of living ground vegetation. Equations of accumulation of surface forest fuels after fires of different intensity that can be applied to pine forests of Central Siberia are developed. A change of dominants in the ground cover and a decrease in the productivity of the grass-shrub understory occurs in a long-term absence of fires in pine forests. The development of moss cover contributes to the decrease in litter reserves. The data obtained on the loads of surface forest fuels and their transformation during a fire provide the basis for understanding and simulation fire behavior, estimating emissions and impacts of fires on fuel loads, and can be used for improvement the existing global and regional models.

For citation: Ivanova G.A., Ivanov V.A. Zonality of Forest Fuels and Their Pyrogenic Transformation in Pine Forests of Central Siberia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 9–26. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-9-26

Funding: The research was supported by the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and the Russian Foundation for Basic Research (grant projects No. 07-04-00562 and 19-58-80002 BRICS-t).

Keywords: forest fires, forest fuels, loads, surface forest fuels, fire intensity, pine forests, Central Siberia.

Поступила 09.12.19 / Received on December 9, 2019

УДК 630*385.114

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-27-39

ФОРМИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА БИОТОПА КУЛЬТУР СОСНЫ НА ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ ПОСЛЕ ГИДРОМЕЛИОРАЦИИ

Б.В. Бабиков, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAM-9500-2020](https://orcid.org/0000-0003-3280-572X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3280-572X>

М.Б. Субота, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID:* [AAM-9484-2020](https://orcid.org/0000-0003-3721-8604),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3721-8604>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;
e-mail: babikov_boris32@mail.ru, subota_m@mail.ru

Болота в лесном фонде России занимают более 12 % территории, превышая 100 млн га. В основном это облесенные болота с низкобонитетными древостоями. Значительная часть, преимущественно олиготрофных болот, вообще безлесна. Около 60 % болот евтрофного и мезотрофного типов являются потенциально богатыми питательными веществами. Здесь успешному росту леса мешает только избыток воды. В мировом лесном хозяйстве накоплен большой опыт регулирования водного режима почв посредством гидромелиорации (осушения). В России имеются классические примеры, когда на территориях в несколько тысяч гектар после гидромелиорации формировались древостой I класса бонитета. Примером может служить Хейновское болото площадью более 2 тыс. га, расположенное в Лисинском учебно-опытном лесхозе Санкт-Петербургского лесного института, осушенное в 1847 г. Однако достаточно примеров и неудачного осушения. Большая часть осушаемых болот до осушения была покрыта лесом. Гидромелиорация улучшила условия роста всех имевшихся до осушения древостоев, но на бедных евтрофных болотах рост леса недостаточно хорош. Цель исследования – изучение вновь созданных насаждений на осушенной территории с учетом всего цикла формирования биотопа и его изменений во времени. Для этого был заложен опытный участок на евтрофно-мезотрофном безлесном торфянике, где проведено осушение с помощью частой сети мелких канавок (борозд), сформированных двухотвальным плугом (каналокопателем) и выведенных в каналы осушительной сети, что обеспечивало постоянный отвод воды. По пластам, образовавшимся вдоль борозд, при участии автора созданы лесные культуры. Оценка изменения состояния насаждения проводилась регулярно через 5–10 лет в течение почти 60 лет. Исследования показали, что уже в первые годы после удаления избыточной воды вследствие лучшей прогреваемости почвы произошла осадка и сработка торфа. При глубине 0,4...0,5 м через 20 лет после посадки культур глубина торфа уменьшилась почти в 2 раза. Под влиянием осушения и появившегося насаждения изменился живой напочвенный покров. Исходный (болотный) тип почвообразования сменился дерновым, сформировалось высокобонитетное высокопродуктивное насаждение. При сопоставлении показателей этого искусственного насаждения и древостоев естественного происхождения по таблицам хода роста установлено, что запас созданного насаждения в 50-летнем возрасте почти в 2 раза превышает запас естественно возникшего древостоя. Можно предположить, что при выращивании древесной массы целевого назначения за 100 лет можно собрать два «урожая». За 50-летний период произошли изменения торфяной почвы. За счет интенсивного разложения торфа снизилось содержание углерода (C) и повысилось содержание общего азота (N), о чем свидетельствует уменьшение соотношения C : N. Проявилось формирование структуры в торфяной почве. Отмечено начало подзолообразовательного процесса. Вероятно, наличие хвойного опада повысило актуальную и гидролитическую кислотность.

Для цитирования: Бабилов Б.В., Субота М.Б. Формирование и динамика биотопа культур сосны на торфяных почвах после гидромелиорации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 27–39. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-27-39

Ключевые слова: биотоп, гидромелиорация, водный баланс, водное питание, норма осушения.

Введение

Торфяные болота занимают около 12 % территории лесного фонда России [14], в большинстве своем они относятся к потенциально богатым питательными веществами землям. П.И. Жудра еще в 1896 г. отмечал, что «...если успешному росту леса препятствует только избыток воды, то осушение дает высокий эффект». Торфяные болота подразделяются на верховые (олиготрофные), переходные (мезотрофные) и низинные (эвтрофные).

Трофность – показатель богатства торфа (содержания в нем питательных веществ, прежде всего азота, фосфора и калия) определяется типом водного питания (поступлением воды). Если вода на участок поступает сверху (атмосферное питание), то она не содержит питательных веществ и в таких условиях образуются бедные олиготрофные верховые болота. При поступлении воды снизу (грунтовое питание) она промывает почву, принося питательные вещества. В данных условиях возникают низинные (эвтрофные болота). Низинные болота могут возникать и при подъеме воды в реках в период весеннего половодья, временно затопляющем надпойменную террасу мутной водой. В такой воде обычно содержатся питательные вещества, здесь образуются низинные (эвтрофные) болота пологих пойм. Большое количество этих болот появилось, например, в низинах равнинных пологих участков Мещерской низменности, что прекрасно описано в повести «Мещерская сторона» К. Паустовского: «В Мещерском крае можно увидеть лесные озера с темной водой, обширные болота, покрытые ольхой...». Наличие ольхи уже свидетельствует о богатстве почвы.

На болотах обычно произрастают низкобонитетные древостои [16, 21]. Около 30 % болот, преимущественно олиготрофного типа, вообще безлесны, но более 60 % болот представлено богатыми торфяниками эвтрофного или мезотрофного типов. Потенциально здесь можно выращивать высокобонитетные древостои, но успешному росту леса и любой растительности мешает избыток воды [18]. Регулирование увлажнения посредством гидромелиорации позволяет на мелиорированных территориях выращивать высокопродуктивные древостои. В производственной специальной терминологии гидромелиорацию называют осушением болот, что в средствах массовой информации нередко представляется как осушение, приводящее к уничтожению болот. Фактически цель такого осушения – понижение уровня грунтовых вод на глубину 30...40 см (норма осушения) неглубокими канавами. При этом болото как аккумулятор и хранитель воды сохраняется [6], а условия роста леса улучшаются [5]. В практике ведения лесного хозяйства примеров такого осушения с выращиванием высокобонитетных древостоев множество. Например, на осушенном в 1841 г. Суландском болоте в Лисинском учебно-опытном лесхозе Санкт-Петербургского лесного института в настоящее время произрастает высокобонитетный сосновый древостой с запасом древесины до 600 м³/га [12]. Болото в осушенном состоянии до сих пор сохра-

няет запасы влаги. Весной грунтовые воды здесь располагаются у поверхности почвы, а иногда выходят на поверхность. К началу вегетации сохранившаяся сеть осушительных каналов отводит поверхностные воды. Летом за счет суммарного испарения, в котором определяющую роль играет транспирация влаги древостоем, грунтовые воды понижаются до 0,4...0,5 м и более. Водобалансовые исследования показали, что на суммарное испарение в летний период расходуется большая часть влаги выпавших осадков. Летом в годы с большим количеством осадков в зависимости от интенсивности осушения на суммарное испарение расходуется 80...85 % выпавших осадков, в засушливые (маловодные) годы – 90...95 %.

Для комплексной оценки влияния гидромелиорации на формирование и динамику соснового биотопа в Ушакинском лесничестве бывшего Тосненского лесхоза (до введения нового Лесного кодекса) в 1958 г. был подготовлен стационарный опытный участок и созданы посадкой культуры сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.). Цель исследования – изучение вновь созданных насаждений на осушенной территории с учетом всего цикла формирования биотопа и его изменений во времени.

Объекты и методы исследования

В 1959 г. заложен стационар и начаты исследования роста культур сосны и формирования сосновых насаждений в условиях торфяников мезотрофного типа, а также изменения лесной экосистемы (фитоценоза) во времени. Общая площадь стационара 43 га. Положение участков ровное, микрорельеф представлен кочками преимущественно из кукушкина льна и сфагновых мхов.

Живой напочвенный покров в основном состоял из растений, типичных для богатой торфяной переувлажненной почвы с проточным увлажнением, в нем преобладали: осока вздутая (*Carex inflata*), кукушкин лен (*Politrium commune* L.), луговик извилистый (*Dechampsia flexuosa* L.), иван-чай – кипрей (*Hamaerium angustifolium*), мятлик болотный (*Poa palustris* L.), звездчатка ланцетная (*Stellaria holostea* L.), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.).

Глубина торфа в начале исследования составляла 40...50 см. Морфологическая характеристика почвы:

0...3 см – дернина из болотных растений и растительных остатков;

4...27 см – темно-коричневый торф, степень разложения около 40 % с вкраплением минеральных частей;

28...48 см – темно-бурый торф, пронизанный отмершими корнями осок, степень разложения более 50 %, в нижней части сильно минерализованный;

49...74 см – суглинок темноватого цвета с ржаво-бурым железистыми пятнами, пронизанный отмершими корнями осок;

75...100 см – тяжелый суглинок с хорошо выраженными признаками оглеения.

Почва торфяно-перегнойная, глеевая с выраженным слоем дернины с крупными микроповышениями (кочками) из кукушкина льна. Агрохимическая характеристика почвы участка 1 приведена в табл. 1. Опытный участок расположен на периферийной части обширного болота «Гладкое» [10]. На участке сохранились старые заросшие каналы вдоль квартальных просек.

Таблица 1

Агрохимические показатели почвы (1959 г.)

Глубина взятия образцов, см	Степень разложения, %	Зольность, %	pH _{водн}	pH _{солев}	ГК	<i>S</i>	<i>V</i> , %	Об- щий азот, %
					мг-экв. / 100 г почвы			
3...10	20	7,7...22,0	4,7	4,0	31,4	3,8	10,8	1,21
11...20	35	12,7...30,1	4,6	4,1	30,2	5,0	14,2	1,24
21...30	40	28,0...31,0	4,6	4,2	45,2	5,6	11,2	1,14
31...40	50	34,0...58,0	4,5	4,5	40,3	5,0	8,8	1,41

Примечание. рН_{водн} – актуальная кислотность; рН_{солев} – обменная кислотность; ГК – гидролитическая кислотность; S – сумма поглощенных оснований; V – степень насыщенности основаниями.

Данные табл. 1 показывают, что торфяная почва с хорошо разложившимся торфом отличается высокой зольностью. По богатству почвы – это торфяник переходного типа, близкий к низинному.

При создании лесных культур осенью 1959 г. территория участка прошла специальную подготовку. Для этого каналокателем ЛКА-2 на тяге двух тракторов С-80 через 3...4 м проведены мелкие канавки (борозды) глубиной 30...40 см. Толщина пластов – 15...20 см, их ширина – 40...60 см. По обе стороны борозд образовалось по два пласта, которые были прикатаны гусеницами трактора (рис. 1).



Рис. 1. Подготовка почвы при создании лесных культур

Fig. 1. Soil preparation in development of forest plantations

Борозды, которые выведены в расположенные вдоль квартальных просек осушительные каналы, обеспечивали постоянный отвод воды. Наблюдения показали, что в течение вегетационного периода в бороздах воды не было, она появлялась только кратковременно в период дождей, что позволило корням расти под дном борозды и формировать симметричность корневой системы. Годы исследований существенно различались по водности, что отразилось на положении грунтовых вод в разные годы (табл. 2).

Таблица 2

Глубина грунтовых вод (см) на постоянных пробных площадях

Год	Месяц				
	V	VI	VII	VIII	V–VIII*
1962	23	25	18	28	23,5
1963	22	53	59	60	48,5
1964	25	46	100	61	65,5

*Среднее значение.

Осадков в мае 1962 г. выпало 443 мм при норме 386 мм, в 1963 и 1964 гг. их было в 2 раза меньше. Среднесуточное понижение грунтовых вод составляло 3,5...4,0 см, обеспечивая их устойчивое понижение в течение всего периода вегетации. Вероятно, на положение грунтовых вод оказывает влияние и транспирационный расход влаги развивающегося насаждения, достигшего в 1964 г. смыкания крон в рядах.

Лесные культуры созданы в мае 1959 г. посадкой под меч Колесова 2-летних сеянцев сосны. Расстояние между посадками в рядах около 0,7 м. Расстояние между рядами в зависимости от расстояния между бороздами варьирует в пределах 1,5...3,0 м. Приживаемость культур составила 96 %. Уход за посадками заключался в частичной opravке саженцев, выжатых при заморозках на почве весной 1960 г. Уходов в виде прополки не требовалось, так как в первые два года на широких пластах травянистой растительности не было. На 2- и 3-й год между рядами культур появился иван-чай (кипрей), с годами обильно разросшийся и господствовавший в культурах на протяжении 4–5 лет. Вначале он почти обгонял сосну. По мере роста культур годичный прирост сосны в высоту увеличивался и в первые 3–4 года составил 30...40 см в год. К 5-летнему возрасту средняя высота сосны – 1,36 м, диаметр ствола у корневой шейки – 4,2 см, диаметр кроны – 83 см, ее высота – 112 см. В культурах 5–6-летнего возраста отмечается смыкание крон в рядах, а к 10-летнему возрасту деревья уже имели сомкнутые кроны, и между рядами исчез кипрей. Рост сосны характеризовался исключительно высокими значениями. Следует отметить, что под соснами 10–12-летнего возраста появились и обильно встречались в течение 1–2 лет грибы маслята, далее они исчезли.

При создании лесных культур в производственных условиях их успешному росту часто может препятствовать появление самосева лиственных пород, обычно березы или осины. Без их удаления созданные хвойные культуры могут быть вытеснены растениями лиственных пород. В высокобонитетных сомкнутых культурах появление лиственных древесных растений ограничено. В наших условиях на опытных участках появившиеся отдельные лиственные деревья удалялись. Для предотвращения возможного лесного пожара и перехода его в верховой в 15-летнем возрасте была проведена обрубка нижних усыхающих сучьев (рис. 2). В 10-летнем возрасте сформировалось сомкнутое насаждение с запасом около 50 м³/га. Традиционные рубки ухода не проводились.



Рис. 2. Культуры сосны в 15-летнем возрасте

Fig. 2. 15-year-old pine plantations

Изменение таксационных показателей сосны по мере ее роста и развития приведено в табл. 3.

Таблица 3

Динамика таксационных показателей культур сосны

Год/ возраст	Средние		Количество деревьев, экз./га	Запас, м ³ /га	Полнота древостоя	Годичный прирост, м ³ /га	Класс бонита
	высота, м	диаметр, см					
1964/5	1,4	4,2	4600	—	—	—	—
1970/11	4,9	6,5	4500	55	1,00	5,0	1
1978/18	8,1	9,6	3786	121	1,06	8,3	1a
1984/26	13,2	11,4	2166	223	1,10	12,5	1a
1995/36	18,5	16,3	1887	321	1,10	10,1	1a
2016/57	26,2	21,7	1190	525	1,08	9,5	1a

Анализируя ход роста соснового насаждения и сопоставляя рост естественно сформировавшихся сосновых древостоев и искусственно созданных насаждений — лесных культур, можно отметить существенные различия. В естественных древостоях, начиная с их появления, больше деревьев на единице площади, выше и густота насаждения, которая достигает 6...8 тыс. экз./га с полнотой около 1,00, постепенно снижаясь с возрастом. Согласно таблицам хода роста [9], в составе древостоя 1-го класса бонитета в 20-летнем возрасте было 4631 дерево. Высота древостоя — 7,6 м, его запас — 83 м³/га.

При создании культур сосны было высажено около 4800 саженцев, в 20-летнем возрасте осталось 3608 деревьев. Средняя высота насаждения культур — 10,2 м при среднем диаметре 10,1 см. При большей высоте и диаметре выше, чем в естественно возникшем древостое, запас был 146 м³/га.

В 30-летнем возрасте запас естественного древостоя составлял 134 м³/га [9], в созданных культурах сосны – 270 м³/га [1]. В насаждениях культур в возрасте 57 лет запас был 525 м/га при высоте насаждения 26,2 м и диаметре 21,7 см (табл. 3). В древостоях естественного происхождения, согласно таблицам хода роста [9, 11], в возрасте 60 лет он составлял 302 м/га при средних высоте 19,8 м и диаметре 19,1 см. Высокие запасы в искусственно созданных насаждениях, но в более благоприятных условиях юго-западных областей России отмечены и в работе В.С. Моисеева [11].

Высокого прироста и больших запасов в искусственных насаждениях можно ожидать и далее. Важно знать соотношение между диаметром и высотой [19, 20]. Наши исследования показали, что деревья с большей высотой при большей густоте могут иметь охлестывание крон и многовершинность. Поэтому необходимо проводить уход за насаждениями по типу прореживания.

Для роста древесных растений, особенно в условиях холодного климата, важно сформировать микроповышения почвы [20], в данном случае в виде пластов. Полученное в таком случае высокобонитетное высокополнотное насаждение изменило и лесорастительные условия, что привело к смене растительности напочвенного покрова биотопа в целом. Из ранее имевшихся при подготовке территории растений напочвенного покрова в созданных культурах остались по микроповышениям *Politrichum commune*, *Dechamista flexuosa* на относительно открытых пространствах, *Viola palustris* L. в понижениях между рядами культур. Исчезли ранее обычно произраставшие *Hamaenorium angustifolium* L., *Carex inflata*, *Poa palustris*, *Stellaria holostea* L. Появились малина (*Rubus hamaemorus*), бор развесистый (*Milium effusum*), полевица обыкновенная (*Agrostis capillaris* L.), щитовник игольчатый (*Dryopteris spinulosa*) – представители богатых почв проточного увлажнения [13].

При обследовании через 24 года после создания лесных культур болотный тип почвообразования сменился дерновым. Следует отметить снижение мощности торфяного горизонта. Слой торфа с 50...55 см уменьшился до 23...27 см. По структурному строению почва в 1983 г. имела следующую морфологическую характеристику:

T0 0...5 см – лесная оторфованная подстилка, темно-коричневая, состоящая из отпада сосны и травянисто-моховой растительности, слаборазложившаяся, рыхлая, пронизанная корнями сосны и трав, переход в следующий горизонт сплошной постепенный;

T1 5...13 см – среднеразложившийся торф, темно-бурый, рыхлый, сплошь пронизанный корнями сосны, переход в следующий горизонт сплошной постепенный;

T2 13...25 см – среднеразложившийся торф, черный, рыхлый, с примесью песка, пронизанный корнями сосны, переход в следующий горизонт сплошной резкий;

A1/B 25...45 см – гумусово-иллювиальный горизонт, бурый, тяжелосуглинистый, пылеватый, плотный, трещиноватый, с железисто-марганцевыми конкрециями, сплошь пронизанный остатками хвоща, встречаются корни сосны, переход в следующий горизонт сплошной постепенный затеками;

A2/Bg 45...77 см – переходный подзолисто-иллювиальный горизонт, светло-серый, тяжелосуглинистый, пылеватый, плотный, трещиноватый, оглееный с остатками хвоща, встречаются остатки корней;

B/cg 77...110 см – переходный горизонт, почва торфяно-глеевая на метаморфизированной ленточной глине.

Анализ почвенного разреза показывает, что бывшая дернина верхнего горизонта сменилась оторфованной лесной подстилкой, включающей опад хвои и веточек сосны. Ниже расположенный торфяной горизонт пронизан корнями сосны, проникающими в гумусово-иллювиальный горизонт до глубины 0,6...0,7 м.

При высоких уровнях грунтовых вод, большой влажности и плохой аэрации [15] происходит накопление CO_2 в почвенном воздухе, что препятствует проникновению корней вглубь [1–3] и способствует формированию поверхностной корневой системы. Высокие концентрации CO_2 являются своеобразным биологическим барьером для роста корней вглубь.

Сформировавшееся высокобонитетное насаждение оказало существенное влияние на распределение влаги в вегетационный период. Обеспечив устойчивое положение грунтовых вод летом ниже торфяного горизонта, высокополнотное сомкнутое насаждение задерживает до 40 % осадков при высокой транспирации. На суммарное испарение летом расходовалось в отдельные месяцы до 85...90 % осадков и более. Это отразилось, прежде всего, на перестроении корневой системы [7]. Корни растений не растут в обводненных почвах. При отсутствии воды в бороздах сформировалась равномерно развитая во все стороны симметричная корневая система (рис. 3, А; верх – а).

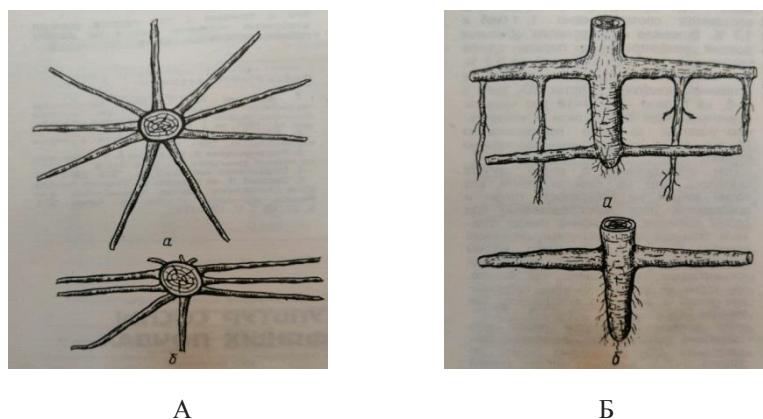


Рис. 3. Вид корневых систем культур сосны II класса возраста: А – горизонтальное строение корневых систем; Б – вертикальное строение корневых систем

Fig. 3. View of the root systems of pine plantations of the 2nd age class: А – horizontal structure of root systems; Б – vertical structure of root systems

Высокое суммарное испарение влаги в [4] привело к снижению уровня грунтовых вод, что сказалось на росте корней вглубь. Стержневой корень к 25-летнему возрасту углубился мало (рис. 3, Б; низ – б), достигнув глубины 30 см, но в дополнение к хорошо развитым горизонтальным корням, расположенным преимущественно на глубине 5...15 см, с годами в нижней части

стержневого корня сформировался второй ярус горизонтальных корней. От горизонтальных корней первого (верхнего) яруса вниз уходят многочисленные вертикальные корни (рис. 3, Б; верх – *a*). Между пластами (в междурядьях) корни по трещинам в почве в сухое время года проникают в минеральный грунт до глубины 80...90 см и более, где образуют густую мочку корней. Местами корни достигают глубины 100...110 см. Такая мощная двухъярусная корневая система обеспечивает устойчивость насаждений сосны против ветровала, что и проявилось во время урагана 30 июня 1998 г., когда на отдельных участках были сломаны деревья (отмечен бурелом), однако ветровальных деревьев не было. Своеобразна и форма корневого сечения: корни, имевшие в начальном периоде роста (до 5 лет) округлое сечение, постепенно приобретали эллипсовидную форму, что отмечено и в работе С.Э. Вомперского [8].

В 2004 г., через 45 лет после создания культур сосны и формирования высокобонитетного сомкнутого насаждения (рис. 4), вновь отмечены изменения в биотопе: сменился и живой напочвенный покров, появились черника (*Vaccinium myrtillus*), майник двулистный (*Maiáanthemum bifolium*), кислица (*Oxalis acetosella*), незабудка (*Myosótis silvatika*), местами земляника (*Fragária fescá*), гравилат речной (*Géum rivále*) – типичные представители группы богатых зеленомошных типов леса проточного увлажнения. Произошли изменения и почвы на участке 1 (табл. 4).



Рис. 4. Культуры сосны в 45-летнем возрасте

Fig. 4. Planting of 45-year-old pine plantations

Таблица 4

Агрохимические показатели почвы (2004 г.)

Горизонт, глубина, см	Зольность, %	pH _{водн}	pH _{солев}	ГК	S	V, %	Общий азот, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	Общий углерод, %	C : N
				мг-экв. / 100 г почвы				мг-экв. / 100 г почвы			
T ₃ , 3...8	14,8	4,0	3,4	47,6	1,1	2,1	1,51	7,4	4,3	11,7	7,8
T ₃ , 9...20	26,1	4,2	3,5	65,5	3,8	5,5	2,23	11,5	5,0	26,8	12,0
A ₂ , 21...32	49,0	4,3	3,4	70,1	6,3	8,2	1,99	18,0	51,8	21,4	10,8
Bg, 33...45	94,0	5,0	4,1	8,2	1,0	10,8	0,90	14,9	9,2	1,9	9,9

Примечание. Обозначения см. в табл. 1.

Богатые эвтрофные и мезотрофные торфяники с разложившимся торфом после осушения трансформировались в перегнойно-торфяные почвы с минерализацией торфяной залежи. Согласно исследованиям 2004 г., через 45 лет после создания культур, по профилю почвенного разреза встречаются линзы подзолообразования в торфяном слое. Увеличилось содержание общего азота до 1,51...2,23 % по сравнению с подобным показателем в 1962 г. – 1,14...1,24 % (см. табл. 1). Несколько повысилась актуальная и гидролитическая кислотность. Интенсификация разложения торфа при осушении приводит к снижению общего содержания углерода и увеличению общего азота при более низком соотношении C : N, характеризуя степень разложения и минерализацию торфа.

Заключение

Оценку состояния и динамики древостоя обычно проводят по результатам периодической таксации и таблицам хода роста. При этом оцениваются только изменения продуктивности древостоя, что связано с типами леса. Исследование изменения условий произрастания и типов леса в динамике в конкретных условиях – явление не частое. Нами показаны общие изменения биотопа, в частности состояния почвенных условий, по существу формирование почвы на месте торфяника. Установлено, что на месте эвтрофного безлесного болота под влиянием гидромелиорации произошли изменения состояния живого напочвенного покрова и хода формирования древесного насаждения.

Рассмотрены особенности формирования соснового насаждения почти без лесоводственного вмешательства. Установлено, что к 50–60-летнему возрасту сформировалось высокобонитетное высокополнотное насаждение с запасом 500...600 м³/га при регулируемом отводе дождевой воды по бороздам. За счет суммарного испарения обеспечено постоянное освобождение почвы от гравитационной влаги. В период вегетации на суммарное испарение расходовалось до 85...90 % воды выпадающих осадков. Для восполнения влаги в начальном возрасте (10–15 лет) корни деревьев, располагавшиеся в торфяном горизонте на глубине 15...20 см, проникают в подстилающий минеральный грунт до глубины 0,9...1,1 м, образуя второй ярус корней.

Запас насаждения в 50–60-летнем возрасте превышает 500 м³/га, что выше, чем в древостоях естественного происхождения в возрасте 90–100 лет. Это свидетельствует о том, что при выращивании древесной массы (например, для целлюлозно-бумажного и мебельного производств) с 1 га за 100 лет можно получить два «урожая», что невозможно в древостоях естественного происхождения.

В высокоствольном (более 26 м) насаждении с полнотой 1,00 и более отмечено охлестывание вершин, что приводит к многовершинности. Поэтому при выращивании технически спелой древесины предложено проводить уход за лесом в виде прореживания и проходных рубок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабиков Б.В. Состав воздуха торфяных почв и его влияние на рост культур сосны // Изв. вузов. Лесн. журн. 1963. № 6. С. 14–19. [Babikov B.V. The Air Composition of Peat Soils and Its Effect on the Growth of Pine Plantations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1963, no. 6, pp. 14–19. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1963.pdf>]
2. Бабиков Б.В. Воздушный режим почв осушенных переходных болот // Природа болот и методы их исследования. Л.: Наука, 1967. С. 145–150. [Babikov B.V. Air Conditions of Soils of Drained Transitional Swamp. *Nature of Swamps and Methods for Their Study*. Leningrad, Nauka Publ., 1967, pp. 145–150].
3. Бабиков Б.В. Экология сосновых лесов на осушенных болотах. СПб.: Наука, 2004. 166 с. [Babikov B.V. *Ecology of Pine Forests in Drained Swamps*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2004. 166 p.].
4. Бабиков Б.В. Расход влаги с осушенных лесных болот // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 4. С. 14–17. [Babikov B.V. Water Discharge from the Wooded Bogs. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 4, pp. 14–17]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/61f/qfzb2.pdf>
5. Бабиков Б.В. Болота в лесах России и их использование // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 9–19. [Babikov B.V. Mires in the Forests of Russia and Their Use. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 6, pp. 9–19]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/3e4/1-bolota-v-lesakh-rossii-i-ikh-ispolzovanie.pdf>
6. Бабиков Б.В. Гидрологическая роль болот и водное питание рек // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 38–47. [Babikov B.V. The Hydrological Role of Wetlands and Water Supply of Rivers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 38–47]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.5.38](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.38), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/502/38_47.pdf
7. Бабиков Б.В., Колесников Ю.Е. Формирование корневых систем культур сосны на осушенных торфяных почвах // Лесн. хоз-во. 1997. № 4. С. 39–40. [Babikov B.V., Kolesnikov Yu.E. Formation of the Root Systems of Pine Plantations on Drained Peat Soils. *Lesnoye khozyastvo*, 1997, no. 4, pp. 39–40].
8. Вомперский С.Э. Биологические основы эффективности лесосушения. М.: Наука, 1968. 312 с. [Vomperskiy S.E. *Biological Basis for Forest Drainage Efficiency*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 312 p.].
9. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу / отв. ред. А.Т. Мошкалев. Л.: ЛТА, 1984. 320 с. [*Forest Inventory Book for the North-West*. Editor-in-Chief A.T. Moshkalev. Leningrad, LTA Publ., 1984. 320 p.].
10. Лопатин В.Д. Гладкое болото (торфяная залежь и болотные фации). Очерки по растительному покрову СССР // Учен. зап. ЛТУ. 1954. № 166. Сер.: Геогр. науки. Вып. 9. С. 95–181. [Lopatin V.D. Gladkoye Boloto (Peat Deposit and Swamp Facies). *Essays on the Vegetation of the USSR*. *Uchenyye zapiski LTU*, 1954, no. 166, Seriya: Geograficheskoye nauki, iss. 9, pp. 95–181].

11. Мoiseев В.С. Таксация молодняков. Л.: ЛТА, 1971. 344 с. [Moiseev V.S. *Inventory of Young Growth*. Leningrad, LTA Publ., 1971. 344 p.]
12. Пахучий В.В. Водный режим в хвойных древостоях на староосушенных торфяниках. Л.: Наука, 1975. 72 с. [Pakhuchiy V.V. *Soil Water Retention in Coniferous Stands on Old Drained Peatlands*. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 72 p.]
13. Сибирева М.Д., Вернандер Т.Б. Определение типов леса по растениям-индикаторам. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957. 148 с. [Sibireva M.D., Vernander T.B. *Determination of Forest Types by Guide Plants*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1957. 148 p.]
14. Цепляев В.П. Леса СССР. М.: Сельхозгиз, 1961. 465 с. [Tseplyayev V.P. *Forests of the USSR*. Moscow, Sel'khokhiz Publ., 1961. 465 p.]
15. Cline R.A., Ericson A.C. The Effect of Oxygen Diffusion Rate and Applied Fertilizer on the Growth, Yield, and Chemical Composition of Peats. *Soil Science Society of America Journal*, 1959, vol. 23, iss. 5, pp. 333–335. DOI: [10.2136/sssaj1959.03615995002300050009x](https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300050009x)
16. Heikurainen L. The Influence of Forest Drainage on Growth and Removal in Finland. *Acta Forestalia Fennica*, 1961, vol. 71, no. 8, art. 7117. DOI: [10.14214/aff.7117](https://doi.org/10.14214/aff.7117)
17. Jenny H., Gessel S.P., Bingham F.T. Comparative Study of Decomposition Rates of Organic Matter in Temperate and Tropical Regions. *Soil Science*, 1949, vol. 68, iss. 6, pp. 419–432.
18. Kramer P.J., Jackson W.L. Causes of Injury to Flooded Tobacco Plants. *Plant Physiology*, 1954, vol. 29, iss. 3, pp. 241–245. DOI: [10.1104/pp.29.3.241](https://doi.org/10.1104/pp.29.3.241)
19. Meshechok B. From Experiments with Deforestation on Plantland in Norway. *Transactions of the 2nd International Peat Congress, Leningrad, August 15–22, 1963*. Edinburgh, HMSO, 1968. 1089 p.
20. Paavilainen E., Päivänen J. *Peatland Forestry*. Berlin, Springer, 1995. 250 p. DOI: [10.1007/978-3-662-03125-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03125-4)
21. Salitis P. *Merkopilas prieksnosa cijumi*. Riga, 2006. 217 p.
22. Seppälä K. Relationship between Stem Diameter of Trees at Time of Draining and Their Post-Drainage Increment. *Suo*, 1976, vol. 27, no. 3, pp. 55–60.

FORMATION AND DYNAMICS OF THE BIOTOPE OF PINE PLANTATIONS ON PEAT SOILS AFTER IRRIGATION IMPROVEMENT

B.V. Babikov, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAM-9500-2020](https://orcid.org/0000-0003-3280-572X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3280-572X>

M.B. Subota, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAM-9484-2020](https://orcid.org/0000-0003-3721-8604),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3721-8604>

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: subota_m@mail.ru, babikov_boris32@mail.ru

Wetlands in the Russian Forest Fund occupy more than 12 % of the country's territory exceeding 100 mln ha. These are primarily afforested swamps with low-quality forest stands. A significant part of raised bogs is generally forestless. Meanwhile, about 60 % of the eutrophic and mesotrophic swamps are potentially rich. Here, only excess of water interferes with successful forest growth. The world forestry has accumulated wide experience in regulation of soil water retention through irrigation improvement and drainage. In Russia there are classic examples when stands of the 1st quality class grew in the large (several thousands of hectares) areas after irrigation improvement. One such case is the Kheynovskoye swamp with an area of over 2 ths. ha located in the Lisino training and experimental forest of the Saint-Petersburg State Forest Technical University and drained in 1847. However,

there are enough cases of unsuccessful drainage. The better half of the drained swamps before drainage were grown over with forests. Irrigation improvement has turned around the growth conditions of all stands existed before drainage, but in poor eutrophic swamps forest growth is insufficient. The research purpose was to study brand new stands in the drained territory taking into account the whole formation cycle of the biotope and its change with time. In order to get that done, a pilot plot was laid out on a eutrophic-mesotrophic treeless peat, where drainage was carried out using a frequent network of small grooves (furrows). They were dug with the help of a double moldboard (trench digger) and directed into the channels of the drainage network, thus providing for constant water drainage. Forest plantations were laid out on the layers formed along the furrows with the participation of the author. We had been assessing changes in the stand condition each 5–10 years for almost 60 years. The studies have shown that in the first years after removal of excess water and better soil warming, sedimentation and depletion of peat occurred. At a depth of 0.4–0.5 m in 20 years after planting the trees, the depth of peat decreased by almost 2 times. The living ground cover has changed under the influence of drainage and the developed stand. The initial (swamp) type of soil formation was replaced with soddy soil. High-quality heavy-producing plantation was formed. When comparing the parameters of the created artificial plantation with the stands of natural origin according to the growth course tables, it was found that the stock of the created stands at the age of 50 is almost twice higher than the stock of natural stands. It can be assumed that when growing wood pulp for its intended purposes in 100 years two yields can be harvested. Changes in peat soil have taken place during the last 50 years. The carbon (C) content decreased and the total nitrogen (N) content increased due to the intensive decomposition of peat, as evidenced by the decrease in the ratio of C:N. Structure developed in peat soil. The beginning of podzol-forming is noticed. Probably, the actual and hydrolytic acidity have increased due to the needle litter.

For citation: Babikov B.V., Subota M.B. Formation and Dynamics of the Biotope of Pine Plantations on Peat Soils after Irrigation Improvement. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 27–39. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-27-39

Keywords: biotope, irrigation improvement, water balance, water supply, drainage rate.

Поступила 25.06.19 / Received on June 25, 2019

УДК 634*73

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-40-52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТЬЕВ И ПЛОДОВ ГОЛУБИКИ

Е.А. Флюрик, канд. биол. наук, доц.; Research rID: [P-2621-2019](https://orcid.org/0000-0001-9598-7693),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9598-7693>

Н.В. Бушкевич, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1199-0903>

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13а, Минск, Республика Беларусь, 220006; e-mail: FlurikE@mail.ru, nadya-valoven@mail.ru

В настоящее время брусника, клюква и голубика (род *Vaccinium*) широко культивируются в целях получения плодов. В Республике Беларусь в естественных условиях можно встретить голубику топяную (*Vaccinium uliginosum* L.), в культуре наиболее широко представлены сорта голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) и узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.). Голубика богата биологически активными веществами (органическими кислотами, антоцианами, пектиновыми и дубильными веществами). Ее листья и плоды являются перспективным растительным сырьем для пищевой, косметической и фармацевтической промышленности. Его можно использовать для получения фиточаев, соков, джемов, варений, шампуней, кремов, настоев, экстрактов и др. Для более эффективного процесса экстрагирования листьев и плодов голубики, а также для нормирования качества экстрактов необходимо знать основные технологические свойства сырья. В ходе исследования установлены следующие технологические показатели листьев различных сортов голубики узколистной: насыпная масса – для $(0,08 \pm 0,001) \dots (0,13 \pm 0,001)$ г/см³; удельная масса – $(1,20 \pm 0,003) \dots (2,10 \pm 0,001)$ г/см³; объемная масса – $(0,09 \pm 0,001) \dots (0,14 \pm 0,003)$ г/см³; порозность – $(0,04 \pm 0,001) \dots (0,06 \pm 0,002)$; свободный объем слоя – $(0,89 \pm 0,001) \dots (0,95 \pm 0,001)$; коэффициент поглощения для воды и 30, 50, 70 и 96 %-го этанола – соответственно $(4,99 \pm 0,10) \dots (6,09 \pm 0,10)$, $(4,50 \pm 0,10) \dots (5,49 \pm 0,01)$, $(4,25 \pm 0,05) \dots (5,03 \pm 0,05)$, $(3,74 \pm 0,16) \dots (4,74 \pm 0,19)$, $(2,75 \pm 0,15) \dots (3,49 \pm 0,09)$ см³/г; для плодов: насыпная масса – $(0,57 \pm 0,001) \dots (0,69 \pm 0,001)$ г/см³; удельная масса – $(1,32 \pm 0,059) \dots (1,48 \pm 0,040)$ г/см³; объемная масса – $(0,59 \pm 0,001) \dots (0,70 \pm 0,001)$ г/см³; порозность – $(0,02 \pm 0,001) \dots (0,03 \pm 0,001)$; свободный объем слоя – $(0,48 \pm 0,01) \dots (0,59 \pm 0,001)$; коэффициент поглощения для воды и 30, 50, 70 и 96 %-го этанола – соответственно $(4,06 \pm 0,16) \dots (4,52 \pm 0,17)$, $(3,38 \pm 0,05) \dots (4,06 \pm 0,02)$, $(3,36 \pm 0,03) \dots (3,94 \pm 0,08)$, $(2,86 \pm 0,09) \dots (3,74 \pm 0,07)$, $(0,94 \pm 0,04) \dots (1,04 \pm 0,01)$ см³/г. Полученные данные позволяют спрогнозировать оптимальный способ и условия экстрагирования биологически активных веществ из листьев и плодов голубики, могут быть использованы при разработке технологической документации, регламентирующей процесс производства и качество готового продукта, а также при расчете материального баланса процесса для обеспечения надлежащего уровня рентабельности производства.

Для цитирования: Флюрик Е.А., Бушкевич Н.В. Определение технологических свойств листьев и плодов голубики // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 40–52. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-40-52

Благодарность. Авторы благодарны канд. биол. наук, ст. преподавателю кафедры туризма, природопользования и охотоведения БГТУ Д.В. Гордею за оказанную помощь в сборе образцов.

Ключевые слова: технологические свойства сорта, плоды и листья голубики узколистной, «Половчанка», «Мотего», «Янка», гибрид «Форма 24».

Введение

Республика Беларусь обладает большими ресурсами природного растительного сырья. Поиск растений с хорошей сырьевой базой, которые богаты биологически активными веществами (БАВ) и перспективны для разработки новых лекарственных средств, является актуальнейшей задачей фармакологии [13]. Решение данной задачи позволит создать отечественные препараты растительного происхождения. Применение лекарственных средств на основе растительного сырья имеет ряд преимуществ: меньше побочных эффектов, возможность длительного использования, низкая цена по сравнению с синтетическими аналогами.

Важнейшие лекарственные средства, получаемые из растений, подробно охарактеризованы и собраны в Государственный реестр лекарственных средств Республики Беларусь, разрешенных для применения в медицинской практике и к промышленному производству (периодически переиздается), и в Государственную фармакопею Республики. Однако не все лекарственные растения, которые непосредственно или в виде разных препаратов продаются в аптеках, описаны в Государственной фармакопее. В нее включены наиболее важные, часто применяемые растения или получаемые из них препараты.

Например, голубика (*Vaccinium*) относится к широко и традиционно используемым растениям, однако в фармакопею не включена. Она содержит следующий комплекс БАВ [6, 7, 9, 12, 21]: витамины С (38,40 мг%), (0,025 мг%), В₂ (0,023 мг%), В₆ (0,035 мг%), А (0,045 мг%), Р (5,15 мг%); антоцианы (18,1...78,2 мг %); до 2,7 % органических кислот; 0,6...1,0 % белка; до 0,6 % пектиновых веществ; до 1,6 % клетчатки; токоферолы (1,14 мг %); жирные кислоты (линолевая (омега-6), докозагексаеновая, альфа-линоленовая (омега-3)). Кроме того, обнаружены макроэлементы [7], мг/100 г: калий (64,20), кальций (18,33), магний (9,62), сера (11,27), фосфор (7,24), а также микроэлементы: железо (180,3 мг/кг), медь, цинк, марганец и др.

Проанализировав качественный и количественный состав комплекса БАВ, можно с уверенностью утверждать, что данное растение является перспективным сырьем для производства лекарственных средств. Голубика – ценный растительный ресурс, который издавна люди использовали не только в качестве пищевого ресурса для производства конфет, пастилы, киселей, чаев и др. [27], а также ликероводочных изделий [7], но и для лечения желудочно-кишечного тракта, диареи, как жаропонижающее средство, для профилактики заболеваний кровеносной и нервной систем [7, 9, 23, 25, 30]. Кроме того, установлено, что плоды голубики помогают защитить организм от радиоактивного воздействия, выводят токсины и шлаки, соли тяжелых металлов [7, 20, 21, 28, 29]. В настоящее время ее широко применяют, например, в косметической продукции (в различных кремах, тониках, шампунях и др.) [15, 17] и в виде посадок при рекультивации почв [8, 10]. Научная медицина также проявляет интерес к плодам голубики, как к источнику комплекса БАВ, обладающему широким спектром лечебно-профилактических свойств. Высокое содержание БАВ обуславливает антиоксидантное, антидиабетическое, противовоспалительное, антивирусное, противогрибковое, общеукрепляющее, жаропонижающее, вазопротекторное действия, улучшает реологические свойства крови, способствует укреплению стенки кровеносных сосудов, а также ингибирует рост опухолей [12, 18, 21, 24, 26]. Многолетние исследования [2, 3, 19], которые проводились на базе Центрального ботанического сада Национальной акаде-

мии наук Республики Беларусь (ЦБС НАН РБ) доказали эффективность выращивания в Беларуси голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.), а также показали безусловное превосходство этого вида перед аборигенным видом – голубикой топяной (*Vaccinium uliginosum*).

Однако в настоящее время установлено, что голубика узколистная (*Vaccinium angustifolium* Ait.) имеет ряд преимуществ по сравнению с голубикой высокорослой: менее теплолюбива и более зимостойка, произрастает на кислых почвах (рН изменяется от 2,7 до 5,2), обладает высокой устойчивостью к болезням, раннеспелая [10, 22].

Голубика узколистная – листопадный кустарничек с белыми или розовыми цветками, кисловато-сладкими синими небольшими ягодами. Корневая система мочковатого типа уходит на глубину до 0,5 м. Корни не имеют корневых волосков, но обильно снабжены микоризой [3]. Характерная особенность этого вида – наличие подземных побегов (корневищ, из почек которых формируются парциальные кусты). В естественных условиях размножается вегетативно и семенами. В настоящее время в Государственный реестр сортов Республики Беларусь включены 3 сорта голубики узколистной: «Мотего», «Половчанка», «Янка».

Ранее потенциал этого растения и его природные запасы использовались недостаточно, однако в 2018 г. в средствах массовой информации появились данные о том, что ЦБС НАН РБ планирует заложить плантацию голубики с последующей постройкой завода по переработке растительного сырья и производству пастилы для удовлетворения спроса не только местного рынка, но и в экспортных целях. Таким образом, потенциальные объемы возможных заготовок позволяют ее классифицировать как промышленное сырье.

При разработке новых лекарственных средств на основе растительного сырья (плодов и листьев голубики) обязательно необходимо учитывать его технологические свойства, так как это позволит наиболее полно извлечь [16] и обосновать оптимальный способ экстракции целевой группы БАВ.

Цель данного исследования – определение технологических свойств сырья разных сортов голубики узколистной.

Объекты и методы исследования

Изучение технологических свойств плодов и листьев голубики проводили на базе кафедры биотехнологии УО «Белорусский государственный технологический университет» (г. Минск, Республика Беларусь).

Для экспериментов использовали плоды и листья голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) сортов «Янка» (форма 20), «Половчанка» (форма 22), «Мотего» (форма 4), а также гибрид высокорослой и узколистной голубики «Форма 24», которые культивируются во всех областях страны. Образцы были собраны в июле 2018 г. в Витебской области (Шарковщинский район, ГЛХУ «Поставский лесхоз») (рис. 1).

Собранные листья и плоды голубики сушили методом естественной воздушно-теневого сушки, сухое сырье измельчали с помощью кофемолки ВА-400 (ГК «Дельта», Российская Федерация).

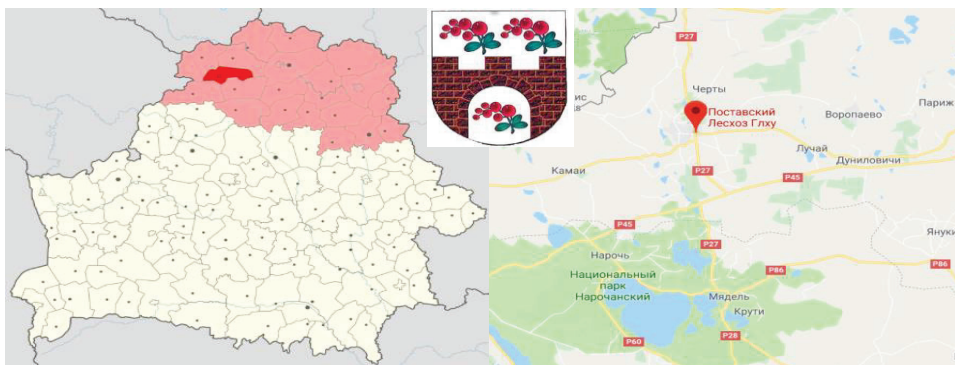


Рис. 1. Карта мест отбора исследуемых образцов

Fig. 1. Map of the sampling area

В ходе исследования использовали фармакопейные и нефармакопейные методы. Определяли следующие технологические свойства растительного сырья: измельченность, удельную, объемную и насыпную массу, порозность, свободный объем слоя сырья, коэффициент поглощения экстрагента (воды и спирта), пористость, влажность.

Методика определения размеров частиц растительного сырья (измельченность). Измельченность растительного сырья характеризуется размером и степенью разрушения тканей. Средний размер частиц (листьев голубики) определяли ситовым методом, рассчитывая средневзвешенный диаметр частиц (d , мм) по формуле

$$d = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{\sqrt{d_1 d_2}}},$$

где x_i – массовый выход частиц узкой фракции, доля; d_1 и d_2 – размеры отверстий проходного и непроходного сит, мм [11].

Для оценки размеров частиц измельченных плодов голубики использовали полуавтоматический метод компьютерной программы анализатора изображений AutoScan Colonies (Bioscan) (ЗАО «Спектроскопические системы», Республика Беларусь), с помощью которой производили первичную статистическую обработку и получали автоотчет о размерах частиц сырья. Сырье измельчалось достаточно равномерно, основная его часть (90 %) имела размер частиц 0,3...0,5 мм (плоды) и 3,0...5,0 мм (листья).

Методика определения удельной массы. Удельная масса – отношение массы абс. сухого измельченного растительного сырья к его объему.

Предварительно определяли массу пикнометра с водой, затем массу пикнометра с измельченным сырьем и водой. Для этого около 5,0 г (точная навеска до $\pm 0,001$ г) сырья помещали в пикнометр вместимостью 100 см³, на 2/3 объема заливали очищенной водой и выдерживали на кипящей водяной бане в течение 1,5...2,0 ч, периодически перемешивая для удаления воздуха из сырья. После этого пикнометр охлаждали до температуры 20 °С, доводили объем до метки очищенной водой.

Удельную массу сырья (d_y , г/см³) рассчитывали по следующей формуле:

$$d_y = \frac{P d_{ж}}{P + G - F},$$

где P – масса измельченного абс. сухого сырья, г; $d_{\text{ж}}$ – удельная масса воды, $d_{\text{ж}} = 0,9982 \text{ г/см}^3$ [1, 14]; G – масса пикнометра с водой, г; F – масса пикнометра с водой и сырьем, г.

Методика определения объемной массы. Объемная масса представляет собой отношение измельченного сырья при естественной влажности к его полному объему, который включает поры, трещины и капилляры, заполненные воздухом.

Около 10,0 г (точная навеска до $\pm 0,001$ г) измельченного сырья помещали в мерный цилиндр с очищенной водой и определяли объем. По разности объемов в мерном цилиндре устанавливали объем, который занимает сырье.

Объемную массу сырья (d_o , г/см³) вычисляли как

$$d_o = \frac{P_o}{V_o},$$

где P_o – масса измельченного сырья при естественной влажности, г; V_o – объем, который занимает сырье, см³ [1, 14].

Методика определения насыпной массы. Насыпную массу устанавливали как отношение массы измельченного растительного сырья при естественной влажности к занимаемому сырьем объему, который включает поры частиц и пустоты между ними. В мерный цилиндр помещали измельченное сырье, определяли полный объем, который оно занимает. Насыпную массу (d_n , г/см³) – рассчитывали по следующей формуле:

$$d_n = \frac{P_n}{V_n},$$

где P_n – масса измельченного сырья при естественной влажности, г; V_n – объем, который занимает сырье, см³ [1, 14].

Методика определения порозности. Порозность слоя $\Pi_{\text{ш}}$, которая характеризует величину полостей между частицами растительного сырья, находили как отношение разницы между объемной и насыпной массами к объемной массе:

$$\Pi_{\text{ш}} = \frac{d_o - d_n}{d_o},$$

где d_o – объемная масса сырья, г/см³ [1, 14].

Методика определения свободного объема слоя сырья. Свободный объем слоя, характеризующий относительный объем пустот (полостей внутри частиц и между ними) в единице слоя сырья, определяли как отношение разницы удельной массы и насыпной массы к удельной массе. Свободный объем слоя (V , г/см³) рассчитывали по формуле:

$$V = \frac{d_y - d_n}{d_y},$$

где d_y – удельная масса сырья, г/см³ [1, 14].

Методика определения коэффициента поглощения экстрагента. Коэффициент поглощения экстрагента – это количество растворителя, который заполняет межклеточные поры, вакуоли, воздушные полости в сырье и не извлекается из шрота.

Около 5,0 г измельченного сырья, взвешенного с точностью до $\pm 0,01$ г, помещали в мерный цилиндр, заливали экстрагентом (вода и 30, 50, 70 и 96 %-й этанол) таким образом, чтобы сырье было покрыто полностью, и оставляли на несколько часов. Затем сырье фильтровали через бумажный фильтр. Фильтрат помещали в другой мерный цилиндр и фиксировали его объем.

Коэффициент поглощения экстрагента (X , см³/г) рассчитывали по следующей формуле:

$$X = \frac{V - V_1}{P},$$

где V – объем экстрагента, см³; V_1 – объем экстрагента, обогащенного растворимыми веществами, полученный после завершения экстракции, см³; P – масса измельченного абсолютно сухого сырья, г [1, 14].

Методика определения пористости слоя. Пористость сырья – это величина пустот внутри растительной ткани. Чем она выше, тем больше образуется внутреннего сока при набухании.

Пористость слоя (ε) вычисляли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{V_c - V_m}{V_c},$$

где V_c – объем слоя, дм³; V_m – объем, занятый частицами сырья, дм³ [11].

Методика определения влажности. Влажность устанавливали по ГОСТ 24027.2–80 «Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла».

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 приведены фотографии исследуемых образцов растительного сырья.

Необходимо отметить, что все исследуемые сорта голубики узколистной не существенно отличаются друг от друга размером и формой плодов и листьев, однако имеются различия в расположении плодов на ветках и форме кустов. «Форма 24», являясь гибридом, существенно отличается от сортов голубики узколистной.



a



Форма 20



б



Форма 4



в



Форма 22



г

Рис. 2. Ветка с плодами, плоды и куст голубики: а – гибрид «Форма 24»;
б – сорт «Янка»; в – сорт «Мотеги»; г – сорт «Половчанка»

Fig. 2. Branch with fruits, fruits and a blueberry bush: а – hybrid Form 24;
б – sort Yanka; в – sort Motego; г – sort Polovchanka

Для определения технологических свойств сырья голубики эксперименты проводили в 3 повторностях, результаты статистически обрабатывали с помощью пакета программы Excel (табл. 1).

Таблица 1

Технологические свойства сырья голубики

Свойство	Сорт			Гибрид «Форма 24»
	«Янка»	«Мотего»	«Половчанка»	
Влажность, %:				
листья	10,5±0,5			
плоды	11,4±0,5			
Измельченность, мм:				
листья	3,0...5,0			
плоды	0,3...0,5			
Удельная масса, г/см ³ :				
листья	2,095±0,001	1,238±0,009	1,689±0,008	1,203±0,003
плоды	1,484±0,040	1,316±0,059	1,396±0,011	*
Насыпная масса, г/см ³ :				
листья	0,103±0,001	0,090±0,001	0,083±0,001	0,133±0,001
плоды	0,664±0,008	0,687±0,001	0,575±0,001	*
Свободный объем слоя, г/см ³ :				
листья	0,951±0,001	0,928±0,001	0,951±0,001	0,889±0,001
плоды	0,552±0,003	0,478±0,010	0,588±0,001	*
Объемная масса, г/см ³ :				
листья	0,111±0,001	0,097±0,002	0,088±0,001	0,144±0,003
плоды	0,686±0,001	0,703±0,001	0,585±0,001	*
Порозность:				
листья	0,056±0,002	0,047±0,002	0,040±0,001	0,059±0,002
плоды	0,029±0,001	0,025±0,001	0,018±0,001	*
Пористость:				
листья	0,948±0,034	0,924±0,036	0,949±0,031	0,882±0,033
плоды	0,539±0,001	0,465±0,001	0,578±0,001	*

*Отсутствовали плоды в год сбора образцов.

В табл. 2 отражены результаты определения коэффициента поглощения экстрагента.

Таблица 2

Коэффициент поглощения экстрагентов (см³/г)

Сорт, гибрид	Вода	Этанол			
		30 %-й	50 %-й	70 %-й	96 %-й
«Янка»:					
листья	5,25±0,13	5,15±0,06	4,99±0,11	4,74±0,19	2,99±0,10
плоды	4,06±0,16	3,38±0,05	3,37±0,13	2,86±0,09	0,98±0,01
«Мотего»:					
листья	5,74±0,05	5,49±0,01	4,49±0,01	4,25±0,05	3,49±0,09
плоды	4,52±0,17	4,06±0,02	3,94±0,08	3,02±0,11	0,94±0,04
«Половчанка»:					
листья	6,09±0,10	5,24±0,25	5,03±0,05	4,60±0,10	2,75±0,15
плоды	4,07±0,03	3,78±0,06	3,36±0,03	3,47±0,07	1,04±0,01
«Форма 24» (листья)	4,99±0,10	4,50±0,10	4,25±0,05	3,74±0,16	3,24±0,05

Из данных, представленных в табл. 1 и 2, видно, что значения некоторых технологических свойств в зависимости от исследуемого образца голубики различаются довольно значительно, что в масштабах промышленного производства может существенно сказаться на себестоимости получаемого продукта (например, коэффициент поглощения экстрагента может отличаться до 1,2 раза). Другие показатели (например, порозность) отличаются несущественно.

Сопоставив полученные нами ранее результаты по определению содержания некоторых БАВ в исследуемых образцах голубики [4, 5] с представленными в данной статье, можно констатировать, что наиболее перспективными для получения различных продуктов на основе растительного сырья являются сорт «Мотего» и гибрид «Форма 24».

Таким образом, полученные нами результаты дополнили проводимые на кафедре исследования, направленные на разработку новых БАД на основе растительного сырья.

Заключение

Для разработки оптимальной технологии получения настоев и экстрактов из различных сортов голубики узколистной определены следующие технологические свойства сырья:

для листьев: насыпная масса – $(0,08 \pm 0,001) \dots (0,13 \pm 0,001)$ г/см³; удельная масса – $(1,20 \pm 0,003) \dots (2,10 \pm 0,001)$ г/см³; объемная масса – $(0,09 \pm 0,001) \dots (0,14 \pm 0,003)$ г/см³; порозность – $(0,04 \pm 0,001) \dots (0,06 \pm 0,002)$; свободный объем слоя – $(0,89 \pm 0,001) \dots (0,95 \pm 0,001)$; коэффициент поглощения для воды и 30, 50, 70 и 96 %-го этанола – соответственно $(4,99 \pm 0,10) \dots (6,09 \pm 0,10)$, $(4,50 \pm 0,10) \dots (5,49 \pm 0,01)$, $(4,25 \pm 0,05) \dots (5,03 \pm 0,05)$, $(3,74 \pm 0,16) \dots (4,74 \pm 0,19)$, $(2,75 \pm 0,15) \dots (3,49 \pm 0,09)$ см³/г;

для плодов: насыпная масса – $(0,57 \pm 0,001) \dots (0,69 \pm 0,001)$ г/см³; удельная масса – $(1,32 \pm 0,059) \dots (1,48 \pm 0,040)$ г/см³; объемная масса – $(0,59 \pm 0,001) \dots (0,70 \pm 0,001)$ г/см³; порозность – $(0,02 \pm 0,001) \dots (0,03 \pm 0,001)$; свободный объем слоя – $(0,48 \pm 0,01) \dots (0,59 \pm 0,001)$; коэффициент поглощения для воды и 30, 50, 70 и 96 %-го этанола – соответственно $(4,06 \pm 0,16) \dots (4,52 \pm 0,17)$, $(3,38 \pm 0,05) \dots (4,06 \pm 0,02)$, $(3,36 \pm 0,03) \dots (3,94 \pm 0,08)$, $(2,86 \pm 0,09) \dots (3,74 \pm 0,07)$, $(0,94 \pm 0,04) \dots (1,04 \pm 0,01)$ см³/г.

Полученные в ходе исследования результаты будут использованы при разработке технологии производства настоев и экстрактов из плодов и листьев голубики сорта «Мотего» и гибрида «Форма 24», а также могут быть использованы при разработке проекта фармакопейной статьи на плоды и листья голубики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бекболатова Э.Н., Сакипова З.Б., Кабденова А.Т., Ибрагимова Л.Н., Маликова Н.Т. Изучение технологических параметров сырья боярышника алматинского (*Crataegus almaatensis* pojark) // Вестн. Казах. нац. мед. ун-та. 2017. № 1. С. 418–421. [Bekbolatova E.N., Sakipova Z.B., Kbadanova A.T., Ibragimova L.N., Malikova N.T. The Study of the Technological Parameters of Herbal Substance *Crataegus almaatensis* Pojark. *Vestnik KazNMU*, 2017, no. 1, pp. 418–421].

2. Бордок И.В., Моисеева Т.Р., Маховик И.В., Волкова Н.В. Практика создания плантаций голубики высокорослой лесохозяйственными учреждениями (на примере ГЛХУ «Милошевичский лесхоз») // Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана. Пинск: Полес. гос. ун-т, 2015. С. 58–60. [Bordok I.V., Moiseeva T.R., Makhovik I.V., Volkova N.V. The Practice of Creating Blueberry Plantations of Tall Forestry Institutions (On the Example of the State Forestry Institution “Milosevic Forestry”). *Natural Resources of Polesye: Assessment, Use, Protection*. Pinsk, PolesSU Publ., 2015, pp. 58–60].

3. Булавко Г.И., Яковлев А.П. Развитие микоризного симбиоза на корнях голубики при культивировании на нарушенных участках торфяных месторождений // Опыт и перспективы возделывания голубики на территории Беларуси и сопредельных стран. Пинск: Полес. гос. ун-т, 2014. С. 22–28. [Bulavko G.I., Yakovlev A.P. Mycorrhiza Development on the Roots of Some Representatives of the Genus *Vaccinium* during Cultivation in the Fault Areas of Peatlands. *Experience and Prospects of Blueberry Cultivation in Belarus and Bordening Countries*. Pinsk, PolesSU Publ., 2014, pp. 22–28].

4. Бушкевич Н.В., Флюрик Е.А. Антоцианы листьев голубики // Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. «Биотехнология: взгляд в будущее». Ставрополь, 2019. С. 3–5. [Bushkevich N.V., Flyurik E.A. Anthocyanins of Blueberry Leaves. *Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference “Biotechnology: Looking forward”*. Stavropol, 2019, pp. 3–5].

5. Валовень Н.В., Флюрик Е.А. Анализ содержания аскорбиновой кислоты в различных сортах голубики // IV Междунар. науч.-практ. конф. «Биотехнология: взгляд в будущее». Ставрополь, 2018. С. 166–167. [Valoven' N.V., Flyurik E.A. Analysis of the Ascorbic Acid Content in Various Species of Blueberries. *Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference “Biotechnology: Looking forward”*. Stavropol, 2018, pp. 166–167].

6. Василевская Т.И., Рупасова Ж.А., Решетников В.Н. Формирование биохимического состава плодов видов семейства *Ericaceae* при интродукции в условиях Беларуси. Минск, 2011. 307 с. [Vasilevskaya T.I., Rupasova Zh.A., Reshetnikov V.N. *Formation of the Biochemical Composition of Fruits of the Ericaceae Species when Introduced in Belarus*. Minsk, 2011. 307 p.].

7. Величко Н.А., Берикашвили З.Н. Исследование химического состава ягод рецептур голубики обыкновенной и разработка напитков на ее основе // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 7. С. 126–131. [Velichko N.A., Berikashvili Z.N. The Study of the Chemical Composition of Berries of Blueberry and Common Development of Formulations of Drinks on Its Basis. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2016, no. 7, pp. 126–131].

8. Гордей Д.В. Культивирование голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) на выработанных площадях торфяных месторождений верхового типа при интродукции в Белорусском Поозерье: дис. ... канд. биол. наук. Минск, 2014. 192 с. [Gordey D.V. *Cultivation of Lowbush Blueberry (Vaccinium angustifolium Ait.) in the Depleted Areas of Upper Peat Deposits in Introduction in Belarusian Poozer'ye*: Cand. Biol. Sci. Diss. Minsk, 2014. 192 p.].

9. Ильин В.С. Шиповник, клюква и другие редкие культуры сада. Челябинск: ФГБНУ ЮУНИИСК, 2017. 318 с. [Il'in V.S. *Rosehip, Cranberry and Other Rare Garden Crops*. Chelyabinsk, FGBNU YuUNIISK Publ., 2017. 318 p.].

10. Макеев В.А., Тяк Г.В., Макеева Г.Ю. Опыт культивирования голубики узколистной на выработанных торфяниках Костромской области // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2017. № 2. С. 91–102. [Makeev V.A., Tyak G.V., Makeeva G.Yu. Experience Lowbush Blueberry Cultivation on Cutover Peatlands Kostroma Region. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2017, no. 2, pp. 91–102]. DOI: [10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.09](https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.09)

11. Минина С.А., Каухова И.Е. Химия и технология фитопрепаратов. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. 560 с. [Minina S.A., Kaukhova I.E. *Chemistry and Technology of Phytopreparations*. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2009. 560 p.].
12. Мухаметова С.В., Скочилова Е.А., Протасов Д.В. Параметры плодоношения и содержание флавоноидов и аскорбиновой кислоты в плодах голубики (*Vaccinium*) // Химия растит. сырья. 2017. № 3. С. 113–121. [Mukhametova S.V., Skochilova E.A., Protasov D.V. Fruiting Parameters and Content of Flavonoids and Ascorbic Acid in Blueberry (*Vaccinium*) Fruits. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2017, no. 3, pp. 113–121]. DOI: [10.14258/jcprm.2017031785](https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031785)
13. Полина С.А., Ефремов А.А. Состав антоцианов плодов черники обыкновенной, брусники обыкновенной и клюквы обыкновенной Красноярского края по данным ВЭЖХ // Химия растит. сырья. 2014. № 2. С. 103–110. [Polina S.A., Efremov A.A. Determination Composition of Anthocyanins in Bilberry, Cowberry and Cranberry with HPLC. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2014, no. 2, pp. 103–110]. DOI: [org/10.14258/jcprm.1402103](https://doi.org/10.14258/jcprm.1402103)
14. Суина И.О., Тернинко И.И. Изучение технологических параметров и числовых показателей качества сырья *Aristolochia clematidis* L. // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017. № 4(21). С. 202–205. [Suina I.O., Terninko I.I. Study of Technological Parameters and the Numerical Indicators of the Quality of Raw Materials *Aristolochia clematidis* L. *Razrabotka i registraciâ lekarstvennyh sredstv* [Drug development & registration], 2017, no. 4(21), pp. 202–205].
15. Таланов А.А. Фармакогностическое изучение голубики болотной: *Vaccinium uliginosum* L.: дис. ... канд. фарм. наук. Пермь, 2013. 208 с. [Talanov A.A. *Pharmacognostic Study of Bog Blueberry: Vaccinium uliginosum* L.: Cand. Farm. Sci. Diss. Perm, 2013. 208 p.].
16. Федосеева Л.М. Изучение технологических свойств бурых листьев бадана толстолистного // Химия растит. сырья. 2000. № 1. С. 113–115. [Fedoseeva L.M. Studying the Technological Properties of Brown Leaves of Heart-Leaved Bergenia. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2000, no. 1, pp. 113–115].
17. Флюрик Е.А., Бондаренко Ж.В., Валовень Н.В. Получение настойки из ягод голубики высокорослой и исследование ее влияния на свойства косметической эмульсии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 160–171. [Flyurik E.A., Bondarenko Zh.V., Valoven' N.V. Tincture Preparation from Northern High Bush Blueberries and a Study of Their Influence on the Cosmetic Emulsion Properties. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 160–171]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.6.160](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.160), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/449/160_171.pdf
18. Ходаков И.В. Применение вина каберне-совиньон для определения идентификационных характеристик 3-О-гликозидов антоцианов при анализе состава антоцианов в пасте из ягод черники // Химия растит. сырья. 2014. № 2. С. 147–154. [Khodakov I.V. The Use of Wine Cabernet-Sauvignon for the Determination of Identification Parameters of Anthocyanidin 3-O-Glucosides in Analysis of Anthocyanin Composition in Bilberry Fruit Paste. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2014, no. 2, pp. 147–154]. DOI: [10.14258/jcprm.1402147](https://doi.org/10.14258/jcprm.1402147)
19. Центральный ботанический сад НАН Беларуси: сохранение, изучение и использование биоразнообразия мировой флоры / под ред. В.В. Титка, В.Н. Решетникова. Минск: Беларус. навука, 2012. 345 с. [*Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus: Conservation, Study and Use of Biodiversity of the World Flora*. Ed. by V.V. Titok, V.N. Reshetnikov. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 345 p.].
20. Bunea A., Rugină D., Sconța Z., Pop R.M., Pintea A., Socaciu C. et al. Anthocyanin Determination in Blueberry Extracts from Various Cultivars and Their Antiproliferative and Apoptotic Properties in B16-F10 Metastatic Murine Melanoma Cells. *Phytochemistry*, 2013, vol. 95, pp. 436–444. DOI: [10.1016/j.phytochem.2013.06.018](https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2013.06.018)

21. Daubaras R., Česonienė L., Kraujalyte V., Venskutonis P.R. Health Promoting Properties of *Vaccinium angustifolium* and *Vaccinium corymbosum*. *Planta Medica*, 2014, vol. 80(16), art. P2B79. DOI: [10.1055/s-0034-1394956](https://doi.org/10.1055/s-0034-1394956)
22. Drummond F. Reproductive Biology of Wild Blueberry (*Vaccinium angustifolium* Aiton). *Agriculture*, 2019, vol. 9, iss. 4, art. 69. DOI: [10.3390/agriculture9040069](https://doi.org/10.3390/agriculture9040069)
23. Moyer R.A., Hummer K.E., Finn C.E., Frei B., Wrolstad R.E. Anthocyanins, Phenolics, and Antioxidant Capacity in Diverse Small Fruits: *Vaccinium*, *Rubus*, and *Ribes*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, vol. 50, iss. 3, pp. 519–525. DOI: [10.1021/jf011062r](https://doi.org/10.1021/jf011062r)
24. Muceniece R., Klavins L., Kviesis J., Jekabsons K., Rembergs R., Saleniece K. et al. Antioxidative, Hypoglycaemic and Hepatoprotective Properties of Five *Vaccinium* spp. Berry Pomace Extracts. *Journal of Berry Research*, vol. 9, no. 2, pp. 267–282. DOI: [10.3233/JBR-180351](https://doi.org/10.3233/JBR-180351)
25. Routray W., Orsat V. Blueberries and Their Anthocyanins: Factors Affecting Biosynthesis and Properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2011, vol. 10, iss. 6, pp. 303–320. DOI: [10.1111/j.1541-4337.2011.00164.x](https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00164.x)
26. Song G.-Q., Hancock J.F. *Vaccinium*. *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources*. Ed. by C. Kole. Berlin, Springer, 2011, pp. 197–221. DOI: [10.1007/978-3-642-16057-8_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16057-8_10)
27. Šoukand R., Hrynevich Ya, Vasilyeva I., Prakofjewa J., Vnukovich Yu., Paciupa Ju. et al. Multi-Functionality of the Few: Current and Past Uses of Wild Plants for Food and Healing in Liubań Region, Belarus. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2017, vol. 13, art. 10. DOI: [10.1186/s13002-017-0139-x](https://doi.org/10.1186/s13002-017-0139-x)
28. Stevenson D., Scalzo J. Anthocyanin Composition and Content of Blueberries from Around the World. *Journal of Berry Research*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 179–189. DOI: [10.3233/JBR-2012-038](https://doi.org/10.3233/JBR-2012-038)
29. Teplova V.V., Isakova E.P., Klein O.I., Dergachova D.I., Gessler N.N., Deryabina Y.I. Natural Polyphenols: Biological Activity, Pharmacological Potential, Means of Metabolic Engineering (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 221–237. DOI: [10.1134/S0003683818030146](https://doi.org/10.1134/S0003683818030146)
30. Wang B.C., He R., Li Z.M. The Stability and Antioxidant Activity of Anthocyanins from Blueberry. *Food Technology and Biotechnology*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 42–49.

PERFORMANCE MEASUREMENT OF BLUEBERRY LEAVES AND FRUITS

E.A. Flyurik, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-2621-2019](https://orcid.org/0000-0001-9598-7693),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9598-7693>

N.V. Bushkevich, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1199-0903>

Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; e-mail: Flurike@mail.ru, nadya-valoven@mail.ru

The genus *Vaccinium* includes cowberries, cranberries and blueberries. Nowadays they are under large scale cultivation for the purposes of fruit production. In the Republic of Belarus bog blueberry (*Vaccinium uliginosum* L.) can be met *in situ*; among the cultivated plants the most prevalent varieties are highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) and lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.). Blueberry is rich in bioactive substances, such as organic acids, anthocyanins, pectin and tannins. The leaves and fruits of blueberries are a promising plant raw material for the food, cosmetic and pharmaceutical industries. It is useful for the production of herbal teas, juices, jams, preserves, shampoos, creams, infusions, extracts, etc. For the improved process of extracting leaves and fruits of blueberries, as well as quality estimation of extracts, it is necessary to know the basic technological properties of raw materials. During the study, the technological properties of various lowbush blueberry

species were found. The properties of leaves are the following: bulk density – from 0.08 ± 0.001 to 0.13 ± 0.001 g/cm³; unit weight – from 1.20 ± 0.003 to 2.10 ± 0.001 g/cm³; bulk weight – from 0.09 ± 0.001 to 0.14 ± 0.003 g/cm³; porosity – from 0.04 ± 0.001 to 0.06 ± 0.002 ; void cross-section – from 0.89 ± 0.001 to 0.95 ± 0.001 ; absorption coefficient for water – from 4.99 ± 0.10 to 6.09 ± 0.10 cm³/g, 30 % ethanol – from 4.50 ± 0.10 to 5.49 ± 0.01 cm³/g, 50 % ethanol – from 4.25 ± 0.05 to 5.03 ± 0.05 cm³/g, 70 % ethanol – from 3.74 ± 0.16 to 4.74 ± 0.19 cm³/g and 96 % ethanol – from 2.75 ± 0.15 to 3.49 ± 0.09 cm³/g. The properties of fruits are the following: bulk density – from 0.57 ± 0.001 to 0.69 ± 0.001 g/cm³; unit weight – from 1.32 ± 0.059 to 1.48 ± 0.040 g/cm³; bulk weight – from 0.59 ± 0.001 to 0.70 ± 0.001 g/cm³; porosity – from 0.02 ± 0.001 to 0.03 ± 0.001 ; void cross-section – from 0.48 ± 0.01 to 0.59 ± 0.001 ; absorption coefficient for water – from 4.06 ± 0.16 to 4.52 ± 0.17 cm³/g, 30 % ethanol – from 3.38 ± 0.05 to 4.06 ± 0.02 cm³/g, 50 % ethanol – from 3.36 ± 0.03 to 3.94 ± 0.08 cm³/g, 70 % ethanol – from 2.86 ± 0.09 to 3.74 ± 0.07 cm³/g and 96 % ethanol – from 0.94 ± 0.04 to 1.04 ± 0.01 cm³/g. The obtained data allow to predict the optimal method and conditions of bioactive substances extraction from blueberry leaves and fruit. The data can also be used in the development of technological documentation which regulates the production process and the quality of the final product, as well as in the calculation of the process mass balance to ensure the appropriate level of profitability.

For citation: Flyurik E.A., Bushkevich N.V. Performance Measurement of Blueberry Leaves and Fruits. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 40–52. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-40-52

Acknowledgements: The authors are grateful to candidate of biology, senior lecturer of the Department of Tourism, Nature Management and Game Management of the Belarusian State Technological University D.V. Gordey for the assistance in sampling.

Keywords: technological properties, fruits and leaves of lowbush blueberry, Polovchanka, Motego, Yanka, hybrid Form 24.

Поступила 24.08.19 / Received on August 24, 2019

УДК 630*181(182.5)

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-53-67

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ПО МАТЕРИАЛАМ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

С.К. Фарбер, д-р с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-3013>

Н.С. Кузьмик, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [V-6094-2019](https://orcid.org/0000-0003-4707-9011), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-9011>

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, д. 50/28, Академгородок, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru

Наглядность пространственного распределения влажности почв достигается посредством картографирования, которое наиболее просто осуществляется по данным цифровой модели. Информация о влажности почв хранится в поле атрибутивной таблицы слоя географической информационной системы, т. е. доступна для редактирования и последующего использования. Показано, что цифровую модель влажности можно получить посредством сопряженного анализа влажности почв с показателями рельефа (основа картографирования – цифровая модель рельефа) и ранжирования типов леса в порядке увеличения влажности почв (основа картографирования – векторный слой таксационных выделов). Результаты картографирования демонстрируются на примере 2 тестовых участков в горной и равнинной местностях. Картографирование влажности почв на основе данных цифровой модели рельефа выполнено для тестового участка, расположенного в Осевом Западно-Саянском округе горно-таежных лесов, где типы леса за счет пространственного сопряженного анализа распределены по показателям рельефа и ранжированы по влажности почв. Результат пространственного анализа цифровой модели рельефа – растр (цифровая модель влажности почв). Картографирование влажности почв по материалам лесоустройства выполнено для тестового участка, представляющего южно-таежные леса Приангарья. Здесь ранжирование влажности почв произведено на основе таксационных описаний выделов тестового участка. Из анализа исключены данные выделов, где произрастание древесных пород априори невозможно (заболоченные местоположения, реки и озера). В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется также относительно типа леса, как обобщенного качественного показателя лесорастительных условий. Вне зависимости от категории земель (насаждение, гарь, вырубка) каждый таксационный выдел получает дополнительный количественный показатель влажности почвы с последующей возможностью определения по уравнениям регрессии потенциальной продуктивности древесных пород. Установлено, что при наличии векторного слоя лесоустроительных данных картографирование влажности почв предпочтительнее производить на основе материалов лесоустройства. Показано, что существует зависимость продуктивности древостоев от влажности почв.

Для цитирования: Фарбер С.К., Кузьмик Н.С. Формирование цифровой модели влажности почв на основе показателей рельефа местности и по материалам лесоустройства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 53–67. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-53-67

Ключевые слова: влажность почв, рельеф местности, тип леса, класс бонитета, потенциальная продуктивность древостоев, картографирование влажности почв.

Введение

В сельскохозяйственном производстве влагообеспеченность почв контролируется при выполнении текущих мероприятий и прогнозировании урожайности посевов. Оценка осуществляется в порядке агрометеорологического мониторинга и основана на наблюдениях, проводимых на станциях Росгидромета. Практикуется также оценка с использованием средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при определении относительной влажности верхнего слоя почвы [3]. В основе дистанционных методов лежит применение излучения и отражения почвой электромагнитной радиации. На качество дистанционных оценок существенно влияет состояние атмосферы, растительный покров и др. Надежные результаты могут быть получены лишь при комплексном использовании дополняющих друг друга методов [9]. Сдерживают применение дистанционных методов низкое пространственное разрешение ДЗЗ и невозможность непосредственного снятия данных о влажности почв. Напротив, традиционные наземные измерения с помощью приборов обеспечивают высокую точность результатов, но неэффективны для больших площадей и труднодоступных территорий. Представляется, что более перспективна оценка влажности почв по ДЗЗ, поэтому соотношение между наземными и дистанционными методами должно смещаться в сторону последних. Однако полностью исключить наземные методы вряд ли возможно. Для методов ДДЗ, как минимум, требуется верификация, которая основана на использовании данных натурного обследования.

Для лесохозяйственного производства при выращивании высокопродуктивных насаждений влажность почв имеет первостепенное значение. Наряду с плодородием и теплообеспеченностью участка она является показателем лесорастительных условий, лимитирующим произрастание древесных пород. Относительная оценка влажности почв фигурирует в описании таксационного выдела, т. е. наряду с другими таксационными показателями выдела определяется в процессе массовой таксации. В классификации по типам условий произрастания (ТУМ) влажность почв используется в качестве входного показателя. Принято пять градаций гидротопов почв: 0 – очень сухие; 1 – сухие; 2 – свежие; 3 – влажные; 4 – сырые; 5 – болотистые. На эдафо-фитоценологических векторах типов леса В.Н. Сукачева также четко прослеживается изменение влажности почв.

Влажность лесных почв отслеживается методами, аналогичными методам для сельскохозяйственных почв, т. е. с помощью приборов наземного использования и ДЗЗ. Однако леса занимают значительно большие площади, поэтому ведение мониторинга в них наземными приборами еще более проблематично, а из-за маскирующего влияния лесного полога мониторинг на основе ДЗЗ менее точен, чем для открытых пространств сельскохозяйственных полей.

Кроме наземных и дистанционных методов существует возможность косвенной оценки влажности почв на основе известных характеристик экосистем, в том числе характеристик лесов и местоположений (рельефа местности). Сопряженность растительных сообществ с условиями среды выявляется за счет применения методов ординации, позволяющих упорядочивать объекты изучения вдоль каких-либо осей, определяющих варьирование характери-

стик растительного покрова [1, 13 и др.]. Фитоценозы по свойственным им признакам или экотопу размещают в системе координат [12]. Дальнейшее картографирование позволяет выявлять пространственно-географическую структуру, изучать взаимосвязи и взаимозависимости в объектах [2].

Вопросы генезиса почв, взаимосвязи его с показателями рельефа обсуждаются многими авторами [5, 8 и др.]. Проблема бонитировки лесных почв рассматривается в работах В.Д. Зеликова [6, 7 и др.]. Изучается связь таксационных показателей древостоев с условиями местопроизрастания, предлагается использование ландшафтного подхода [26, 35, 37]. Устанавливаются зависимости между классами бонитета, типами леса, ландшафтами и таксационными показателями насаждений [33, 36]. Современные методы обработки данных и картографирования предоставляют дополнительные возможности анализа [21–30, 32, 34 и др.].

Взаимосвязи типов растительного покрова с показателями климата обсуждаются в работах Н.П. Поликарпова и др. [11], В.А. Шкляева и др. [20], В.П. Седельникова и др. [14]. К сожалению, эмпирические данные о количестве влаги на тестовых участках, которые при этом относились бы к определенной форме рельефа и типу леса, отсутствуют.

Цель исследования – демонстрация возможности картографирования влажности почв на основе данных цифровой модели рельефа (ЦМР – SRTM) и описаний таксационных выделов, а также выявление зависимости продуктивности древостоев от влажности почв.

Объекты и методы исследования

Различают прямые и непрямые методы ординации. В настоящее время более популярны методы непрямого многомерного статистического анализа [10]. Метод прямого анализа применяется, когда четко выражен ведущий фактор, который несложно измерить. Из этого следует, что сам факт наличия для настоящей работы данных массовой таксации и данных ЦМР определяет выбор метода – прямая ординация.

Работа выполнена с использованием программных средств ArcGIS Spatial Analyst. Выявление аналитического вида уравнений регрессии произведено программными средствами Statistika.

Картографирование влажности почв на основе ЦМР. Тестовый участок расположен в горах Южной Сибири и занимает северо-восточную часть Осевого Западно-Саянского округа горно-таежных лесов (рис. 1). Территория отвечает требованиям однородности рельефа и природно-климатических показателей. Лесные сообщества тестового участка в закономерном порядке произрастают на местоположениях, к лесорастительным условиям которых они эволюционно приспособлены.

Для получения показателей рельефа использованы данные матрицы SRTM [31]. Основные показатели рельефа – абсолютная высота, экспозиция и уклон местности. Пространственный анализ ЦМР произведен средствами ГИС (использован модуль ArcGIS Spatial Analyst). Для индексации местоположений приняты следующие входы:

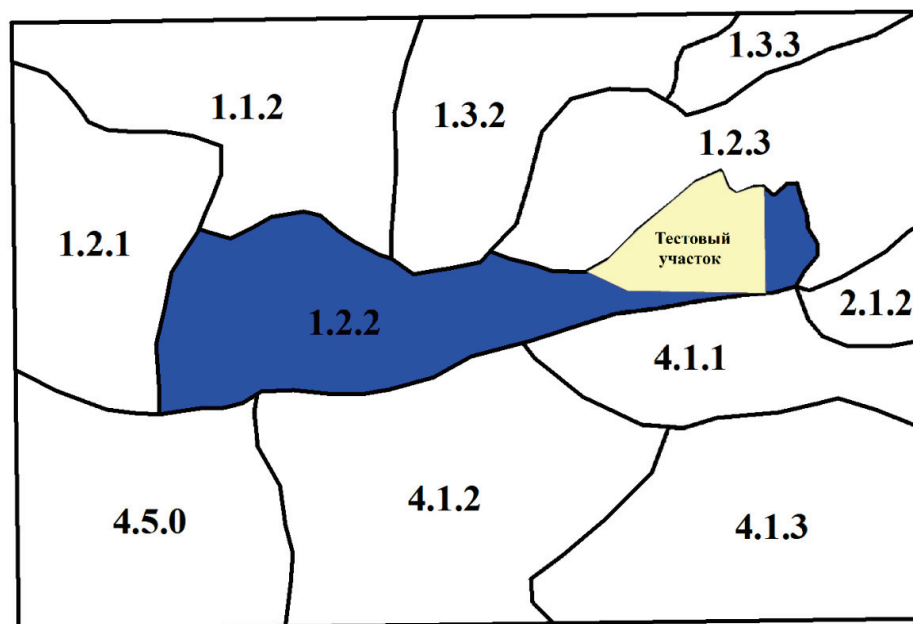


Рис. 1. Тестовый участок на фоне лесорастительного районирования гор Южной Сибири [15] (нумерация таксонов районирования сохранена; Осевой Западно-Саянский округ – 1.2.2)

Fig. 1. The test area against the background of forest site zoning of the Southern Siberia mountains [15] (numeration of zoning taxa is preserved; Axial Western Sayan district – 1.2.2)

абсолютные высоты (градация 100 м с образованием 12 высотных поясов);

склоны северной экспозиции (0...90, 270...360°);

склоны южной экспозиции (90...270°);

плоские местоположения (поймы водотоков и водоразделы);

склоны средней крутизны (3...20°);

крутые склоны (более 20°).

Первому высотному поясу отвечают высоты до 900 м, второму – 901...1000 м и т. д., последний (двенадцатый пояс) занимает высоты более 1901 м. Северная экспозиция обозначена 1, южная – 2. Уклоны менее 3° обозначены индексом 1, менее 20° – 2, более 20° – 3. Две градации экспозиции и три градации уклонов образуют 6 типов местоположений. Результатом пространственного анализа показателей рельефа является получение растровых поверхностей абсолютных высот, экспозиций и уклонов местности. За счет их комбинирования формируется общая растровая поверхность *Combine* (цифровая модель рельефа, объединяющая группы высот, экспозиций и уклонов). В атрибутивной таблице растра *Combine* создается поле ВЭУ (высота, экспозиция, уклон) со значениями индексов местоположений. Далее поле ВЭУ используется в качестве ключевого для связи с атрибутивной таблицей пространственного распределения влажности почв [17].

Для отдельных местоположений по значениям годового количества осадков производится расчет уравнений регрессии $ОСАДКИ = f(H)$, где $ОСАДКИ$ – годовое количество осадков, мм/год; H – абсолютная высота, м.

При статистически недостаточной корреляции между переменными количество осадков в качестве измерителя влаги использовать нельзя. Требуется другой показатель. Альтернативой может служить индекс влажности почв, который в экспертном порядке можно определить для каждого типа леса. Ранжирование типов леса от сухих местоположений к более влажным производится с учетом почвообразующей породы, названия почвы, перечня видов растительности. Порядковый номер в ранжированном ряду типов леса отождествляется с индексом влажности. Далее по местоположениям формируются уравнения регрессии $ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$, которые при наличии достоверной связи используются для расчета значений поля влажности в таблице *dBASE*. Создание растровой поверхности (цифровой модели влажности почв) представляет собой операцию соединения таблицы *dBASE* с атрибутивной таблицей раstra местоположений по ключевому полю ВЭУ [17]. Соответственно, цифровая модель влажности почв получается в виде раstra.

Картографирование влажности почв на основе данных описаний таксационных выделов. Тестовый участок расположен в Красноярском Приангарье (Эвенкийский автономный округ) на территории Терянского лесничества (Верхнетерянского участкового лесничества, квартала 1–53 и Кажимское участковое лесничество, квартала 93, 94, 118, 119) (рис. 2). Исходные материалы – данные массовой таксации (1765 описаний таксационных выделов).

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

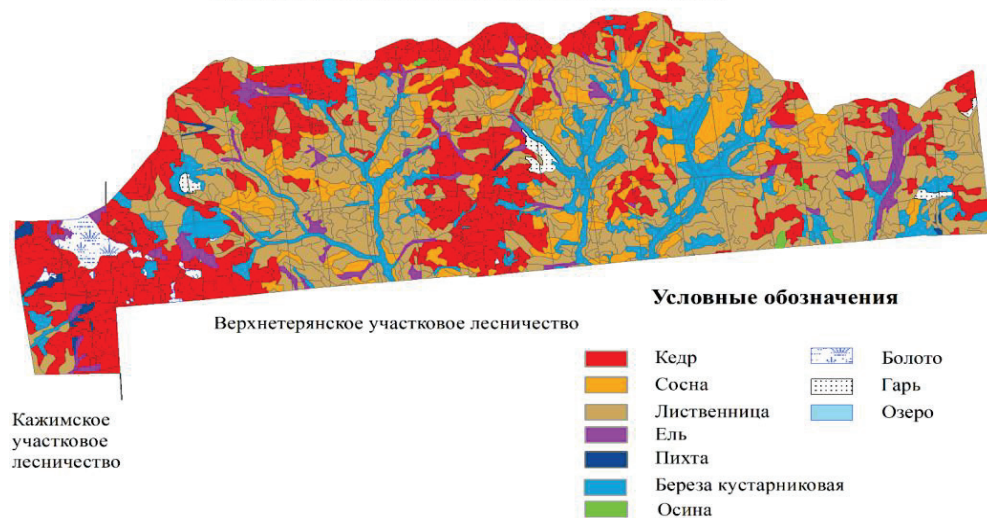


Рис. 2. Породный состав тестового участка южно-таежных лесов Красноярского Приангарья

Fig. 2. The species composition of the test area of the southern taiga forests of the Krasnoyarsk Angara region

Влажность почв определяется в экспертном порядке. По описанию лесотаксационных выделов производится их сопоставление по влажности с получением ранжированного (по степени влажности) ряда типов леса. Увеличение порядкового номера идет в ряду от сухих к более увлажненным местоположениям [18]. Оценка комплексная, принимается во внимание информация из таксационного описания насаждений и макета дополнительных сведений.

Оценка влажности почв требуется для всех лесотаксационных выделов, включая лиственные насаждения. Для выделов погибших насаждений влажность определяется в сравнении с насаждениями, занимающими аналогичные местоположения [16]. Далее влажность используется в качестве независимой переменной (например, в уравнениях продуктивности древесных пород). Индекс влажности вносится в отдельное поле атрибутивной таблицы таксационных выделов, что обеспечивает возможность последующего картографирования. Соответственно, цифровая модель влажности почв получается в векторном виде.

Результаты исследования и их обсуждение

Картографирование влажности почв на основе ЦМР (SRMT) на примере тестового участка гор Южной Сибири. Диагностические таблицы типов леса дают необходимое представление о модификациях лесных формаций и содержат информацию о почвенно-грунтовых отличиях, степени увлажнения почв, их распределении по абсолютным высотам и формам рельефа. Наиболее удачный вариант типологической структуризации лесов гор Южной Сибири содержится в монографии [15], однако и в ней далеко не полностью отражается типологическое разнообразие насаждений. На примере лесов Каахемского лесорастительного округа исследованиями С.К. Фарбера с соавторами [19] демонстрируется наличие пробелов в лесотипологических характеристиках растительного покрова. По данным В.И. Власенко [4] в Осевом и Хемчикско-Куртушубинском округах не указаны кустарниковые серии ассоциаций, а также им выявлена необоснованность выделения в высотнопоясном комплексе (ВПК) перистепных лиственных лесов, горно-таежных травянистых лиственных лесов и их объединения в подтаежно-лесостепной ВПК.

Диагностическая таблица типов леса Осевого Западно-Саянского округа, в котором расположен тестовый участок, соответствует современной лесотаксационной структуре. В лесотипологическом отношении леса округа не отличаются разнообразием. При другом сочетании тепла и влаги характеристики лесов и их типологическая структура будут иными. Поэтому для построения ранжированного по влажности ряда типов леса необходимы дополнительные данные, на основе которых выявляется соответствие характеристик климата растительному покрову. Для получения этих данных к анализу были привлечены типы леса смежных лесорастительных округов: Каахемского (подтаежных лиственных и горно-таежных кедрово-лиственных лесов), Усинского (лесостепных лиственных и горно-таежных лиственных и кедровых лесов), Улугхемского котловинно-степного округа (островных сосновых боров) [15]. Табличные данные типов леса на основе литературных источников дополнены климатическими характеристиками [11, 14], установлена их сопряженность с показателями рельефа местности. Так, в Каахемском округе ельники с пихтой крупнотравно-зеленомошные (Е(П). крт. зм.) произрастают в долинах рек на высотах до 900 м, сумма температур выше 10 °С – 1225 °С, годовое количество осадков – 525 мм (табл. 1, 2).

Таблица 1

Показатели тепла и влаги типов лесов (Каахемский лесорастительный округ, фрагмент)

Тип леса	Сумма температур >10 °С, °С	Годовое количество осадков, мм
Березняк: осочково-вейниковый (Б(Л).осч.в.)	1625	575
спирейно-осочковый (Б.сп.осч.)	1375	525
Лиственничник: типчакково-разнотравно-осочковый (Л.тип.рт.-осч.)	1625	425
ирисово-осочковый (Л.ир.осч.)	1625	575
ирисово-разнотравный (Л.ир.рт.)	1625	525
ирисово-спирейно-крупнотравный (Л.ир.сп.крт.)	1525	475
с пихтой зеленомошно-брусничный (Л(П)зм.бр.)	1150	775
Осинник: хвощево-осочковый (Ос.хв.осч.)	1625	675
спирейно-крупнотравно-осочковый (Ос.сп.крт.осч.)	1675	757
Ельник: с пихтой крупнотравно-зеленомошный (Е(П).крт.зм.)	1275	525
с лиственницей хвощевый (Е(Л)хв.)	1225	575
с лиственницей бруснично-сфагновый (Е(Л)бр.сф.)	1225	550
осочково-сфагновый (Е.ос.сф.)	1225	550
Кедровник с елью зеленомошно-багульниковый (К(Е)зм.баг.)	950	675

Таблица 2

Распределение типов леса по местоположениям (Каахемский лесорастительный округ, фрагмент)

Абсолютная высота, м	Плоские местоположения (0...3°)		Склоны	
	Долины	Водоразделы	северные	южные
801...900	Е(П)крт.зм.		Б(Л)осч.в. Е(П)крт.зм.	Б(Л)осч.в.
901...1000	Л.ир.сп.крт.	Л.ир.рт.	Л.тип.рт.осч. Л.ир.осч. Ос.хв.осч. Ос.сп.крт.осч.	Ос.сп.крт.осч.
1001...1100	Л.ир.сп.крт. Е(Л)хв. Е(Л)бр.сф. Е.ос.сф.	Б.сп.осч	Б.сп.осч Л(П)зм.бр. К(Е)зм.баг.	—

Примечание. Полное название типов леса приведено в табл. 1.

Коэффициент корреляции r между годовым количеством осадков и абсолютными высотами: плоские местоположения – 0,401; северные склоны – 0,256; южные склоны – 0,094. Тенденция увеличения количества осадков

с высотой местности выражена недостаточно. Линии уравнений регрессии для отдельных местоположений имеют разнонаправленные наклоны к оси абсцисс. Отсюда следует, что уравнения регрессии $ОСАДКИ = f(H)$ для формирования растровой поверхности влаги не подходят.

Альтернативным показателем годовому количеству осадков является индекс влажности. Типы леса Осевого, Улугхемского, Усинского и Каахемского лесорастительных округов были ранжированы в порядке увеличения влажности. В полученном ряду каждый следующий тип леса более влажный в сравнении с предыдущим (табл. 3). Основанием для экспертного ранжирования типов леса по влажности служили лесорастительные условия, таксационные показатели, доминантные виды травяно-кустарничкового яруса и их отношение к условиям произрастания.

Таблица 3

Ранжированный по влажности ряд типов леса (фрагмент)

Тип леса	Группа влажности почв	Влажность почв, %
Кедровник ольховниково-мшистый (К.ольх.-мш.)	Сырая	74
Кедровник ольховниково-мшистый (К.ольх.-мш.)	Сырая	75
Ельник бруснично-сфагновый (Е(Л)бр.-сф.)	Сильно влажная	76
Кедровник багульниково-сфагновый (К.баг.-сф.)	Сильно влажная	77

На основе данных сопряженности типов леса с показателями рельефа и высотами местности (табл. 2) рассчитаны зависимости влажности местоположений от абсолютных высот: $ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$ (табл. 4).

Таблица 4

Взаимосвязь влажности почвы с абсолютными высотами H по местоположениям

Местоположение	$ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$
Поймы и водоразделы	$y = 0,0444x - 0,7971; r = 0,561$
Северные склоны (3–20)°	$y = 0,0401x - 11,792; r = 0,548$
Северные склоны более 20°	$y = 0,0366x - 11,251; r = 0,568$
Южные склоны (3–20)°	$y = 0,0358x - 15,152; r = 0,726$
Южные склоны более 20°	$y = 0,0288x - 13,854; r = 0,723$

Оказалось, что линии, построенные по этим уравнениям располагаются в закономерном порядке. Наблюдается возрастание влажности по мере увеличения высот местности. Линии не разнонаправлены, т. е. их углы с осью абсцисс различаются незначительно. Коэффициенты корреляции r значимы (0,548–0,726). Отсюда следует, что индекс влажности можно использовать для получения растровой поверхности.

Расстояние между линиями $ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$ различно, что может являться следствием как неточности исходных для построения уравнений данных, так и особенностей распределения по формам рельефа почвенного слоя, который формировался в силу специфики естественно-исторических причин. При любом варианте несовпадение расстояний между линиями не позволяет воспользоваться общим для всех местоположений уравнением ре-

грессии. Значения индексов влажности местоположений, рассчитанные по уравнениям табл. 4, занимают соответствующее поле таблицы *dBASE*. В результате соединения с атрибутивной таблицей *Combine* получена растровая поверхность влажности (рис. 3).

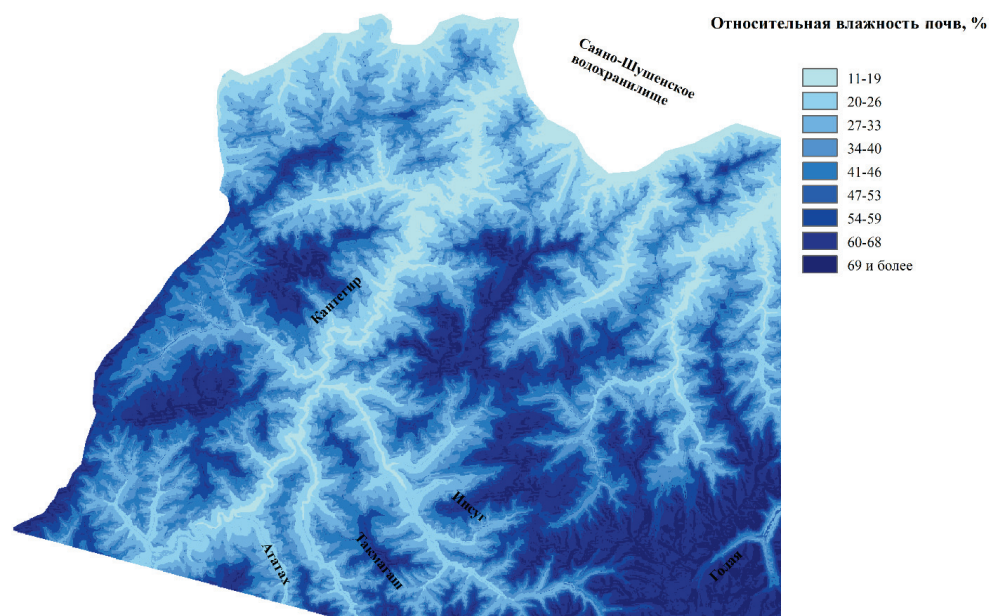


Рис. 3. Растровая поверхность влажности почв тестового участка в горах Южной Сибири

Fig. 3. Raster surface of the test area soil moisture in the mountains of Southern Siberia

Картографирование влажности почв на основе данных описаний таксационных выделов на примере тестового участка южно-таежных лесов Приангарья. Влажность почв получена в результате экспертного ранжирования типов леса. Порядковый номер в ряду (с 1 по 12) рассматривается в качестве индекса влажности почв. Информация для анализа – тип леса, породный состав, класс бонитета, почва (название, механический состав, степень влажности). В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется относительно обобщенного качественного показателя лесорастительных условий – типа леса (табл. 5).

Влажность почв определена для всех лесотаксационных выделов, включая лиственные насаждения (рис. 4).

Выявлено, что теснота связи влажности почв с продуктивностью сосновых, лиственных и еловых древостоев умеренная, а с продуктивностью кедровых – слабая. Поэтому влажность почв подлежит учету в качестве аргумента модели потенциальной продуктивности древостоев. Рассчитаны зависимости продуктивности B_w (класса бонитета) пород деревьев от влажности почв W , где R – коэффициент множественной корреляции лесорастительных условий с показателями рельефа:

Таблица 5

Распределение типов леса по влажности почв

Древостой	Индекс влажность почв											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сосняк	лш	лшбр	брзм	брос, бррт	ос, ртос	чзм						
Лиственничник					брзм, брос, бррт	ос, ртос	чзм	хвв, хвзм	осдм	бгол		
Кедровник						бррт, брос, брзм	ртос, ос	чзм	хвзм	осдм	бгол	бгсф
Ельник							бррт	ртос	хвв, хвзм	осдм	бгол	бгсф
Пихтарник								ртос, ос	хвзм	осдм		
Березняк			брзм	бррт	ртос	ос	чзм	хвзм	осдм	бгол		
Осинник						ос	чзм					

Примечание. лш – лиственничниковый; лшбр – лиственнично-брусничниковый; брзм – бруснично-зеленомошный; брос – бруснично-осочниковый; бррт – бруснично-разнотравный; ос – осочниковый; ртос – разнотравно-осочниковый; чзм – чернично-зеленомошный; хвв – хвощово-вейниковый; хвзм – хвощово-зеленомошный; осдм – осоково-долгомошный; бгол – багульниково-ольховниковый; бгсф – багульниково-сфагновый.

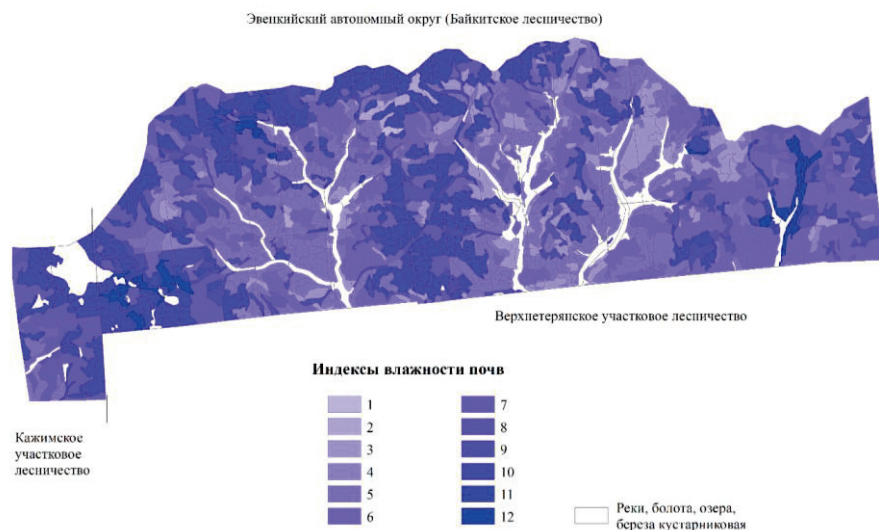


Рис. 4. Векторный слой индексов влажности почв тестового участка южно-таежных лесов Красноярского Приангарья

Fig. 4. A feature layer of the soil moisture indices of the test area of the southern taiga forests of the Krasnoyarsk Angara region

сосняки – $B_w = 5,804 - 1,073W + 0,116W^2$ ($R = 0,369$, $R^2 = 0,136$);

лиственничники – $B_w = 6,004 - 0,920W + 0,068W^2$ ($R = 0,406$, $R^2 = 0,164$);

кедровники – $B_w = 6,234 - 0,543W + 0,033W^2$ ($R = 0,169$, $R^2 = 0,028$);

ельники – $B_w = 0,905 + 0,351W$ ($R = 0,660$, $R^2 = 0,436$).

Насаждения тестового участка произрастают при определенной влажности. Сосняки занимают местоположения с индексами влажности от 1 до 7; лиственничники – от 5 до 10; кедровники – от 6 до 12; ельники – от 7 до 12. Еще более влажные местоположения захватывают заболоченные кустарники. Таким образом, влажность лимитирует возможность произрастания пород деревьев, и этот факт далее следует учитывать при картографировании потенциальной продуктивности древесных пород. Так, местоположения с индексами влажности 1–6, 11 и более в качестве потенциально возможных для произрастания лиственницы выпадают. Расчетные значения B_w внесены в отдельные поля атрибутивной таблицы таксационных выделов, что позволяет получить их в картографическом виде.

Выводы

1. Влажность почв подлежит учету не только в лесном хозяйстве (для проектирования хозяйственных мероприятий), но и в целом для решения задач природопользования и экологического мониторинга. В настоящее время для оценки влажности почв используются наземные и дистанционные методы. Существует также возможность косвенной оценки, которая осуществляется посредством методов ординации. В качестве показателей, которые косвенно отражают влажность почв, рассматриваются таксационные показатели выделов и показатели рельефа местности. Установлено, что существует два подхода к решению задачи: на основе данных цифровой модели рельефа и на основе данных описаний таксационных выделов. В горных условиях, когда формы рельефа хорошо дифференцированы, для выявления влажности почв

можно использовать как тот, так и другой подход. В равнинных условиях предпочтительнее подход на основе данных описаний таксационных выделов. В целом же картографирование на основе материалов лесоустройства менее трудоемкое.

2. На примере тестового участка в горах Южной Сибири по данным ЦМР (SRTM) сформирована цифровая модель влажности в виде растрового изображения. На примере тестового участка южно-таежных лесов Приангарья по данным описаний таксационных выделов сформирована цифровая модель влажности в виде векторного слоя. Подтверждено, что существует зависимость продуктивности древостоев от влажности почв.

3. Осадки перераспределяются по формам рельефа и формируют влажность почв. В свою очередь влажность почв является фактором, лимитирующим произрастание древесных пород. Атрибутивная таблица таксационных выделов дополняется полем влажности. При изменении описаний насаждений сохраняется возможность редактирования в атрибутивной таблице индекса влажности почв и актуализации картографических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александров В.Д. Классификация растительности // Обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1969. 275 с. [Aleksandrova V.D. *Vegetation Classification. An Overview of the Principles of Classifying and Classification Systems in Different Geobotanical Schools*. Leningrad, Nauka Publ., 1969. 275 p.]
2. Берлянт А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240. [Berlyant A.M. *Image of Space: Map and Information*. Moscow, Mysl' Publ., 1986. 240 p.]
3. Быков Ф.Л., Василенко Е.В., Гордин В.А., Тарасова Л.Л. Анализ влажности почвы по данным наземной сети и дистанционного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. докл. XIV Всерос. открытой конф., 14–18 ноября 2016 г. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 334. [Bykov F.L., Vasilenko E.V., Gordin V.A., Tarasova L.L. Soil Moisture Analysis Based on Ground Network and Remote Satellite Sensing Data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space: Abstracts of the 14th All-Russian Open Conference, November 14–18, 2016*. Moscow, IKI RAS Publ., 2016, p. 334].
4. Власенко В.И. Структура и динамика лесной растительности заповедных территорий Алтае-Саянской горной страны. М.: МСОП, 2003. 484 с. [Vlasenko V.I. *Structure and Dynamics of Forest Vegetation in Protected Areas of the Altai-Sayan Mountain Country*. Moscow, IUCN Publ., 2003. 484 p.]
5. Зайцев Б.Д. Почвоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 369 с. [Zaytsev B.D. *Soil Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 369 p.]
6. Зеликов В.Д. Из опыта работ по картированию лесных почв // Лесн. хоз-во. 1962. № 9. С. 47–50. [Zelikov V.D. By Mapping Experience of Forest Soils. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 9, pp. 47–50].
7. Зеликов В.Д. Имитационные модели лесных почв. М.: МЛТИ, 1991. 76 с. [Zelikov V.D. *Forest Soil Simulation Models*. Moscow, MLTI Publ., 1991. 76 p.]
8. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с. [Karpachevskiy L.O. *Mixed Character of Soil Cover in Forest Biogeocenosis*. Moscow, MGU Publ., 1977. 312 p.]
9. Мамаева М.А. Определение запасов влаги в почве дистанционными методами зондирования: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2004. 23 с. [Mamaeva M.A. *Determination of Soil Moisture Reserves by Remote Sensing Techniques*: Cand. Phys. Math. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2004. 23 p.]

10. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Наука о растительности (история и современное состояние основных концепций). Уфа: Гилем, 1998. 413 с. [Mirkin B.M., Naumova L.G. *Vegetation Science (History and Current State of Basic Concepts)*. Ufa, Gilem Publ., 1998. 413 p.].

11. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 225 с. [Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I. *Climate and Mountain Forests of Southern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 225 p.].

12. Работнов Т.А. Фитоценология. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1983. 296 с. [Rabotnov T.A. *Phytocoenology*. Moscow, MGU Publ., 1983. 296 p.].

13. Раменский Л.Г. Избранные работы: Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1971. 334 с. [Ramenskiy L.G. *Selected Papers: Problems and Methods of Vegetation Cover Study*. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 334 p.].

14. Седельников В.П., Лапишина Е.И., Королюк А.Ю., Валуцкий В.И., Ермаков Н.Б., Ершова Э.А., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Среднемасштабное картирование растительности гор Южной Сибири // Сиб. экол. журн. 2005. № 6. С. 939–953. [Sedel'nikov V.P., Lapshina E.I., Korolyuk A.Yu., Valutskiy V.I., Ermakov N.B., Ershova E.A., Makunina N.I., Mal'tseva T.V. Middle-Scale Vegetation Mapping in the Mountains of Southern Siberia. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2005, no. 6, pp. 939–953].

15. Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 334 с. [Smagin V.N., Il'inskaya S.A., Nazimova D.I., Novosel'tseva I.F., Cherednikova Yu.S. *Forest Types of the Mountains of Southern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 334 p.].

16. Фарбер С.К. Лесные измерения по среднемасштабным аэроснимкам. Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. 106 с. [Farber S.K. *Forest Measurements by Medium-Scale Aerial Images*. Krasnoyarsk, SO RAN Publ., 1997. 106 p.].

17. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Кошкарлова В.Л. Создание цифровой модели влажности почв (на примере лесных земель гор Южной Сибири) // Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. материалов XIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2017», 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск. В 2 т., т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 204–207. [Farber S.K., Kuzmik N.S., Koshkarova V.L. Development of the Digital Model of Soil Humidity (On the Example of Forest Lands of the Mountains of South Siberia). *The XIII International Exhibition and Scientific Congress "Interexpo GEO-Siberia-2017"*, Novosibirsk, April 17–21, 2017: *Proceedings of the International Science Conference "Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forest Management and Real Estate Management"*. In 2 vol. Vol. 2. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2017, pp. 204–207].

18. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Кошкарлова В.Л. Создание цифровой модели тепла (на примере лесных земель гор Южной Сибири) // Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. материалов XIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2017», 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск. В 2 т., т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 250–253. [Farber S.K., Kuzmik N.S., Koshkarova V.L. Development of the Digital Model of Heat (On the Example of Forest Lands of the Mountains of South Siberia). *The XIII International Exhibition and Scientific Congress "Interexpo GEO-Siberia-2017"*, Novosibirsk, April 17–21, 2017: *Proceedings of the International Science Conference "Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forest Management and Real Estate Management"*. In 2 vol. Vol. 2. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2017, pp. 250–253].

19. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Мурзакматов Р.Т., Федотова Е.В. Сопряженность элементов рельефа местности с типами лесов (на примере Каахемского лесорастительного округа) // Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение,

рациональное использование: материалы XI Убсунурского междунар. симп., 3–8 июля 2012 г., Кызыл. Кызыл: РИО Тувинск. гос. ун-та, 2012. С. 425–429. [Farber S.K., Kuzmik N.S., Murzakmatov R.T., Fedotova E.V. Association of Terrain Elements with Forest Types (Case Study of the Kaakhem Forest Site District). *Ecosystems of Central Asia: Research, Conservation and Rational Use. Proceedings of the 11th Ubsunur International Symposium*, Kyzyl, July 3–8, 2012. Kyzyl, RIO TuvSU Publ., 2012, pp. 425–429].

20. Шкляев В.А., Шкляева Л.С., Мандыт Д.К. Особенности пространственного и сезонного изменения температуры воздуха в Республике Тыва // Геогр. вестн. 2010. № 1(12). С. 68–77. [Shklyayev V.A., Shklyayeva L.S., Mandyt D.K. Features of Extensional and Seasonal Change of Temperature of Air at Republic Tyva. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2010, no. 1(12), pp. 68–77].

21. Aly Z., Bonn F.J., Magagi R. Analysis of the Backscattering Coefficient of Salt-Affected Soils Using Modeling and RADARSAT-1 SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, iss. 2, pp. 332–341. DOI: [10.1109/TGRS.2006.887163](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.887163)

22. Behrens T., Zhu A.-X., Schmidt K., Scholten T. Multi-Scale Digital Terrain Analysis and Feature Selection for Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 2010, vol. 155, iss. 3–4, pp. 175–185. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.07.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.010)

23. Brungard C.W., Boettinger J.L., Duniway M.C., Wills S.A., Edwards Jr. T.C. Machine Learning for Predicting Soil Classes in Three Semi-Arid Landscapes. *Geoderma*, 2015, vol. 239–240, pp. 68–83. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.09.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.019)

24. Bui E.N. Soil Survey as a Knowledge System. *Geoderma*, 2003, vol. 120, iss. 1–2, pp. 17–26. DOI: [10.1016/j.geoderma.2003.07.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.07.006)

25. Donatelli M., Stöckle C., Costantini E. A., Nelson R. SOILR: A Model to Estimate Soil Moisture and Temperature Regimes. *Proceedings of the ISSS Congress*. Montpellier, France, 1998.

26. *Ecology of Hierarchical Landscapes: From Theory to Application*. Ed. by J. Chen, S.C. Saunders, K.D. Brosofske, T.R. Crow. New York, Nova Science Publishers, 2006. 311 p.

27. Florinsky I.V. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Amsterdam, Academic Press, 2012. 432 p. DOI: [10.1016/C2010-0-65718-X](https://doi.org/10.1016/C2010-0-65718-X)

28. Gooley L., Huang J., Pagé D., Triantafyllis J. Digital Soil Mapping of Available Water Content Using Proximal and Remotely Sensed Data. *Soil Use and Management*, 2014, vol. 30, iss. 1, pp. 139–151. DOI: [10.1111/sum.12094](https://doi.org/10.1111/sum.12094)

29. Grunwald S. Multi-Criteria Characterization of Recent Digital Soil Mapping and Modeling Approaches. *Geoderma*, 2009, vol. 152, iss. 3–4, pp. 195–207. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.06.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.003)

30. Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L. Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, vol. 75, iss. 4, pp. 1201–1213. DOI: [10.2136/sssaj2011.0025](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0025)

31. Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the Accuracy of the SRTM Terrain Model on the Area of Poland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 2008, vol. XXXVII, part B7, pp. 169–172.

32. Lagacherie P., McBratney A.B. Chapter 1 Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science*. 2006, vol. 31, pp. 3–22. DOI: [10.1016/S0166-2481\(06\)31001-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31001-X)

33. Lefsky M.A., Turner D.P., Guzy M., Cohen W.B. Combining Lidar Estimates of Aboveground Biomass and Landsat Estimates of Stand Age for Spatially Extensive Validation of Modeled Forest Productivity. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 95, iss. 4, pp. 549–558. DOI: [10.1016/j.rse.2004.12.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.022)

34. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 2003, vol. 117, iss. 1-2, pp. 3–52. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
35. *Patterns and Processes in Forest Landscapes*. Ed. by R. Laforzezza, J. Chen, G. Sanesi, Th.R. Crow. Netherlands, Springer, 2008. 425 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-8504-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8504-8)
36. Rennie P.J. Methods of Assessing Site Capacity. *The Commonwealth Forestry Review*, 1963, vol. 42, no. 4(114), pp. 306–317.
37. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Ed. by J.P. Wilson, J.C. Gallant. John Wiley & Sons, 2000. 520 p.

FORMATION OF A DIGITAL ELEVATION MODEL OF SOIL MOISTURE ADOPTED FROM TERRAIN PARAMETERS AND FOREST MANAGEMENT MATERIALS

S.K. Farber, *Doctor of Agriculture*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-3013>

N.S. Kuzmik, *Candidate of Agriculture*; ResearcherID: [V-6094-2019](https://orcid.org/0000-0003-4707-9011),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-9011>

Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru

The visibility of the spatial distribution of soil moisture is achieved through mapping, which is most simply carried out according to a digital model. Information on soil moisture is stored in the attribute table field of the Geographic Information System (GIS) layer and available for editing and later use. It is shown that a digital moisture model can be obtained through the cross-spectrum analysis of soil moisture with terrain parameters (frame of mapping – a digital elevation model) and ranking of forest types in order of increasing soil moisture (frame of mapping – a feature layer of inventory plots). The mapping results are demonstrated in terms of 2 test sites in mountainous and flat areas. Soil moisture mapping based on the DEM (digital elevation model) data was performed for a test site located in the Axial Western Sayan district of the mountain taiga forests; where forest types, due to the spatial cross-spectrum analysis, are distributed by terrain parameters and ranked by soil moisture. The result of the spatial analysis of the DEM is a raster (digital elevation model of soil moisture). Soil moisture mapping based on the forest management materials is performed for the test area representing the southern taiga forests of the Angara region. Ranking of soil moisture is made on the basis of inventory plot descriptions of the test site. The data of inventory plots was excluded from the analysis. Growth of tree species is a priori impossible down there (wetlands, rivers and lakes). In a simplified form, a ranked range of soil moisture is also demonstrated relative to the forest type as a generalized qualitative indicator of forest site conditions. Regardless of the land category (plantation, burnt area or cutover), each inventory plot receives an additional quantitative indicator of soil moisture, followed by the possibility of determining the regression equations for the potential productivity of tree species. It is found that in the presence of a feature layer of forest management data, soil moisture mapping is preferable to be adapted from the forest management materials. It is shown that there is a dependence of the productivity of stands on soil moisture.

For citation: Farber S.K., Kuzmik N.S. Formation of a Digital Elevation Model of Soil Moisture Adopted from Terrain Parameters and Forest Management Materials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 53–67. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-4-53-67](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-53-67)

Keywords: soil moisture, terrain, forest type, quality class, potential productivity of forest stands, mapping of soil moisture.

Поступила 10.07.19 / Received on July 10, 2019

УДК 630*811.15:582.475:630*237.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-68-76

МИКРОСТРУКТУРА ДРЕВЕСИНЫ КУЛЬТУР СОСНЫ РАЗЛИЧНОЙ ИСХОДНОЙ ГУСТОТЫ НА ОСУШЕННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЕ ПОСЛЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И ГЕРБИЦИДОВ

Я.А. Неронова, канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3703-0898>

Институт леса Карельского НЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: neronovaya@mail.ru

На северо-западе таежной зоны применение способов ускоренного лесовыращивания хвойных насаждений является наиболее перспективным направлением для обеспечения постоянной устойчивой работы крупных лесоперерабатывающих предприятий. Применение минеральных удобрений и гербицидов создает более оптимальные условия для роста древостоев, что вызывает увеличение прироста древесины. Получение наиболее ценных высококачественных сортиментов находится в зависимости от величины и анатомического строения радиального прироста. Изучено последствие применения удобрений и гербицидов на анатомическое строение древесины плантационных культур сосны различной исходной густоты на осушенной торфяной почве. Изменение двух таких качественных характеристик, как доля поздней древесины и плотность, напрямую связано с анатомическим строением древесины. Применение минеральных удобрений в культурах сосны, созданных густотой 4 и 2 тыс. шт./га, увеличило количество рядов ранних трахеид в процессе их роста, внесение удобрений и гербицидов в культурах сосны густотой 1 тыс. шт./га вызвало постепенное снижение числа рядов ранних трахеид. Число рядов поздних трахеид в древесине культур, созданных различной густотой, увеличилось при комбинированном воздействии минеральных удобрений и гербицидов. Общее количество рядов трахеид в годичном кольце также возросло в древесине культур с исходной густотой 4 и 2 тыс. шт./га, комбинированное использование минеральных удобрений и гербицидов в культурах густотой 1 тыс. шт./га уменьшило общее количество рядов трахеид. Снижение плотности получаемой древесины можно объяснить формированием тонкостенных трахеид в ранней и поздней древесине годичного кольца под воздействием удобрений и гербицидов, а в культурах с исходной с густотой 4 тыс. шт./га применение удобрений и гербицидов приводит к образованию толстостенных ранних и поздних трахеид. Внесение удобрений в культурах сосны, созданных с густотой 1 и 2 тыс. шт./га, способствовало формированию ранних и поздних трахеид большего диаметра, а в культурах, созданных с густотой 4 тыс. шт./га, произошло формирование трахеид меньшего размера. Совместное воздействие удобрений и гербицидов в культурах различной густоты увеличило размер поздних трахеид, а в культурах с густотой 4 тыс. шт./га снизило диаметр люмена ранних трахеид. Сопоставив полученные данные с нормативами ГОСТ 968–68 и лаборатории сырья ВНИИБ, установили, что создание культур сосны различной густоты на осушенной торфяной почве с применением удобрений и гербицидов может быть нацелено на получение балансовой древесины (I и II категория) и высококачественного пиловочника общего назначения.

Для цитирования: Неронова Я.А. Микроструктура древесины культур сосны различной исходной густоты на осушенной торфяной почве после применения удобрений и гербицидов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 68–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-68-76

Финансирование: Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН).

Ключевые слова: плантационные культуры сосны, микроструктура древесины, удобрения, гербициды, число рядов трахеид, толщина стенки трахеид, диаметр люмена трахеид.

Введение

Вследствие длительной эксплуатации продуктивных хвойных насаждений в настоящее время ощутима нехватка балансов и пиловочника высокого качества. В условиях переходных торфяных почв необходимым и эффективным способом восстановления потенциала таежных лесов является гидролесомелиорация и создание культур [11, 19]. Вопрос изучения качественных характеристик и эксплуатации древесины, выращенной в лесных культурах, остается малоизученным [14]. В имеющихся литературных данных недостаточно сведений о качестве сосновой древесины, полученной на осушенных торфяных почвах, для использования в целлюлозно-бумажной промышленности [3, 11].

Данные по основным качественным анатомическим характеристикам древесины хвойных дают полную информацию об изменении ее строения в растущем дереве [5].

Улучшением условий роста древостоя можно добиться увеличения ширины годичных слоев, интенсивности работы камбия и размеров трахеид [8, 9, 11–13, 15, 17, 20]. Имеются литературные данные о значительном влиянии на качество древесины соотношения объемов клеточных стенок и полостей клеток [9]. Основными характеристиками, используемыми для оценки качества древесины хвойных, являются число рядов ранних и поздних трахеид в пределах годичного кольца; радиальный диаметр люмена; толщина клеточной стенки трахеид.

Цель исследования – анализ влияния и последствий применения удобрений и гербицидов на анатомическое строение древесины плантационных культур сосны различной исходной густоты, произрастающих на осушенной торфяной почве.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись 40-летние плантационные культуры сосны на осушенной переходной торфяной почве (кв. 30 Киндасовского лесничества Пряжинского мехлесхоза Республики Карелия), созданные с разной исходной густотой. Схема опыта включала 3 варианта по три секции в каждом. В каждом варианте по густоте посадки (1, 2 и 4 тыс. шт./га) выделялись секции с применением минеральных удобрений, удобрений с гербицидами и контрольные участки (табл. 1).

Гидролесомелиорация была проведена в 1973 г. Расстояние между каналами – 120 м. Мощность торфяной залежи в пределах участка – 90...120 см; зольность почвы – 6...8 %; степень разложения торфа – 15...30 %. Культуры созданы посадкой 3-летних семян сосны в плужные пласты под меч Колесова весной 1977 г. Расстояние между центрами борозд – 6 м, между рядами культур – 3 м. Все борозды выведены в осушитель [4].

Таблица 1

Таксационная характеристика плантационных культур сосны

Густота, тыс. шт./га	Вариант	Диаметр на высоте 1,3 м, см	Высота, м	Запас, м ³ /га	Класс бонитета	Относи- тельная полнота
1	Контроль	13,8	9,8	83	III	0,72
	Удобрения	19,9	14,1	205	I	1,10
	Удобрения + гербициды	18,0	13,8	183	I	0,99
2	Контроль	12,9	9,5	106	III	0,98
	Удобрения	17,8	13,8	215	I	1,14
	Удобрения + гербициды	18,4	13,8	223	I	1,03
4	Контроль	13,0	11,1	155	II	1,16
	Удобрения	15,5	14,6	276	I	1,38
	Удобрения + гербициды	15,5	13,8	253	I	1,36

Бутиловый эфир 2,4-Д применялся для уничтожения поросли лиственных пород на 2-й и 5-й годы роста культур. На 2-й год выращивания вносились азотные (N) и фосфорные (P) удобрения из расчета $N_{50}P_{50}$ по д. в.; на 5-й – азотные (N), фосфорные (P), калийные (K) из расчета $N_{100}P_{100}K_{100}$ по д.в.; на 10-й – из расчета $N_{100}P_{200}K_{100}$ по д. в. (по д. в. – по действующему веществу).

Для устранения конкуренции с травянистой растительностью применялись гербициды: на 2-й год роста – пропазин (7,0 кг/га по д. в.); на 4-й – пропазин (7,0 кг/га по д. в.) с дипиридилфосфатом (2,5 кг/га по д. в.); на 5-й – велпар (7,0 кг/га по д. в.) [4].

Образцы для дальнейших исследований отбирались в 2017 г.

Исследования культур осуществлялись согласно общепринятым в лесной таксации методам [2]. На пробных площадях производился сплошной пересчет деревьев. Диаметр ствола измерялся на высоте 1,3 м. У пяти средних деревьев на высоте 0,15 м с помощью бурава Пресслера отбирались керны для анализа микроструктуры древесины. Анатомическое строение изучалось непосредственно на поперечных срезах кернов толщиной 30 мкм, приготовленных на роторном замораживающем микротоме. Предварительно окрашенные в сафранине срезы фиксировались в глицерине [6]. Основные анатомические характеристики древесины измерялись с помощью программы цифровой обработки компьютерных изображений GIMP 2. Снимки получали с помощью микроскопа Leica DM1000 (см. рисунок).

Для статистической обработки применялись методики, используемые при биологических и лесоводственных исследованиях [7]. Достоверность различий оценивалась с вероятностью 95 %.



Поперечные срезы древесины толщиной 30 мкм, приготовленные на роторном замораживающем микротоме

Cross-sections of wood 30 μ m thick cut by a rotary freezing microtome

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных лесохозяйственных мероприятий увеличился класс бонитета 40-летних плантационных культур сосны, созданных с различной исходной густотой на осушенной переходной торфяной почве. На вариантах с внесением минеральных удобрений запас древесины превышал показатель контрольного участка на 63,0 %, т. е. в 2,5 раза. Средняя высота в древостое возросла на 24,0...45,0 %, средний диаметр по сравнению с контролем – на 19,0...44,0 %. Имеются данные о влиянии густоты древостоя на конкуренцию деревьев за почвенные и водные ресурсы, а также на особенности формирования кроны в условиях различной освещенности и, как следствие, на величину радиального прироста [16, 21]. Внесение минеральных удобрений в культурах сосны, созданных с густотой 1 тыс. шт./га, привело к значительному увеличению радиального прироста (по сравнению с контролем на 44,2 %). Применение удобрений совместно с гербицидами оказалось наиболее эффективно в культурах, созданных с густотой 2 тыс. шт./га (+42,6 %).

Комбинированное воздействие удобрений и гербицидов вызвало снижение средней доли поздней древесины за весь период наблюдений в культурах разной густоты при сравнении с контрольным вариантом, за исключением совместного применения удобрений с гербицидами в культурах с густотой 2 тыс. шт./га (+1,1 %). Использование удобрений в культурах, созданных с густотой 1 тыс. шт./га, снизило среднее содержание поздней древесины на 24,0 %, с густотой 2 тыс. шт./га – на 21,0 %, 4 тыс. шт./га – на 9,0 %.

Средняя плотность древесины до проведения лесохозяйственных мероприятий составляла (383 ± 6) кг/га. Применение минеральных удобрений способствовало формированию древесины с пониженной плотностью в культурах, созданных с густотой 4 тыс. шт./га – 8,0 %, 1 тыс. шт./га – 21,7 %. Комбинированное воздействие минеральных удобрений и гербицидов снизило плотность древесины в культурах различной густоты (4 тыс. шт./га – на 3,7 %; 1 тыс. шт./га – на 7,1 %). В культурах с исходной густотой 2 тыс. шт./га колебания в значениях плотности были несущественными (1,0...4,0 %). Следовательно, изменения в анатомическом строении древесины непосредственно связаны с изменениями таких характеристик, как доля поздней древесины и плотность.

В результате комплексного применения удобрений и гербицидов на варианте 2 тыс. шт./га среднее количество рядов ранних трахеид увеличилось на 27,3 %, на варианте 4 тыс. шт./га – на 44,4 %. Постепенное снижение числа рядов ранних трахеид (удобрения – на 56,0 %; удобрения + гербициды – на 45,0 %) происходило в культурах сосны густотой 1 тыс. шт./га. Использование минеральных удобрений вызвало повышение количества рядов ранних трахеид в культурах сосны, созданных густотой 4 тыс. шт./га (+33,0 %) и 2 тыс. шт./га (+5,0 %) в процессе их роста. Количество рядов поздних трахеид увеличилось после проведения лесохозяйственных мероприятий (при густоте 4 тыс. шт./га – +50,0 %; 2 тыс. шт./га – +31,3 %; 1 тыс. шт./га – +6,7 %).

Среднее общее количество рядов трахеид в годичном кольце возросло после проведения лесохозяйственных мероприятий (удобрения+гербициды: 4 тыс. шт./га – +47,0 % и 2 тыс. шт./га – +29,0 %; удобрения: 4 тыс. шт./га – +31,0 %; 2 тыс. шт./га – +3,0 %). Однако в культурах с исходной густотой 1 тыс. шт./га и наибольшим радиальным приростом среднее общее количество рядов трахеид снизилось (удобрения – на 42,0 %; удобрения + гербициды – на 32,0 %), что объясняется изменениями размеров трахеид и согласуется с данными других исследователей [1].

Имеются данные финских ученых [19] о влиянии диаметра и толщины клеточных стенок трахеид на прочность, оптические и печатные свойства получаемой бумаги. Формирование тонкостенных трахеид в ранней и поздней древесине годичного кольца (уменьшение толщины стенки трахеид: 4 тыс. шт./га с удобрениями: поздних – на 6,2 %, ранних – на 14,4 %; 2 тыс. шт./га с удобрениями: поздних – на 6,8 %, ранних – на 15,0 %; удобрения + гербициды: поздних – на 16,6 %, ранних – на 17,0 %; 1 тыс. шт./га с удобрениями: поздних – на 1,7 %, ранних – на 26,0 %; удобрения + гербициды: поздних – на 7,0 %, ранних – на 7,3 %) объясняет снижение плотности получаемой древесины сосны после применения минеральных удобрений и гербицидов (табл. 2).

Таблица 2

Влияние режима выращивания на толщину стенок трахеид древесины сосны в 40-летних культурах, созданных на осушенной торфяной почве

Густота, тыс. шт./га	Вариант	Толщина стенок, мкм, по периодам, лет				Среднее за 1–40 лет
		1–10	11–20	21–30	31–40	
Поздние трахеиды						
1	Удобрения	11,7±2,25	12,1±0,76	14,8±1,53	14,0±1,32	13,1±0,75
	Удобрения+гербициды	10,7±0,45	14,7±3,95	10,8±2,10*	13,5±1,35	12,4±1,01
	Контроль	11,0±0,81	15,4±1,28	14,2±0,05	13,0±1,65	13,4±0,94
2	Удобрения	14,7±2,15	12,6±0,44	13,9±0,55	10,6±0,99*	13,0±0,88
	Удобрения+гербициды	9,0±1,29	13,3±0,43	11,5±0,51*	12,4±0,24	11,6±0,92*
	Контроль	10,6±1,11	14,4±0,53	15,0±0,02	15,6±1,04	13,9±1,13
4	Удобрения	9,1±0,75	11,3±0,26	11,1±0,10*	10,4±0,10	10,5±0,49
	Удобрения+гербициды	11,7±0,37	14,8±1,07	15,0±0,35	13,7±0,85*	13,8±0,76*
	Контроль	8,8±0,50	12,5±1,30	15,2±1,96	8,2±2,32	11,2±1,64
Ранние трахеиды						
1	Удобрения	9,2±1,35	8,4±0,58	11,7±2,79	8,9±0,45	7,1±1,79*
	Удобрения+гербициды	9,1±1,45	8,0±0,29	9,8±1,64	8,4±0,62	8,8±0,40
	Контроль	9,9±0,31	10,4±0,27	10,5±0,03	7,3±0,55	9,5±0,77
2	Удобрения	8,9±1,30	8,3±0,11	9,9±2,91	7,6±0,31*	8,7±0,49
	Удобрения+гербициды	7,7±1,39	9,1±0,13	7,6±0,66*	9,3±0,55	8,4±0,44
	Контроль	8,4±0,67	9,5±0,81	11,1±0,05	11,8±1,29	10,2±0,76
4	Удобрения	8,3±1,66	8,2±0,15	7,7±0,15	5,6±0,10	7,4±0,62
	Удобрени+гербициды	8,6±0,96	11,3±2,15	9,9±2,38	12,3±0,55*	10,5±0,80
	Контроль	8,2±0,60	9,8±0,63	9,4±0,73	7,3±1,10	8,7±0,56

*Существенные различия с контрольным участком (вероятность 0,95 ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$)).

Совместное влияние удобрений и гербицидов в культурах с густотой 4 тыс. шт./га способствует формированию толстостенных трахеид (поздних – на +23,6 %; ранних – на +21,2 %).

Комплексный уход (удобрения + гербициды) вызвал образование поздних трахеид большего размера во всех вариантах густоты (4 тыс. шт./га – на +41,8 %, 2 тыс. шт./га – на +27,2 %, 1 тыс. шт./га – на +20,9 %). В поздней зоне древесины культур сосны, созданных с густотой 1 тыс. шт./га (+29,4 %) и 2 тыс. шт./га (+13,1 %), под действием минеральных удобрений происходило формирование трахеид большего размера. На варианте культур, созданных с густотой 4 тыс. шт./га, диаметр люмена поздних трахеид древесины снизился на 1,8 % (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние режима выращивания на диаметр люмена трахеид древесины сосны
в 40-летних культурах, созданных на осушенной торфяной почве**

Густота, тыс. шт./га	Вариант	Диаметр люмена, мкм, по периодам, лет				Среднее за 1–40 лет
		1–10	11–20	21–30	31–40	
Поздние трахеиды						
1	Удобрения	38,3±6,89	30,0±2,49	39,3±8,17*	23,5±2,82*	32,8±3,74*
	Удобрения+ гербициды	29,9±11,1	31,2±2,04*	39,1±21,1*	22,3±2,70	30,6±3,45
	Контроль	28,2±1,55	23,2±2,04	30,2±0,05	19,8±7,4	25,3±2,36
2	Удобрения	25,3±6,35	25,1±1,78	23,3±2,63*	34,0±6,36*	27,0±2,39*
	Удобрения+ гербициды	31,7±5,30	28,4±1,43	32,9±0,55*	27,9±0,73*	30,2±1,24*
	Контроль	32,4±3,67	23,9±0,55	19,5±0,03	19,3±3,18	23,8±3,07
4	Удобрения	17,8±0,70	16,5±0,45	24,2±0,20*	15,4±0,30	18,5±1,97
	Удобрения+ гербициды	26,5±1,24	24,0±2,02	26,2±0,47*	30,0±5,75*	27,0±1,23*
	Контроль	16,2±0,75	21,9±5,53	20,9±0,90	16,3±1,37	18,8±1,51
Ранние трахеиды						
1	Удобрения	53,1±5,52	72,2±2,03	52,1±15,0	66,9±1,17	61,1±5,01
	Удобрения+ гербициды	51,4±2,05	75,7±4,72*	40,7±12,1	62,3±3,09	57,5±7,49
	Контроль	51,0±3,97	61,1±5,25	61,0±0,02	63,6±4,80	59,2±2,80
2	Удобрения	72,1±0,75	61,0±2,07	57,3±4,21	52,9±13,8	60,8±4,10
	Удобрения+ гербициды	53,4±8,04	70,1±1,46*	68,9±1,01*	68,2±3,05	65,1±3,92
	Контроль	57,7±5,44	56,3±2,08	57,5±0,13	57,8±6,63	57,3±0,36
4	Удобрения	33,3±3,15	32,1±0,10*	47,5±0,10*	51,5±0,15	41,1±4,92
	Удобрения+ гербициды	53,8±3,07	61,9±2,59	63,5±2,90*	46,9±11,20	56,6±3,85
	Контроль	42,8±3,55	61,2±2,86	69,3±4,17	65,9±5,65	59,8±5,92

*Существенные различия с контрольным участком (вероятность 0,95 ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$)).

В ранней зоне древесины отмечено формирование трахеид большего диаметра (при густоте 2 тыс. шт./га – на +6,9 %, 1 тыс. шт./га – на +3,2 %) после применения удобрений (табл. 3). Однако в древесине культур, созданных с густотой 4 тыс. шт./га, происходило формирование ранних трахеид меньшего размера (удобрения – на 31,3 %; удобрения + гербициды – на 5,4 %). Комплексное применение удобрений и гербицидов в культурах с исходной густотой 2 тыс. шт./га увеличило размер ранних трахеид на 13,6 %.

Исходя из полученных в ходе исследования данных установлено, что проведение лесохозяйственных мероприятий с применением минеральных удобрений и гербицидов в культурах, созданных с густотой 1 и 2 тыс. шт./га, оказывает влияние на структуру годичного кольца и способствует формированию тонкостенных трахеид большего размера в ранней и поздней древесине. Применение удобрений в культурах с исходной густотой 4 тыс. шт./га приводит к образованию тонкостенных трахеид меньшего диаметра.

Заключение

В культурах сосны на осушенных торфяных почвах использование удобрений и гербицидов способствует формированию большего числа рядов трахеид, что увеличивает радиальный прирост древесины.

Проведение лесохозяйственных мероприятий с использованием удобрений и гербицидов в культурах с густотой 1 и 2 тыс. шт./га влияет на образование тонкостенных ранних и поздних трахеид большего диаметра; применение только минеральных удобрений способствует формированию тонкостенных трахеид меньшего размера в древесине культур сосны исходной густоты 4 тыс. шт./га. Таким образом, снижение плотности древесины исследуемых культур сосны можно объяснить формированием тонкостенных трахеид в ранней и поздней древесине годичного кольца.

По данным ГОСТ 968–68, нормативам лаборатории сырья Всесоюзного научно-исследовательского института бумаги и на основании полученных результатов исследований качественных характеристик древесины, создание культур сосны различной густоты на осушенной торфяной почве с применением удобрений и гербицидов целесообразно для получения балансовой древесины и высококачественного пиловочника общего назначения. В целлюлозно-бумажной промышленности такое древесное сырье применяется в качестве балансов I категории. В удобренных культурах с исходной густотой 1 и 4 тыс. шт./га рекомендуется древесину использовать в качестве балансов II категории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абаева К.Т., Серикбаева А.Т. Методы оптимизации густоты посадки сосновых культур // Молодой ученый. 2014. № 2. С. 394–397. [Abaeva K.T., Serikbaeva A.T. Methods for Optimizing the Stocking Rate of Pine Plantations. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2014, no. 2, pp. 394–397].
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. [Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.].
3. Бабиков Б.В. Устойчивость лесных экосистем на осушенных землях // Мониторинг осушенных лесов: материалы совещ. СПб.: СПбЛТА, 2001. С. 53–55. [Babikov B.V. Sustainability of Forest Ecosystems on Drained Lands. *Monitoring of Drained Forests: Meeting Proceedings*. Saint Petersburg, SPbLTA Publ., 2001, pp. 53–55].
4. Бердников И.А. Опытные плантационные культуры сосны обыкновенной на осушаемых переходных болотах в Карелии // Инновации и технологии в лесном хозяйстве: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., СПб: СПбНИИЛХ, 2012. С. 57–63. [Berdnikov I.A. Scots Pine Plantations on Dried Mesotrophic Mires in Karelia. *Innovation and Technology in Forestry Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, SPbNIIHL Publ., 2012, pp. 57–63].
5. Брюханова М.В., Кирдянов А.В., Свидерская И.В., Почебыт И.П. Влияние погодных условий на анатомическую структуру годичных колец лиственницы Гмелина на севере Средней Сибири // Лесоведение. 2014. № 4. С. 36–40. [Bryukhanova M.V., Kirryanov A.V., Sviderskaja I.V., Pochebyt N.P. Weather Controls of the Tree Rings Anatomical Structure of *Larix gmelinii* in North of Central Siberia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2014, no. 4, pp. 36–40].
6. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с. [Vaganov E.A., Shashkin A.V. *Growth and Structure of Coniferous Annual Rings*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 232 p.].

7. Ивантер Э.В., Коросов А.В. Элементарная биометрия. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2005. 104 с. [Ivanter E.V., Korosov A.V. *Elementary Biometrics*. Petrozavodsk. PetrGU Publ., 2005. 104 p.].

8. Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с. [Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Pine Wood Quality in Plantations*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2003. 110 p.].

9. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с. [Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p.].

10. Полубояринов О.И. Современные тенденции изменения показателей плотности древесины, поступающей на лесоперерабатывающие предприятия // Строение, свойства и качество древесины: симп. Координационного совета по современным проблемам древесиноведения, Москва–Мытищи, 13–17 ноября 1990 г. М., 1990. С. 32–36. [Poluboyarinov O.I. Current Trends in Density Change of Wood Supplied to Wood Processing Enterprises. *Wood Structure, Properties and Quality: Symposium of the Coordinating Council on Current Issues of Wood Science, Moscow-Mytishchi, November 13–17, 1990*. Moscow, 1990 pp. 32–36].

11. Смирнов А.П., Пазухина Г.А. Сравнительная оценка качества древесины высокопродуктивных сосняков на осушенных торфяных почвах // Лесн. журн. 2003. № 1. С. 111–119. [Smirnov A.P., Pazukhina G.A. Comparative Analysis of Wood Quality from High-Productive Pine Stands on Drained Peat Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2003, no. 1, pp. 111–119]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/6b1/6b1f41fb910d46857c081c1d8aa685c9.pdf>

12. Федотов И.В., Третьяков С.В., Ильинцев А.С. Влияние гидротехнической мелиорации на качество древесины сосны // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 214. С. 131–140. [Fedotov I.V., Tretjakov S.V., Ilintsev A.S. The Hydraulic Impact of Land Reclamation on the Quality of Pine Wood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2016, iss. 214, pp. 131–140].

13. Чибисов Г.А., Москалева С.А. Влияние комплексных уходов на анатомические свойства древесины сосны // Лесоводственно-экономические вопросы воспроизводства лесных ресурсов Европейского Севера. Архангельск: СевНИИЛХ, 2000. С. 74–82. [Chibisov G.A., Moskaleva S.A. The Influence of Thinning on the Anatomical Properties of Spruce. *Silvicultural and Economic Issues of Reproduction of the Forest Resources of the European North*. Arkhangelsk, SevNIILKh Publ., 2000, pp. 74–82].

14. Шутов И.В., Маркова И.А., Омеляненко А.Я., Постников М.В., Товкач Л.Н., Власов Р.В., Подшиваев Е.Е., Сергиенко В.Г. Платационное лесоводство / под общ. ред. И.В. Шутова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 366 с. [Shutov I.V., Markova I.A., Omel'yanenko A.Ya., Postnikov M.V., Tovkach L.N., Vlasov R.V., Podchivaev E.E., Sergienko V.G. *Plantation Forestry*. Ed. by I.V. Shutov. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2007. 366 p.].

15. Lindkvist A., Kardell Ö., Nordlund C. Intensive Forestry as Progress or Decay? An Analysis of the Debate about Forest Fertilization in Sweden, 1960–2010. *Forests*, 2011, vol. 2, iss. 1, pp. 112–146. DOI: [10.3390/f2010112](https://doi.org/10.3390/f2010112)

16. Mäkinen H. Effect of Stand Density on Radial Growth of Branches of Scots Pine in Southern and Central Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, no. 8, pp. 1216–1224. DOI: [10.1139/x99-060](https://doi.org/10.1139/x99-060)

17. Mäkinen H., Hynynen J. Wood Density and Tracheid Properties of Scots Pine: Responses to Repeated Fertilization and Timing of the First Commercial Thinning. *Forestry*, 2014, vol. 87, iss. 3, pp. 437–447. DOI: [10.1093/forestry/cpu004](https://doi.org/10.1093/forestry/cpu004)

18. Mäkinen H., Hynynen J., Penttilä T. Effect of Thinning on Wood Density and Tracheid Properties of Scots Pine on Drained Peatland Stands. *Forestry*, 2015, vol. 88, iss. 3, pp. 359–367. DOI: [10.1093/forestry/cpv006](https://doi.org/10.1093/forestry/cpv006)

19. Neippola J. Long-Term Vegetation Changes in Stands of *Pinus sylvestris* in Southern Finland. *Journal of Vegetation Science*, 1992, vol. 3, iss. 4, pp. 475–484. DOI: [10.2307/3235804](https://doi.org/10.2307/3235804)

20. Saarsalmi A., Tamminen P., Kukkola M. Effects of Long-Term Fertilisation on Soil Properties in Scots Pine and Norway Spruce Stands. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 1, art. 989. DOI: [10.14214/sf.989](https://doi.org/10.14214/sf.989)

21. Zeide B. Optimal Stand Density: A Solution. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 846–854. DOI: [10.1139/x03-258](https://doi.org/10.1139/x03-258)

WOOD MICROSTRUCTURE OF PINE PLANTATIONS WITH DIFFERENT INITIAL STOCKING RATE ON DRAINED PEAT SOIL UPON FERTILIZATION AND HERBICIDE TREATMENTS

Ya.A. Neronova, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3703-0898>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: neronovaya@mail.ru

To secure a steady operation of large wood processing enterprises in north-west of the Taiga zone, accelerated coniferous forest cultivation appears to be the most promising. Treatments with mineral fertilizers and herbicides create optimal conditions for stand growth and thus result in wood increment. Trunk wood qualities and, hence, the output of the most valuable trunk sections are contingent on the volume and anatomical structure of radial increment. This paper shows the effect of fertilization and herbicide treatments on the anatomical structure of wood in pine plantations of different stocking rates in drained peat soils. Variations of late wood share and density are directly associated with the changes in anatomical structure of wood. Fertilization of pine plantations with density of 4000 and 2000 trees/ha increased the number of early tracheid rows in the process of their growth. The application of fertilizers and herbicides in pine plantations stocked at 1000 trees/ha induced a gradual reduction in the number of early tracheid rows. A combined mineral fertilizer plus herbicide treatment enlarged the number of late tracheid rows in wood of the plantations stocked at various rates. The total number of tracheid rows per annual ring increased in the plantations stocked at a rate of 4000 and 2000 trees/ha. The reduction in total number of tracheid rows of plantations with 1000 trees/ha stocking rate is down to mineral fertilization combined with herbicide treatments. Fertilizer and herbicide treatment of the plantations with the initial density of 4000 trees/ha leads to the formation of thick-walled early and late tracheids. Application of fertilizers in pine plantations with 1000 and 2000 trees/ha stocking rates promote the formation of early and late tracheids of a larger diameter. Tracheids of a smaller diameter were formed in the plantations stocked at 4000 trees/ha. The overall impact of fertilizers and herbicides caused an increase of late tracheid size in the plantations with different stocking rates. Comparing the obtained data with the regulatory requirements of GOST 968–68 and the Laboratory of Raw Materials of the All-Union Scientific Research Institute of Pulp and Paper Industry, we have found that cultivation of pine plantations with various stocking rates on dried peat soils using fertilizers and herbicides can be aimed at producing pulpwood (1st and 2nd categories) and high-quality sawlogs.

For citation: Neronova Ya.A. Wood Microstructure of Pine Plantations with Different Initial Stocking Rate on Drained Peat Soil upon Fertilization and Herbicide Treatments. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 68–76. DOI: [10.37482/0536-1036-20204-68-76](https://doi.org/10.37482/0536-1036-20204-68-76)

Funding: The research was financially supported by the Federal Budget within the fulfillment of the state assignment of the KarRC RAS (Forest Research Institute of the KarRC RAS).

Keywords: pine plantations, wood microstructure, fertilizers, herbicides, number of tracheid rows, tracheid wall thickness, tracheid lumen diameter.

Поступила 04.03.19 / Received on March 4, 2019

УДК 630*221+630*232.322.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-77-94

**ТРАНСПОРТ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ
¹⁴С-АССИМИЛЯТОВ У СОСНЫ И ЕЛИ
В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ФИТОЦЕНОЗАХ
ПРИ РАЗЛИЧНОМ СВЕТОВОМ И АЗОТНОМ ПИТАНИИ**

В.Н. Коновалов¹, д-р с.-х. наук, проф.

Л.В. Зарубина², д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3834-0521>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.kononov@narfu.ru

²Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555;

e-mail: liliya270975@yandex.ru

Одним из направлений повышения продуктивности северных лесов является рациональная система рубок и минерального питания растений, сохранение при рубках подроста хвойных пород. Применяемые в лесоводстве физиологические методы исследований и, прежде всего, изучение донорно-акцепторных отношений позволяют для подроста сосны и ели достаточно быстро (в течение 1–2 лет) получать необходимую информацию об уровне эффективности проводимых в насаждениях лесохозяйственных мероприятий, не дожидаясь конечного результата в виде прироста побегов. У подроста ели и молодняков сосны в древостоях разного породного состава и возраста изучена динамика накопления, передвижения и распределения углерода ¹⁴С в органах и тканях дерева под действием выборочной рубки и дозы азота. Объектами исследования служили: ельники и березняки черничных типов лесорастительных условий с разной интенсивностью рубки; сосняки лишайниковые, сформировавшиеся из подроста сосны, сохраненного при рубке леса. Установлено, что под пологом ельников и березняков в летний период освещенность не превышает 8...10 % от открытого места и не соответствует биологической норме для ели. Недостаток солнечной радиации и почвенного азота у подроста этих древесных пород приводит к снижению интенсивности фотосинтеза и нарушению донорно-акцепторных взаимосвязей, задерживает эвакуацию из листа ассимилятов и поступление их в активные зоны, подавляет ростовую активность и связанный с ней «запрос», посылаемый в листья на энергопластические вещества, ухудшает жизненное состояние растений. Из-за слабой выработки ассимилятов и нарушения системы их распределения ухудшается функциональная деятельность корневой системы, задерживается формирование нового ассимиляционного аппарата, нарушаются ростовые процессы вегетативных органов. Вносимый в насаждения азот и выборочные рубки у подроста активизируют синтетическую и поглощательную деятельность корневой системы, улучшают работу ассимиляционного аппарата, усиливают донорно-акцепторные связи между надземными и подземными органами дерева, значительно ускоряют отток из листа продуктов фотосинтеза, положительно влияют на ростовые процессы. Выявлено, что по уровню активности донорно-акцепторной системы для подроста сосны и ели в течение 1–2 лет можно установить такие системы рубок и дозу вносимого в древостой азота, которые в наибольшей мере соответствуют потребностям этих пород.

Для цитирования: Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Транспорт, распределение и потребление ¹⁴С-ассимилятов у сосны и ели в северотаежных фитоценозах при различном световом и азотном питании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 77–94. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-77-94

Ключевые слова: подрост сосны, подрост ели, освещенность, сосняк лишайниковый, ельник черничный, березняк черничный, донорно-акцепторные взаимодействия, выборочные рубки, азотные удобрения.

Введение

Добиться повышения продуктивности лесов в условиях Севера невозможно без рациональной системы рубок, сохранения при рубках хвойного молодняка, химической мелиорации [19]. Важное место в установлении эффективности применяемых мероприятий занимают физиологические методы, которые позволяют достаточно быстро выявлять наиболее интенсивные их уровни, сокращать сроки принятия необходимых решений, не прибегая к длительным наблюдениям за внешним ростом растений [2–4, 8, 10, 12]. Среди физиологических методов центральное место в решении вопросов повышения продуктивности растений занимают взаимосвязи фотосинтеза и роста, скорости оттока и снабжения акцепторных зон (точек роста) энергетическими материалами (ассимилятами). На уровне целого дерева эти связи реализуются через систему донорно-акцепторных отношений, формирование и функционирование которых определяется генотипом растения и влиянием внешних условий [2–5, 18, 20, 21, 24]. Показано, что количество образующихся в нем ассимилятов сильно влияет на фотосинтетический аппарат, обеспечение аттрагирующих органов продуктами фотосинтеза. Блокирование оттока ассимилятов в результате нарушения работы этих органов приводит к повышению содержания в листе растворимых углеводов, что вызывает резкое снижение интенсивности фотосинтеза в результате «перекорма», усиливает активность фото- и темнового дыхания, нарушает деструкцию хлорофилла, уменьшает «запрос» и вызывает переориентацию части потока ассимилятов с одних потребляющих органов на другие функционирующие системы в ущерб общей продуктивности растения [8, 16, 20, 24]. Снижение уровня минерального питания и недостаток света усиливают эти тенденции [3, 10, 12, 18, 26]. Основная роль в функционировании донорно-акцепторной системы дерева принадлежит акцепторным зонам (точкам роста), которые являются основными потребителями биологических и минеральных веществ [4, 6, 8, 9, 12, 13, 15], а также биологическим соединениям – ассимилятам, фитогормонам, активность которых определяется условиями местопроизрастания растения [1, 18, 21, 29]. Удобрения и рубки в лесах – важный регуляторный механизм, влияющий на интенсивность фотосинтеза и жизнедеятельность корневой системы, на скорость и направленность донорно-акцепторных отношений, на продуктивность растений [3–5, 7, 11–15, 26, 30].

Литературные сообщения [11, 22] свидетельствуют, что многие лесные почвы северной таежной зоны крайне бедны минеральными элементами, особенно азотом, и не обеспечивают ими древесные растения в нужном количестве и соотношении. Однако исследований, которые могли бы у сосны и ели характеризовать особенности функционирования донорно-акцепторной системы при формировании нового ассимиляционного аппарата и его деятельность при различном световом и корневом питании, за исключением небольшого количества [4, 11, 12, 15], в условиях Севера нет. В то же время такие исследования необходимы. Они представляют значительный интерес как с познавательной, научной точки зрения на развитие самого растения, так и в связи с прикладными проблемами регулирования светового и минерального

питания в лесных сообществах. Они крайне важны также для изучения метаболизма, определяющего особенности ростовых процессов у древесного растения и продуктивность древостоев в экосистемах в зависимости от условий их местопроизрастания. В предыдущей работе [12] нами было рассмотрено влияние выборочных рубок на донорно-акцепторную систему у сосны и ели.

Цель настоящего исследования – изучение динамики накопления, оттока и передвижения углерода ^{14}C у подростка ели и молодняка сосны, оценка эффективности применяемых для ускорения роста деревьев в лесных экосистемах Севера выборочных рубок и минеральных удобрений, выявление закономерностей распределения ^{14}C -продуктов с последующим отслеживанием радиоактивной метки в органах и тканях древесного растения в течение периода активного развития молодой хвои текущего года.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований в Архангельской области (северотаежная зона) служили 53- и 59-летние березняки черничные – ПП 1 (Левашское лесничество, кв. 23 и 96); 127-летний ельник черничный – ПП 2 (Усть-Пинежское лесничество, кв. 24, м/о «Воджером»), в которых проведена выборочная рубка разной интенсивности; 25-летний сосняк лишайниковый – ПП 3 (Вожгорское лесничество). Количество подростка ели в березняках и ельнике составляет 2,8...4,5 тыс. экз./га.

В 59-летнем березняке и 127-летнем ельнике выборочная рубка деревьев проведена по узкопасечной технологии с вырубкой 52 и 48 % запаса древесины соответственно. В каждом древостое перед началом вегетационного периода на контрольных и опытных секциях было внесено азотное удобрение (мочевина – 46 % по действующему веществу (д. в.)) в дозах азота 180 и 270 кг/га по д. в. В 25-летнем сосняке лишайниковом действие азота на рост и физиологическое состояние сосны изучено в дозах 120, 180 и 240 кг/га по д. в. Удобрения вносили вручную путем равномерного разбрасывания по поверхности почв.

Интенсивность солнечной радиации (освещенности) измерялась в июне–августе на высоте 1,5 м с помощью 2 люксметров Ю-116М по 30–35 постоянным точкам, закрепленным в натуре деревянными колышками, в околополуденные часы (13.00) одновременно в лесу и на открытом месте [27]. Измерение скорости фотосинтеза и оттока ассимилятов проводилось радиометрическим методом. Для опыта готовилась замкнутая система, состоящая из газгольдера в виде 10-литровой полиэтиленовой канистры и камеры, изготовленной из оргстекла для регистрации интенсивности фотосинтеза, смонтированным в нее термометром. Во избежание перегрева побегов в жаркие солнечные дни камера с побегами помещалась в ванну с холодной водой. Для изучения оттока ^{14}C -ассимилятов камера готовилась из прочной полиэтиленовой пленки в виде 5-литрового пакета. Камеры, через которые прокачивалась газовая радиоактивная смесь в виде $^{14}\text{CO}_2 + ^{12}\text{CO}_2$, с помощью резиновых шлангов герметично соединялись с газгольдером. При изучении фотосинтеза в камеру укладывалось по 3 образца побегов каждого возраста одновременно со всех объектов (всего до 30 образцов), что обеспечивало для побегов, кроме прочих равных условий, однородность световых условий. При изучении оттока ассимилятов в камеру помещались верхние 3–4 мутовки дерева. Удельная радиоактивность газовой смеси в замкнутой системе при изучении

фотосинтеза составляла 0,2 МБк/л, при изучении оттока ассимилятов – 8,0 МБк/л, продолжительность прокачки радиоактивной смеси через камеру – 10 и 30 мин соответственно. Одновременно над камерой через каждые 2 мин замерялась освещенность. Сроки отбора растительных образцов (хвоя разных возрастов, корни, древесина) при изучении оттока ассимилятов в каждом конкретном опыте определялись в соответствии с принятым регламентом опыта. Собранный и абсолютно высушенный растительный радиоактивный материал измельчался медным пестиком в медной ступке с ребристой нарезкой. Замеры радиоактивности собранных образцов (учет количества распадов ядер ^{14}C поглощенного радиоуглерода – имп./мин) проводились на низкофоновом радиометре Б-3 со счетчиком β -частиц МСТ-17.

Данные в таблицах и на графике представлены в виде средних арифметических показателей, полученных из 6–8 повторных определений для каждого образца растительной ткани. Прирост верхушечных побегов замерялся с помощью линейки и штангенциркуля не менее чем у 10–12 деревьев для получения среднего показателя.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований освещенности показали, что в летний период максимальное количество солнечного света поступает под полог 25-летнего сосняка лишайникового (89,6 % от полной освещенности), которое полностью соответствует биологической норме для сосны [28]. Подрост ели ограниченное количество света (не более 12,0 % от полного освещения) получает в ельниках и спелых березняках черничных (табл. 1).

Таблица 1

Освещенность на объектах исследования

ПП	Дата проведения опыта	Тип условий местопрорастания	Возраст, лет	Вид рубки	Процент рубки по запасу	Освещенность	
						тыс. лк	%
1	20 июня 1988 г.	Ельник черничный	127	Контроль	0	7,7	13,2
				Выборочная	48	14,8	25,6
				Открытое место	100	58,3	100,0
2	6 июня 2001 г.	Березняк черничный	59	Контроль	0	8,8	11,6
				Выборочная	52	35,6	47,5
				Открытое место	100	75,9	100,0
3	9 июня 1981 г.	Сосняк лишайниковый	25	Опыт	0	58,8	89,6
				Открытое место	100	65,6	100,0

Примечание: ПП – пробная площадь; контроль – древостой; опыт – участок с удобрениями; открытое место – не покрытый лесом участок.

Такого количества солнечной энергии ели явно не хватает для успешного функционирования, активации хлоропластных фотосинтетических ферментов и выхода ассимилятов из мест производства [28]. Согласно нашим опытным данным и научным сообщениям [5, 7, 12, 13], после вырубki в березняке 52 %, а в ельнике 48 % запаса древесины освещенность стала полностью соответствовать установленной для ели норме.

Первый опыт по изучению скорости оттока ^{14}C -ассимилятов у подростка ели нами был заложен 20.VI.1988 г. в 127-летнем ельнике черничном. Состав древостоя – 8Е1Б1Ос, полнота – 0,79, высота ели – 15,7 м, количество подростка ели – 2,8 тыс. экз./га. Почва – среднemocный песчаный иллювиально-гумусовый подзол, развивающийся на песке. В подстилочном горизонте содержится 22,3 мг подвижного фосфора и 86,0 мг подвижного калия на 100 г почвы, 0,7 % азота. В минеральных горизонтах азота отмечено не более 0,03 %, подвижных соединений фосфора и калия – 0,8 и 36,0 мг на 100 г почвы. За 2 года до начала опыта на площади 17 га была проведена выборочная рубка крупномерных деревьев ели и березы (48 % по запасу и 23 % по числу стволов) с применением узкопачечной технологии. В июне стояла прохладная с переменной облачностью погода (дневная температура 15...16 °С), в июле температура повысилась до 23...25 °С. Освещенность в контроле не превышала 13,2 % от полной, после вырубki 48 % запаса она увеличилась до 26,0 % от полной. Для контрольного древостоя и опытных вариантов было взято по 2 модели подростка ели средней высоты, характеризующиеся интенсивным ростом побегов, 4 верхние мутовки которых были подкормлены радиоуглекислотой ($^{14}\text{CO}_2 + ^{12}\text{CO}_2$). Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние выборочной рубки и внесения азота на скорость оттока и распределения углерода ^{14}C ($R \cdot 10^3$ имп./мин на 1 г абс. сух. массы) у подростка ели в 127-летнем ельнике черничном

Хвоя, корни	Время после экспозиции, ч								
	0,5	24	192	1728	0,5	24	192	1728	
Хвоя в возрасте, лет:	Контрольный древостой				Участок древостоя с рубкой				
	1	8,8	24,2	62,4	26,2	27,3	51,9	66,9	19,8
	2	52,3	44,1	20,9	5,6	78,9	50,2	19,5	4,0
	3	41,5	32,0	20,3	5,1	69,8	50,9	23,3	4,8
	4	24,2	19,8	13,5	3,4	46,6	31,7	17,4	2,9
	Всего	126,8	120,1	116,7	40,3	222,6	184,7	127,1	31,5
	Корни	0	0	0,40	1,31	0	1,27	2,20	0,50
Хвоя в возрасте, лет:	Контрольный древостой + N ₁₈₀				Опытный участок + N ₁₈₀				
	1	9,8	29,9	64,7	27,1	36,9	57,6	60,6	13,7
	2	60,6	48,4	26,4	4,2	92,3	65,4	24,4	3,9
	3	54,4	39,9	21,2	5,4	79,2	64,2	23,7	2,3
	4	27,0	21,2	14,8	3,7	48,4	31,0	14,8	2,0
	Всего	151,8	139,4	127,1	40,4	256,8	218,2	123,5	21,9
	Корни	0	0,21	1,23	1,43	0	1,92	3,54	0,66

Самая высокая интенсивность фотосинтеза у подростка ели отмечена на прореженных участках древостоя с внесенным в них азотом. В контрольной секции без рубки из-за низкой освещенности у подростка 1–4-летней хвоей из газовой смеси суммарно было ассимилировано $126,8 \cdot 10^3$ имп./мин радио-

углерода, на делянке с внесенным азотом – $151,8 \cdot 10^3$ имп./мин, в контроле прореженной секции – $222,6 \cdot 10^3$ имп./мин, на делянке с комплексным уходом (рубка + азот) – $256,8 \cdot 10^3$ имп./мин. Более активному фотосинтезу у подроста на делянках с выборочной рубкой и комплексным уходом способствовала высокая поглотительная и синтетическая работоспособность его корней, которая была связана с улучшенным экспортом в них продуктов фотосинтеза из листа [6, 7, 10, 30]. Такое заключение следует также из данных табл. 2. Максимальное количество радиоуглерода на всех делянках было ассимилировано хвоей 2-го года вегетации. Хвоей 3-го и 4-го годов вегетации за время фотосинтеза было ассимилировано в 1,1–2,1 раза меньше радиоуглерода, чем 2-летней хвоей. Хвоя текущего года к началу опыта была еще не полностью сформирована. За время подкормки при фотосинтезе ею из радиоактивной смеси было извлечено в 3–6 раз меньше углерода ^{14}C , чем хвоей 2-го года вегетации. Наиболее активно молодой хвоей из газовой смеси радиоуглерод поглощался у растений на делянках с комплексным уходом и с одной рубкой – $36,9 \cdot 10^3$ и $27,3 \cdot 10^3$ имп./мин соответственно (в контроле без рубки и внесения азота – $8,8 \cdot 10^3$ имп./мин).

После окончания подкормки, в результате возникшего «запроса» на ассимилянты со стороны формирующихся органов (молодой хвои, корней), синтезированные 2–4-летней хвоей радиоуглеродные метаболиты начали активно перемещаться в места их использования. Известно, что основной транспортной формой углеводов в растении является сахароза. Скорость передвижения ее по ситовидным трубкам флоэмы составляет 40...150 см/ч [20, 24]. В нашем опыте за 1 сут из общего количества накопленных у подроста ели 2–4-летней хвоей ассимилятов в другие органы было перемещено: в контроле – $6,7 \cdot 10^3$ имп./мин; на делянках с выборочной рубкой – $37,9 \cdot 10^3$ имп./мин; на делянках с комплексным уходом – $38,6 \cdot 10^3$ имп./мин. Больше всего ассимилятов поступало в хвою текущего года. За 1 сут в нее дополнительно поступило: в общем контроле (без рубки и удобрений) – $15,4 \cdot 10^3$ имп./мин; на делянках с комплексным уходом – $24,6 \cdot 10^3$ имп./мин. За счет дополнительного притока ассимилятов радиоактивность хвои текущего года за 1 сут в контроле увеличилась в 3,1 раза, на делянках с азотом – в 1,9 раза, на делянках с комплексным уходом – в 1,6 раза. Часть радиоактивных метаболитов $((6,7...37,9) \cdot 10^3$ имп./мин) растениями за этот период израсходовалась на дыхание для поддержания активной жизнедеятельности и была полностью утрачена при ^{14}C -дыхании. Причем у подроста на делянках с уходами таких метаболитов на дыхание было израсходовано значительно больше, чем в контроле. За 7 сут (с 21 по 28 июня) радиоактивность хвои текущего года в контроле еще увеличилась на 61 %, на опытных делянках – на 5...54 %. В этот период особенно мало (5 %) радионуклидов в формирующуюся хвою поступило у подроста на делянке с комплексными уходами. Эти данные свидетельствуют о том, что к указанному сроку молодой ассимиляционный аппарат у подроста на участке с рубкой и азотом уже полностью перешел на питание собственными ассимилятами и стал донором их для ствола. На других опытных участках, и особенно в контроле, переход нового молодого ассимиляционного аппарата на самостоятельное углеродное питание из-за недостатка света и азотного питания значительно задержался.

Отток ^{14}C -ассимилятов из хвои прошлых лет, а позднее также из молодой хвои, у подроста продолжался до окончания вегетационного периода. В конце срока наблюдений (сентябрь) остаточная радиоактивность 2–4-летней

хвои в мутовках узла введения не превышала $(8,2 \dots 14,1) \cdot 10^3$ имп./мин. Через 72 дн. (1728 ч), перед окончанием вегетационного периода, в хвое контрольных растений, несмотря на их низкую исходную радиоактивность, таких метаболитов по отношению к первоначальному периоду оставалось значительно больше, чем у елочек на делянках с уходами. Эти данные доказывают, что на Севере выборочные рубки в ельниках черничных за счет увеличения освещенности и последующего через 2 года дополнительного внесения в разреженные древостои азота позволяют значительно сокращать у подроста ели период формирования нового ассимиляционного аппарата и обеспечивают более ранний переход его на полное собственное углеродное питание.

После окончания подкормки, в результате возникшего «запроса», часть ассимилятов из 2–4-летней хвои по системе ближнего и дальнего транспорта, кроме молодой хвои, перетекла также в корневую систему. Причем максимальное количество радиоуглеродных метаболитов у подроста в корневую систему поступило на делянках с рубкой и комплексным уходом. На контрольном участке за 1-е сутки меченый углерод в корни подроста еще не поступил. Радиоактивная метка в его корнях была обнаружена только на 8-е сутки. Известно, что средняя скорость внутриклеточного транспорта органических веществ (сахарозы) в листьях растений составляет 2,0...4,5 см/ч, в ситовидных трубках флоэмы – 40...150 см/ч [20, 24]. Следовательно, выборочные рубки и азот у подроста ели в ельниках черничных ускоряют передвижение органических соединений. На разреженных участках эти метаболиты у подроста значительно раньше поступают в места их использования (в хвою текущего года и корни), чем в неухоженных насаждениях, способствуя их более активному росту.

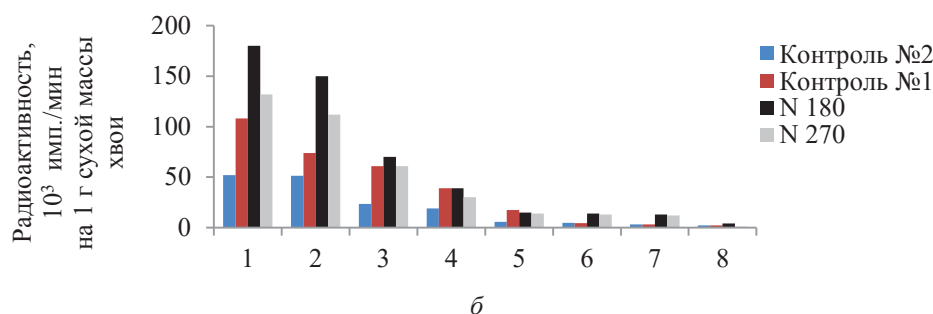
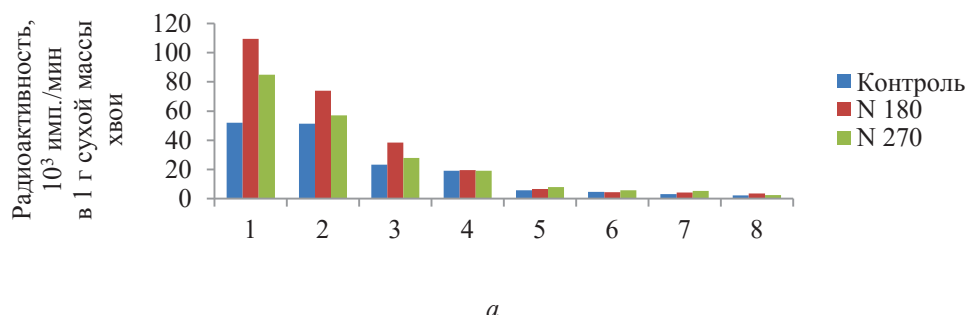
Считается [18, 20, 21], что после переработки некоторое количество поступивших в корни ассимилятов в виде корневых метаболитов по ксилеме вместе с поглощенными корнями минеральными веществами и водой вновь возвращается в надземную часть дерева, где используется для синтеза сложных органических соединений и на ростовые процессы вегетативных органов. Из данных табл. 2 видно, что у подроста ели на разреженных участках, особенно на участках с комплексным уходом, переработка поступивших в корни ассимилятов протекает более активно, и они раньше, чем у ели на контрольных участках, в виде корневых метаболитов вновь возвращаются в надземную часть дерева. У подроста на контрольной делянке за весь период (72 дн.) в корни поступило $1,31 \cdot 10^3$ имп./мин, на делянке с комплексным уходом – $3,54 \cdot 10^3$ имп./мин. За это время у контрольных растений весь объем поступившего в корни углерода ^{14}C сохранился на исходном уровне. На делянке с комплексным уходом большая часть поступивших в корни радиоуглеродных соединений за этот период после их переработки вновь возвратилась в надземную часть дерева, где, по-видимому, участвовала в формировании прироста. В результате остаточная радиоактивность корней у подроста на делянке с комплексным уходом не превышала $0,66 \cdot 10^3$ имп./мин (в контроле – $1,31 \cdot 10^3$ имп./мин). Наблюдающееся у подроста на делянках с выборочной рубкой и с комплексным уходом ускоренное и увеличенное поступление ассимилятов в корни, их последующий после переработки быстрый возврат в надземную часть дерева должны были способствовать повышению поглотительной и синтетической деятельности его корневой системы и лучшему росту всего дерева. Об этом свидетельствуют результаты исследований многих авторов [2–7, 9–15]. Считается, что формирование урожая (запасание продуктов фотосинтеза в хозяйственно важных органах) определяется уровнем фотосинтеза донорных листьев,

который, в свою очередь, зависит от «запроса» со стороны акцептора ассимилятов [8, 20, 21, 24, 30]. Проведенные нами через 6 лет замеры побегов показали, что среднепериодический прирост верхушечных побегов у среднего подроста ели в общем контроле, на делянках с рубкой и на делянках с комплексными уходами составил $3,4 \pm 0,5$; $5,3 \pm 0,7$; $6,5 \pm 0,8$ см, через 10 лет – $3,3 \pm 0,5$; $6,7 \pm 1,0$; $8,1 \pm 0,8$ см соответственно.

На Севере влияние интенсивности рубки и азота на скорость оттока и передвижения ассимилятов у подроста ели в березняках черничных до последнего времени не изучалось. Нами в 59-летнем березняке черничном IV класса бонитета со вторым ярусом и подростом ели (на контроле и на секциях с разной интенсивностью рубки) 6 июня 2001 г., через 2 нед. после внесения в него азота, для опыта у среднего подроста ели 5 верхушечных мутовок были подкормлены радиоуглекислотой ($^{14}\text{CO}_2 + ^{12}\text{CO}_2$). Площадь участка 65 га, рельеф равнинный. Состав первого яруса древостоя – 7Б3Ос+С, второго – 10Е. Высота березы – 6,1 м, диаметр – 14, 2 см, класс бонитета – III. Сомкнутость полога при полном облиствлении березы и осины составляет 1,0. Подрост ели – 4,3 тыс. экз./га. Почва слабоподзолистая свежая, развивающаяся на тяжелом суглинке. В подстилке содержится 0,78 % общего азота, 33,1 мг подвижного фосфора, 77,1 мг подвижного калия на 100 г почвы. Вниз по почвенному профилю азота выявлены сотые доли процента (0,04 %), подвижные фосфор и калий – в количестве 7,2 и 5,2 мг на 100 г почвы. На площади 20 га в осенне-зимний период 1998–1999 гг. промышленным способом на базе машин харвестер (софит-х) + форвардер (софит-6ф) проведена выборочная вырубка лиственных пород с вывозкой сортиментов. Сохранность подроста ели после рубки составила 76...90 %, состояние хорошее и удовлетворительное. На участке были подготовлены секции с разной интенсивностью рубки (35; 52 и 70 %) и контрольная. Во время эксперимента стояла теплая солнечная погода с дневной температурой $23,6^\circ\text{C}$. Освещенность на контрольной секции – 12 %, на секциях с рубкой – 19...87 % от полной. Длина распускающихся молодых побегов у подроста ели на всех секциях небольшая (0,5 см).

Результаты анализа образцов радиоактивной хвои показали, что за время подкормки у подроста ели на секции без рубки хвоей текущего года (в расчете на 1 г абс. сухой массы) в контроле было ассимилировано $4,1 \cdot 10^3$ имп./мин радиоуглерода, на делянках с азотом (N_{180} , N_{270}) – $8,0 \cdot 10^3$ и $3,4 \cdot 10^3$ имп./мин соответственно. Хвоей 2-го года поглощено в 13–25 раз больше, чем молодой хвоей, а 3-летней хвоей – на 6...11 % меньше, чем 2-летней. На долю 2–3-летней хвои пришлось почти 95 % всего поглощенного растениями радиоуглерода. Всего за время фотосинтеза 1–3-летней хвоей в контроле и на опытных площадках (N_{180} , N_{270}) контрольной секции было ассимилировано $103,6 \cdot 10^3$; $215,1 \cdot 10^3$; $162,4 \cdot 10^3$ имп./мин радиоуглерода, а на секции с рубкой (52 %) – соответственно $213,3 \cdot 10^3$; $349,8 \cdot 10^3$; $257,7 \cdot 10^3$ имп./мин, или в 1,5–2 раза больше (см. рисунок).

Высокому фотосинтезу у контрольных и опытных (N_{180} и N_{270}) елочек на секции с рубкой в этот период способствовало достаточно активное дыхание корней ($1,08 \pm 0,13$; $1,39 \pm 0,14$; $1,46 \pm 0,18$ мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$ соответственно), в 1,9–2,3 раза превышавшее дыхание контрольных и удобренных азотом елочек в неухоженном древостое [6–9, 12, 13]. Повышенная доза азота в данный период несколько снизила фотосинтетическую и донорно-акцепторную активность у подроста. На площадках с дозой N_{270} на контрольной секции и на секции с рубкой 1–3-летней хвоей из газовой смеси было поглощено в 1,4 раз меньше углерода ^{14}C , чем на площадках с дозой N_{180} .



Влияние дозы азота и выборочной рубки на скорость оттока ^{14}C - ассимилятов из 2-летней хвои у подростка ели в 59-летнем березняке черничном: *а* – контрольная секция; *б* – секция с выборочной рубкой (контроль № 1 – участок древостоя с выборочной рубкой; контроль № 2 – участок без рубки и удобрений); 1 – 8 – сроки отбора образцов после подкормки (1 – 0,5 ч; 2 – 1 сут; 3 – 8 сут; 4 – 16 сут; 5 – 45 сут; 6 – 70 сут; 7 – 95 сут; 8 – 1 год)

The effect of nitrogen dose and selective cutting on the outflow rate of ^{14}C -assimilate from 2-year-old needles of spruce undergrowth in 59-year-old blueberry birch forest: *a* – control section; *б* – section with selective cutting (control No. 1 – stand with selective cutting; control No. 2 – stand without cutting and fertilizers); 1–8 – timing of sampling after top dressing (1 – 0.5 h; 2 – 1 d; 3 – 8 d; 4 – 16 d; 5 – 45 d; 6 – 70 d; 7 – 95 d; 8 – 1 yr)

Молодая хвоя на участке с рубкой к началу опыта (6 июня), несмотря на улучшенные световые условия, оставалась еще не полностью сформированной и продолжала быть активным акцептором ассимилятов, поступающих к ней из хвои старших возрастов, за счет которых и осуществлялось ее первоначальное формирование. Только за первые сутки радиоактивность молодой хвои у контрольных и опытных (N_{180} , N_{270}) растений на секции без рубки увеличилась в 20 раз (с 4,1 тыс. до 81,2 тыс. имп./мин), на секции с рубкой – в 28 раз. Радиоактивность 2-летней хвои через сутки у контрольных растений на секции без рубки сохранилась на первоначальном уровне, на секции с рубкой в результате оттока из нее радионуклидов уменьшилась на 31 %, а на делянках с внесенным азотом и рубкой не превышала 18 % от первоначальных значений. В этот период радиоактивность 2-летней хвои у контрольных и опытных (N_{180} , N_{270}) елочек на секции с рубкой составляла $74,4 \cdot 10^3$; $149,3 \cdot 10^3$; $112,0 \cdot 10^3$ имп./мин, на секции без рубки – $51,5 \cdot 10^3$; $74,4 \cdot 10^3$; $57,0 \cdot 10^3$ имп./мин соответственно. Радиоактивность 3-летней хвои за сутки сократилась на 21...32 %. В дальнейшем отток ассимилятов из хвои у контрольных (без рубки) и опытных елочек на секции с рубкой также протекал более интенсивно, чем у контрольных.

Переход молодой хвои на самостоятельное углеродное питание у подроста на секции с рубкой произошел 13 июня, после того, как она достигла половины своего максимального размера (0,6 см – в контроле; 0,7 см – у опытных елочек). К 21 июня ее радиоактивность у контрольных и опытных (N_{180} , N_{270}) елочек на этой секции уменьшилась на $87,8 \cdot 10^3$; $109,9 \cdot 10^3$; $98,1 \cdot 10^3$ имп./мин и составила соответственно $110,1 \cdot 10^3$; $208,0 \cdot 10^3$; $160,2 \cdot 10^3$ имп./мин. На контрольной секции переход хвои текущего года на самостоятельное углеродное питание произошел только к 21 июня, т. е. на неделю позже, чем у подроста на секции с выборочной рубкой. К этому сроку радиоактивность молодой хвои у контрольных растений данной секции по отношению к 13 июня дополнительно выросла еще в 2,3 раза, на делянках с N_{180} – на 72 %, на делянках с N_{270} превышала контроль на 22 % ($220,6 \cdot 10^3$ имп./мин). Из этого следует, что выборочные рубки и внесение азота у подроста ели в березняках черничных значительно ускоряют формирование нового ассимиляционного аппарата и способствуют более раннему переходу его на самостоятельное углеродное питание. Через год у контрольных и опытных елочек радиоактивность молодой хвои на обеих секциях не превышала $(1,4 \dots 2,4) \cdot 10^3$ имп./мин, 2–3-летней хвои – $(1,3 \dots 4,0) \cdot 10^3$ имп./мин.

В корнях следы радиоуглерода были обнаружены лишь на вторые сутки и только у опытных растений на секции с рубкой. На контрольной секции радиоуглерод в корни подроста в этот период еще не поступил. Через 8 сут на секции с выборочной рубкой радиоактивность корней в контроле составляла $1,96 \cdot 10^3$ имп./мин, на опытных площадках (N_{180} , N_{270}) – $2,42 \cdot 10^3$ и $1,58 \cdot 10^3$ имп./мин соответственно. На секции без рубки радиоактивность корней была в 1,5–3,0 раза ниже, чем на секции с рубкой, но при максимальных значениях ее у опытных растений. Радиоактивность коры, луба и древесины ствола у контрольных и опытных моделей на контрольной секции во все сроки оставалась существенно ниже, чем на секции с рубкой [6–8, 12].

Сопоставление действия на ель разных концентраций азота между собой показало, что повышенная доза азота у подроста ели как на контрольной, так и на опытной секции отрицательно повлияла на передвижение и распределение углерода ^{14}C , на донорно-акцепторные отношения. Эта доза азота у подроста ели привела к затовариванию листьев ассимилятами и снижению фотосинтеза. Результатом негативного действия повышенной дозы азота явилась значительная потеря подростом дополнительного прироста. Так, ширина годичного кольца у среднего подроста за 3 года внесения азота в контроле и на опытных делянках (N_{180} , N_{270}) на секции без рубки составляла $0,41 \pm 0,02$; $0,69 \pm 0,03$; $0,54 \pm 0,03$ мм, на секции с выборочной рубкой – $0,63 \pm 0,03$; $2,14 \pm 0,06$; $1,74 \pm 0,03$ мм соответственно. Аналогичные результаты действия азота у подроста ели ранее нами были получены и в 53-летнем березняке черничном на секциях с разными интенсивностью рубки и дозами внесенного в них азотного удобрения [6–9, 13].

Следующий опыт был заложен нами в 25-летнем сосняке лишайниковом, в котором у сосны изучалось действие разных доз азота (N_{120} , N_{180} , N_{240}) на скорость передвижения и распределения C^{14} . Состав древостоя – 10С, высота сосны – 1,9 м, сомкнутость полога – 0,5, почва – подзол иллювиально-железистый песчаный. В его подстилочном горизонте содержится 0,36 % азота, 5,6 мг подвижного фосфора и 50,0 мг подвижного калия на 100 г почвы. Остальные горизонты бедны азотом (следы). Содержание в них подвижных форм калия – не более 4,0 мг, фосфора – 1,9...15,0 мг на 100 г почвы. В насаждение мочевины внесена 9 июня 1981 г. в дозах N_{120} , N_{180} и N_{240} д. в. Ввиду небольшой высоты (1,8...2,5 м) и отсутствия затеняющего полога в виде материн-

ских деревьев все опытные деревья были хорошо и равномерно освещены. Поэтому их физиологическая активность определялась лишь условиями почвенного питания. Подкормка 3 верхушечных мутовок радиоактивной углекислотой ($^{14}\text{CO}_2 + ^{12}\text{CO}_2$) проведена 30 июня, через 3 недели после внесения удобрений. Перед подкормкой и в последующие дни стояла сухая жаркая погода с дневными температурами 24...26 °С и ночными температурами 17...19 °С. У сосны наблюдалось активное формирование прироста апикальных и латеральных побегов, на молодых побегах стала появляться новая хвоя. В день подкормки длина молодой хвои составляла 1,0...1,5 см. В каждом опытном варианте и в контроле радиоуглекислотой было подкормлено по 2 дерева. Образцы растительных тканей для анализа отбирались через 0,5; 6; 24; 192 ч. Поскольку эффективность действия дозы N_{120} для сосны в нашем опыте оказалась малоэффективной, здесь ограничились лишь данными, полученными с дозами N_{180} и N_{240} . Результаты опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние дозы азота на скорость оттока и распределения углерода ^{14}C ($R \cdot 10^3$ имп./мин на 1 г сух. вещества) в хвое сосны в сосняке лишайниковом

Хвоя, корни	Срок наблюдений, ч											
	0,5	6	24	192	0,5	6	24	192	0,5	6	24	192
	Контроль				N_{180}				N_{240}			
Хвоя:												
1-го года	61	124	313	289	71	112	341	196	57	99	274	243
2-го года	325	235	86	27	364	311	70	27	278	210	65	28
Всего	386	359	399	316	435	423	411	223	335	309	339	271
Корни	0	0	0,3	1,5	0	0	0,6	2,1	0	0	0,3	1,2

Всего за время экспозиции (0,5 ч) молодой хвоей сосны во время фотосинтеза на контрольной и опытных (N_{180} , N_{240}) делянках из радиоактивной смеси было ассимилировано $61,4 \cdot 10^3$; $71,3 \cdot 10^3$; $56,6 \cdot 10^3$ имп./мин соответственно, хвоей 2-го года вегетации – в 5 раз больше. Активному фотосинтезу в это время способствовала достаточно высокая интенсивность дыхания мелких микоризных корней ($1,2...2,1$ мг CO_2 /(г · ч)) размером до 1,5 мм и ростовых корней ($0,8...1,2$ мг CO_2 /(г · ч)) размером 1,5...3,0 мм) [9, 11].

Исследования показали, что у сосны к началу подкормки (30 июня) молодая хвоя продолжала оставаться активным акцептором ассимилятов, поступающих к ней из хвои прошлых лет, за счет которых и шло ее первоначальное формирование. На это указывает дальнейшее достаточно быстрое повышение ее радиоактивности уже после подкормки. Через 6 ч после подкормки радиоактивность молодой хвои дополнительно увеличилась еще на 51 %, а через сутки возросла почти в 5 раз. Опыты П.И. Юшкова [25] показывают, что в период формирования в молодой хвое происходят интенсивное включение ассимилированных радионуклидов в полимерные соединения и их закрепление в конституционных структурах клеточных стенок. Подтверждением служат и наши более ранние исследования, проведенные с елью в сосняках осушаемом кустарничково-сфагновом и лишайниковом [11, 15]. Согласно данным Н.П. Чернобровкиной [23], в этот период молодая хвоя сосны также является активным потребителем почвенного азота.

Радиоактивность прошлогодней хвои в результате оттока из нее радиоактивных метаболитов уже после окончания подкормки начала быстро сокращаться. За 6 ч она уменьшилась на 14...25 %. В дальнейшем радиоактивность ее также продолжала снижаться, как и радиоактивность 2-летней хвои, а радиоактивность молодой хвои в связи с продолжающимся притоком к ней радиоуглеродных соединений возрастала. В течение первых суток радиоактивность молодой хвои по сравнению с первоначальными показателями увеличилась на 79...81 %, а радиоактивность 2- и 3-летней хвои уменьшилась на 74...81 %. Только к 8 июля молодая хвоя, достигнув половины (1,6 см – в контроле; 2,4...2,7 см – в опыте) своего максимального размера, перешла на питание собственными ассимилятами и стала их активным донором для органов дерева. На это указывает начавшееся значительное снижение ее радиоактивности в этот период, что согласуется с данными наших более ранних исследований [10–12, 14, 15] и данными других авторов [17, 23, 29]. И.С. Малкина [17] с помощью анализа радиоактивных образцов установила, что у сосны молодая хвоя, достигнув 25 % от окончательной величины, для своего роста начинает использовать собственные ассимиляты, а хвоя длиной 50 % от окончательной величины способна уже полностью обеспечивать себя ассимилятами и в дальнейшем экспортировать их в другие органы. Т.К. Головкин [2] отмечает, что прежде, чем лист станет экспортером ассимилятов, он должен достигнуть достаточно высокой фотосинтетической активности для того, чтобы количество образовавшихся в нем ассимилятов смогло превысить его собственные потребности на рост и поддержание жизнедеятельности. Исходя из наших экспериментальных данных, можно полагать, что в лишайниковых сосняках арктической зоны такой период у молодой хвои сосны наступает не раньше первой декады июля. До этого срока формирование нового ассимиляционного аппарата у сосны в основном осуществляется за счет импорта метаболитов, поступающих к нему из хвои старших возрастов. Согласно нашим исследованиям, к 8 июля радиоактивность хвои текущего года сократилась по сравнению с ее максимальными значениями на 11...43 %, 2-летней хвои – в 9,8–13,4 раза. В этот период радиоактивность молодой и 2-летней хвои в контроле составляла $289 \cdot 10^3$ и $26 \cdot 10^3$ имп./мин, на опытных делянках (N_{180} , N_{240}) – соответственно $(195,7...234,3) \cdot 10^3$ и $(27,2...28,3) \cdot 10^3$ имп./мин.

В корнях следы радиоуглерода были обнаружены лишь на вторые сутки, а спустя 8 суток радиоактивность корней уже достигла $(1,11...2,07) \cdot 10^3$ имп./мин. Однако концентрация радиоуглерода в корнях оставалась в десятки раз ниже, чем в хвое подкормленной верхушечной мутовки деревьев.

В период интенсивного роста молодых побегов в боковых ветвях мутовки, расположенной ниже подкормленной, радиоуглерод нами был также обнаружен, но в очень ограниченном количестве. Его содержание в хвое текущего года данной мутовки не превышало $4,0 \cdot 10^3$ имп./мин, в хвое 2-го года вегетации – $2,3 \cdot 10^3$ имп./мин. Появление радиоактивной метки в стебле ниже донорного участка отмечалось и у травянистых растений [2, 8]. По лабораторным исследованиям П.И. Юшкова [25], радиоактивные продукты фотосинтеза у сосны в мутовки, расположенные ниже подкормленной, вообще не поступают. Обнаруженный нами факт появления радиоактивной метки в молодой формирующейся хвое ниже узла введения, вероятно, можно объяснить усилением акцепторной активности ветвей такой мутовки в результате их недоразвития к этому сроку.

Азотные удобрения в древостоях являются одним из действенных экзогенных регуляторов, оказывающих у сосны и ели влияние на состояние донорно-акцепторных отношений, фотосинтез и активность ростовых процессов [11, 13, 14, 18, 26, 27, 29, 30]. Анализ результатов наших исследований на деревьях, подкормленных разными дозами азота, показал, что за период подкормки больше всего радиоуглерода из газовой смеси было ассимилировано деревьями на делянках с дозой азота 180 кг/га. На делянках с повышенной дозой азота (240 кг/га) меченого углерода растениями было поглощено на 23 % меньше, чем на площадках с N_{180} . Эта доза азота у сосны нарушила нормальную работу корневой системы, а в верхних слоях почвы привела даже к гибели части мелких корневых окончаний [13]. За время подкормки у контрольных растений 1–2-летней хвоей радиоуглерода из газовой смеси было ассимилировано $397,0 \cdot 10^3$ имп./мин, у опытных растений (N_{180} , N_{240}) – соответственно $434,8 \cdot 10^3$ и $334,3 \cdot 10^3$ имп./мин. Больше всего меченого углерода было поглощено хвоей 2-го года вегетации. Молодой хвоей, только что освободившейся от покровных чехликов, радиоактивного углерода из газовой смеси было ассимилировано в 5,5 раза меньше, чем 2-летней хвоей. Повышенная доза азота (N_{240}) у сосны задержала развитие нового ассимиляционного аппарата и существенно снизила его акцепторную способность по поглощению $^{14}\text{CO}_2$.

Наибольшее количество радиоуглеродных соединений в транспортную сеть за сутки поступило у растений на делянке с дозой N_{180} . У контрольных растений под действием этой дозы за первые 6 ч из 2-летней хвои в другие органы перетекло $90,8 \cdot 10^3$ имп./мин, у опытных растений (N_{180} и N_{240}) – $52,1 \cdot 10^3$ и $68,2 \cdot 10^3$ имп./мин, за сутки – соответственно $240,0 \cdot 10^3$; $293,1 \cdot 10^3$ и $213,2 \cdot 10^3$ имп./мин.

Основная масса оттекающих радионуклидов поступила в молодую хвою, где использовалась на формирование нового ассимиляционного аппарата. За первые сутки из суммарного количества поступивших в транспортную сеть ассимилятов у контрольных растений в молодую хвою перетекло $251,6 \cdot 10^3$ имп./мин, у опытных (N_{180} и N_{240}) – соответственно $217,4 \cdot 10^3$ и $269,9 \cdot 10^3$ имп./мин. Эти данные показывают, что у сосны в сосняках лишайниковых доза азота 180 кг/га ускоряет, а повышенная доза этого элемента (N_{240}), как и его недостаток, задерживает отток ассимилятов из хлоропластов и формирование нового ассимиляционного аппарата.

К окончанию срока наблюдений (8 июля) радиоактивность молодой хвои у всех моделей сосны начала постепенно сокращаться, что указывало на начало перехода молодой хвои на самостоятельное углеродное питание. К этому сроку ее радиоактивность уменьшилась: в контроле – на 8 %, на опытных площадках (N_{240} и N_{180}) – на 11 и 43 % соответственно. Радиоактивность хвои 2-го года в течение этого периода также продолжала снижаться. За 8 суток из нее в транспортную сеть больше всего ассимилятов поступило у растений на площадках с дозой N_{180} ($336,3 \cdot 10^3$ имп./мин), минимальное их количество – с дозой N_{240} ($249,4 \cdot 10^3$ имп./мин). В контроле за 8 суток из хвои 2-го года в другие органы было аттрагировано $299,0 \cdot 10^3$ имп./мин.

Наблюдаемая у сосны на делянках с N_{180} ускоренная и увеличенная эвакуация ассимилятов дает основание полагать, что она обусловлена повышенными запросами на ассимиляты со стороны аттрагирующих органов (молодой хвои, камбия, корней), которые после улучшения корневого питания стали

активными потребителями их. Об этом свидетельствуют также результаты наших более ранних опытов в других древостоях [4, 10, 11, 14].

Известно, что вырабатываемые хлоропластами ассимиляты в листе долго не задерживаются, а по системе ближнего и дальнего транспорта переносятся в места потребления, где используются растением для выработки важнейших биологических соединений и образования дополнительного прироста [2, 9, 12, 20, 21]. В нашем опыте количество меченых продуктов, поступивших у сосны в корни, оказалось тесно связанным с условиями корневого питания. Проведенный анализ радиоактивных образцов показал: больше всего меченого углерода поступило в корни растений на делянках с дозой азота 180 кг/га ($2,1 \cdot 10^3$ имп./мин – в мелкие корни, $1,2 \cdot 10^3$ имп./мин – в проводящие), что на 40 % больше, чем в контроле, и на 52 % значительнее, чем на площадках с N_{240} . Наиболее активно ассимиляты поступали в мелкие корни. Радиоактивность проводящих корней была на 40 % ниже.

Выше отмечалось, что ассимиляты в корнях после переработки вновь возвращаются в надземные органы в виде продуктов корневой деятельности. Поэтому можно полагать, что у растений с дозой N_{180} в надземную часть корневых метаболитов возвращается значительно больше, чем в контроле и на площадке с N_{240} . Об этом свидетельствует достаточно быстрое снижение радиоактивности корней у сосны на делянках с этой дозой азота. Доза азота N_{180} у сосны обеспечивала активный рост не только всех ее вегетативных органов, но и рост массы всего дерева [16].

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что у подростка ели и молодняка сосны в северотаежных фитоценозах до конца июня почти все ассимиляты, вырабатываемые хвоей прошлых лет, расходуются на формирование нового ассимиляционного аппарата и поддержание дыхания, лишь их небольшая часть оттекает в ствол и корни. Выборочные рубки и внесение азота в благоприятных дозах у подростка ели усиливают ассимиляцию атмосферного CO_2 , способствуют более активному перемещению меченых ассимилятов из донорной хвои к точкам роста. Недостаток солнечной радиации и повышенные дозы азота у сосны и ели нарушают нормальные донорно-акцепторные отношения, приводят к «затовариванию» хвои ассимилятами. Ранее показано [8, 20, 21], что избыточное накопление ассимилятов в листе при нарушении донорно-акцепторных отношений может провоцировать гормональную перероориентацию клеток листа с экспортной функции сахаров на акцепторную – на использование ассимилятов клетками для собственного роста в ущерб общей продуктивности растения. Имеющиеся в литературе [18, 20, 24, 29] данные указывают на то, что азот в корнях и листьях стимулирует синтез эндогенных фитогормонов. Последние выступают в качестве важного регуляторного механизма транспорта ассимилятов, способствуют активному перемещению их из листа к потребляющим органам [1, 2, 20, 21, 29]. Эти положения подтверждены и результатами данного исследования, в ходе которого установлено, что по уровню активности донорно-акцепторной системы уже в течение 1–2 лет для сосны и ели в древостоях можно подобрать такие систему рубок и дозу вносимого в них азота, которые в наибольшей мере будут соответствовать их потребностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Борзенкова Р.А., Зорина М.В. Влияние кинетина и абсцизовой кислоты на фотосинтез, отток и распределение С-ассимилятов у растений картофеля // Физиология растений. 1990. Т. 37, вып. 3. С. 146–154. [Borzenkova R.A., Zorina M.V. Effect of Kinetin and Absciscic Acid on Photosynthesis, Outflow and Distribution of C-Assimilates in Potato Plants. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1990, vol. 37, iss. 3, pp. 146–154].
2. Головки Т.К. Дыхание растений. Физиологические аспекты. СПб.: Наука, 1999. 204 с. [Golovko T.K. *Respiration of Plants. Physiological Aspects*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 1999. 204 p.].
3. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Влияние рубок на фотосинтез и отток ^{14}C -ассимилятов у подростка ели в березняках черничных // Вестн. ПГУ. Сер.: Естеств. науки. 2011. № 3. С. 49–54. [Zarubina L.V., Konovalov V.N. Influence of Thinning on Photosynthesis and the Outflow of ^{14}C -Assimilates of Spruce Undergrowth in Bilberry Birch Forests. *Vestnik Pomorskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki* [Vestnik of Pomor University. Series “Natural and Exact Sciences”], 2011, no. 3, pp. 49–54].
4. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Эколого-физиологические особенности ели в березняках черничных. Архангельск: Изд-во САФУ, 2014. 378 с. [Zarubina L.V., Konovalov V.N. *Ecological and Physiological Features of Spruce in Bilberry Birch Forests*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2014. 378 p.].
5. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Эколого-физиологические особенности ели в северотаежных фитоценозах (состояние, антропогенное влияние). Архангельск: Изд-во САФУ, 2015. 186 с. [Zarubina L.V., Konovalov V.N. *Ecological and Physiological Features of Spruce in Northern Taiga Phytocenoses (Condition and Anthropogenic Impact)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 186 p.].
6. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Влияние прореживания и азота на сезонную динамику дыхания корней сосны и ели // Изв. вузов. Лесн. журн., 2016. № 1. С. 100–114. [Zarubina L.V., Konovalov V.N. Influence of Thinning and Nitrogen on Seasonal Dynamics of Pine and Spruce Root Respiration. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 1, pp. 100–114]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.1.100](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.1.100), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/260/zarubina.pdf>
7. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н., Феклистов П.А., Клевцов Д.Н. Динамика дыхания корней сосны и ели в северотаежных фитоценозах // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014. № 2. С. 52–60. [Zarubina L.V., Konovalov V.N., Feklistov P.A., Klevtsov D.N. Dynamics of Roots Respiration of Pine and Spruce Trees of Northern Taiga Plant Communities. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series “Natural Sciences”], 2014, no. 2, pp. 52–60].
8. Киризи Д.А., Франтийчук В.В., Стасик О.О. Содержание растворимых углеводов и старение флагового листа пшеницы при экспериментальном блокировании оттока ассимилятов // Физиология растений и генетика. 2015. Т. 47, № 2. С. 136–146. [Kiriziy D.A., Frantiychuk V.V., Stasik O.O. Content of Soluble Carbohydrates and Senescence of Wheat Flag Leaf Induced by Experimental Assimilates Outflow Interruption. *Fiziologiya rasteniy i genetika* [Plant Physiology and Genetics], 2015, vol. 47, no. 2, pp. 136–146].
9. Климович С.В., Трунова Т.И., Мокроносов Т.И. Механизм адаптации растений к неблагоприятным условиям окружающей среды через изменение донорно-акцепторных отношений // Физиология растений. 1990. Т. 37, вып. 5. С. 1024–1035. [Klimovich S.V., Trunova T.I., Mokronosov T.I. The Mechanism of Plant Adaptation to Unfavorable Environmental Conditions through a Change in Donor-Acceptor Interactions. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1990, vol. 37, iss. 5, pp. 1024–1035].
10. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах. Архангельск: Изд-во САФУ, 2011. 338 с. [Konovalov

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

11. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Влияние дозы азота при подкормках на отток ^{14}C -ассимилятов у сосны в сосняках лишайниковых // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 1. С. 7–13. [Konovalov V.N., Zarubina L.V. Impact of Nitrogen Dose on the ^{14}C -Assimilates Outflow in Pine Trees at the Lichen Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 1, pp. 7–13]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b50/xnxx1.pdf>

12. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Отток и распределение ^{14}C -ассимилятов у ели при выборочных рубках в северотаежных фитоценозах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 40–55. [Konovalov V.N., Zarubina L.V. Outflow and Distribution of Spruce ^{14}C -Assimilates after Selective Felling in the Northern Taiga Phytocenosis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 40–55]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.2.40](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.40), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a87/40_55.pdf

13. Коновалов В.Н., Листов А.А. Влияние условий минерального питания на дыхание корней сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 1989. № 4. С. 15–19. [Konovalov V.N., Listov A.A. Influence of Mineral Nutrition Conditions on Respiration of Scots Pine Roots. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1989, no. 4, pp. 15–19].

14. Коновалов В.Н., Садкова А.Н., Зарубина Л.В. Биология и рост сосны обыкновенной в северотаежных фитоценозах // Архангельск: Изд-во САФУ, 2017. 175 с. [Konovalov V.N., Sadkova A.N., Zarubina L.V. *Biology and Growth of Scots Pine in Northern Taiga Phytocenoses*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 175 p.].

15. Коновалов В.Н., Тараканов А.М., Зарубина Л.В. Влияние рубок ухода на отток ^{14}C -ассимилятов у подроста ели на осушаемых землях // Наука – северному региону: сб. науч. тр. Архангельск: САФУ, 2010. Вып. 83. С. 10–15. [Konovalov V.N., Tarakanov A.M., Zarubina L.V. Influence of Improvement Thinning on Outflow of ^{14}C -Assimilates in Spruce Undergrowth on Drain in Lands. *Collection of Academic Papers "Science to the Northern Region"*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010, iss. 83, pp. 10–15].

16. Листов А.А., Коновалов В.Н. Влияние минеральных удобрений на сезонный рост сосны в высоту // Лесоведение. 1988. № 1. С. 33–42. [Listov A.A., Konovalov V.N. Influence of Mineral Fertilizers on Seasonal Apical Growth of Pine. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1988, no. 1, pp. 33–42].

17. Малкина И.С. Газообмен и образование ассимилятов в разновозрастной хвое сосны обыкновенной // Лесоведение. 1984. № 6. С. 29–33. [Malkina I.S. Gas Exchange and Formation of Assimilates in Uneven Needles of Scots Pine. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1984, no. 6, pp. 29–33].

18. Меняйло Л.Н. Гормональная регуляция ксилогенеза хвойных. Новосибирск: Наука, 1987. 185 с. [Menyaylo L.N. *Hormonal Regulation of Xylogenesis in Conifers*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 185 p.].

19. Моисеев Н.А. Леса и лесной сектор Архангельской области: историческая роль и место в национальной лесной политике России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 4. С. 7–15. [Moiseev N.A. Forests and Forest Sector of the Arkhangelsk Region: The Historical Role and Place in the Russian Forest Policy. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 4, pp. 7–15]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/624/xzpa1.pdf>

20. Мокроносов А.Т. Онтогенетический аспект фотосинтеза. М.: Наука, 1981. 196 с. [Mokronosov A.T. *Ontogenetic Aspect of Photosynthesis*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 196 p.].

21. Роньжина Е.С., Мокроносов А.Т. Донорно-акцепторные отношения и участие цитокининов в регуляции транспорта и распределения органических веществ в растениях // Физиология растений. 1994. Т. 41, вып. 3. С. 448–459. [Ron'zhina E.S., Mokronosov A.T. Donor-Acceptor Interactions and Involvement of Cytokinins in Transport Regulation and Distribution of Organic Substances in Plants. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1994, vol. 41, iss. 3, pp. 448–459].

22. Федорец Н.Г. Трансформация азота в почвах лесных биогеоценозов Северо-Запада России: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1997. 41 с. [Fedorets N.G. *Transformation of Nitrogen in Soils of Forest Biogeocenoses in the Northwest of Russia*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 1997. 41 p.]

23. Чернобровкина Н.П. Экофизиологическая характеристика использования азота сосной обыкновенной. СПб.: Наука, 2001. 175 с. [Chernobrovkina N.P. *Ecophysiological Features of Nitrogen Assimilation by Scots Pine*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 175 p.]

24. Чиков В.И. Фотосинтез и транспорт ассимилятов. М.: Наука, 1987. 186 с. [Chikov V.I. *Photosynthesis and Transport of Assimilates*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 186 p.]

25. Юшков П.И. Распределение продуктов фотосинтеза в сосне // Физиология и экология древесных растений: Тр. Ин-та экологии АН СССР. Вып. 43. Свердловск: Наука, УрО, 1965. С. 17–23. [Yushkov P.I. Distribution of Photosynthesis Products in Pine. *Physiology and Ecology of Woody Plants: Academic Papers of the Institute of Ecology, AN SSSR*. Sverdlovsk, UrO, Nauka Publ., 1965, iss. 43, pp. 17–23].

26. Heinze M., Fiedler H.J. Wasserverbrauch, Ernährung und Wachstum von nsamlingen bei verschiedener Belichtung, und Düngung [Water Consumption, Nutrition and Growth of Pine Seedlings under the Conditions of Different Radiation Intensity, Watering and Fertilization]. *Flora*, 1980, vol. 169, iss. 1, pp. 89–103. DOI: [10.1016/s0367-2530\(17\)31167-2](https://doi.org/10.1016/s0367-2530(17)31167-2)

27. Konovalov V.N., Zarubina L.V., Goreva A.D. Peculiar Influence of Nitrogen on the Daily Growth and Photosynthesis of Scots Pine in the Far North. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 263, art. 012011. DOI: [10.1088/1755-1315/263/1/012011](https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012011)

28. Loeffers V.J., Messier C., Stadt K.J., Gendron F., Comeau P.G. Predicting and Managing Light in the Understory of Boreal Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, no. 6, pp. 796–811. DOI: [10.1139/x98-165](https://doi.org/10.1139/x98-165)

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

30. Michniewicz M., Stopińska J. The Effect of Nitrogen Nutrition on Growth and on Plant Hormones Content in Scots Pine (*Pinus silvestris* L.) Seedlings Grown under Light of Different Intensity. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 1980, vol. 49, no. 3, pp. 221–234.

TRANSPORT, DISTRIBUTION AND CONSUMPTION OF PINE AND SPRUCE ¹⁴C-ASSIMILATES IN NORTHERN PHYTOCENOSSES UNDER DIFFERENT ILLUMINATION AND NITROGEN NUTRITION

V.N. Konovalov¹, Doctor of Agriculture, Prof.

L.V. Zarubina², Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3834-0521>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: v.konovalov@narfu.ru

²Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, s. Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: liliya270975@yandex.ru

A rational system of cuttings, mineral nutrition of plants, and preservation of softwood undergrowth during felling is one of the ways to increase the productivity of boreal forests. The physiological methods of research used in forestry and, first of all, the study of donor-acceptor interactions, allow obtaining the necessary information on the efficiency level of forestry measures in the stands of pine and spruce undergrowth quickly enough (within 1–2 years) without waiting for the final result in the form of an increment in shoots. The dynam-

ics of accumulation, transportation and distribution of ^{14}C in organs and tissues of a tree under the influence of selective cuttings and a nitrogen dose has been studied in spruce and pine undergrowth in stands of different species composition and age. The study objects have been: blueberry spruce and birch forests of the forest site types with varying intensity of cutting; lichen pine forests formed from pine undergrowth preserved during the cutting. It were found that, in the summer period under the canopy of spruce and birch forests, the illumination does not exceed 8–10 % of the open area and does not correspond to the biological norm for spruce. The lack of solar radiation and soil nitrogen in the undergrowth of these tree species leads to a decrease in the intensity of photosynthesis and the violation of donor-acceptor bonds, delays evacuation of assimilates from a leaf and their transportation to the active zones, suppresses the growth activity and the associated with it “demand” for macronutrients sent to the leaves declines the vitality of plants. The efficiency of the root system deteriorates, the formation of a new assimilation apparatus is delayed, and the growth processes of vegetative organs are violated due to the lack production of assimilates and the disruption of their distribution system. Nitrogen introduced into the stands and selective cuttings in pine and spruce undergrowth activate the synthetic and absorption activity of the root system, improve the functioning of the assimilation apparatus, strengthen the donor-acceptor interactions between the aboveground and underground organs of a tree, significantly accelerate the outflow of photosynthetic products from a leaf, and positively influence on the growth processes. It has been found that, according to the level of activity of the donor-acceptor system for the pine and spruce undergrowth, it is possible within 1–2 years to set up a system of felling and a dose of nitrogen introduced into the forest stands that most closely meet the needs of these species.

For citation: Konovalov V.N., Zarubina L.V. Transport, Distribution and Consumption of Pine and Spruce ^{14}C -Assimilates in Northern Phytocenoses under Different Illumination and Nitrogen Nutrition. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 77–94. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-77-94

Keywords: pine undergrowth, spruce undergrowth, illumination, lichen pine forest, blueberry spruce forest, blueberry birch forest, donor-acceptor interactions, selective cutting, nitrogen fertilizers.

Поступила 29.05.19 / Received on May 29, 2019

УДК 631.4: 630*114.14

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-95-112

ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМОВ СЕГРЕГАЦИОННЫХ В АГРОЛЕСОЛАНДШАФТАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

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

Ю.И. Чевердин, д-р биол. наук, гл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9905-0547>

В.А. Беспалов, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-929X>

Т.В. Титова, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6435-5455>

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 рамках программы по тематике государственного задания на 2018–2020 гг. изучены основные физические свойства черноземов в агролесоландшафтах Центрального Черноземья. Исследования, проведенные в условиях агроценозов и ненарушенных экосистем, разделялись по влиянию агрогенного и агролесомелиоративного характера. Агрогенное влияние рассматривалось на примере залежных угодий, введенных в эксплуатацию под пашню, лесомелиоративное – на примере воздействия лесозащитной полосы на почвенный покров. Установлено, что под влиянием лесных полос и при введении в сельскохозяйственное использование залежных угодий происходит перегруппировка численности почвенных агрегатов, но по различным сценариям. При агрогенном воздействии содержание глыбистой фракции (>10 мм) в пахотном горизонте от 6 до 14 раз увеличивается по сравнению с залежью. Доля пылеватой фракции ($<0,25$ мм) на пашне, напротив, уменьшается в 2–4 раза, коэффициент структурности – от 8 до 13 раз. Для почв пашни отмечено минимальное значение содержания агрономически ценных агрегатов ($\Sigma 0,25...10$ мм) по сравнению с залежью и лесополосой для всех отобранных слоев. Для пашни средние значения лежат в пределах 58...73 %, тогда как для лесной полосы и залежи доля агрегатов размером 0,25...10 мм составляет 85...95 %. На уменьшение агрономически ценной структуры на пашне повлияло снижение содержания фракций размером 0,25...0,5; 0,5...1; 1...2; 2...3 и 3...5 мм по сравнению с залежью. На структурный состав почвенного покрова агролесомелиоративное влияние осуществляется более щадяще. Доля глыбистой фракции увеличивается незначительно. Сумма агрономически ценных агрегатов в почве лесной полосы на глубине 10...20 и 20...40 см соответствует уровню чернозема залежи. При этом доля пылеватой фракции в почвах естественных ценозов выше. И как следствие этого, на этих же глубинах значения коэффициента структурности чернозема лесополосы незначительно превышают подобные значения в почве залежи. Установлены статистические особенности распределения основных почвенных агрегатов в почвах, подверженных интенсивному агрогенному и лесомелиоративному воздействию, по сравнению с залежными почвами. Рассчитаны некоторые статистические характеристики распределения основных структурных отдельностей черноземных почв. Определены показатели плотности сложения с различных глубин на участках объекта, которые увеличиваются в ряду залежь–лесополоса–пашня.

Для цитирования: Турусов В.И., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В. Изменения физических свойств черноземов сегрегационных в агролесоландшафтах Центрального Черноземья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 95–112. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-95-112

Ключевые слова: лесные полосы, залежи, чернозем, структурный состав почв, плотность сложения.

Введение

Охрана, рациональное использование и улучшение свойств почв становятся важнейшими проблемами на современном этапе развития сельского хозяйства. Для получения высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур разработаны различные приемы обработки почвы в целях максимального использования ее плодородия [4]. При механическом воздействии на почву изменяются строение пахотного слоя, воздушный и водный режимы, усиливаются микробиологические процессы [16]. По результатам многочисленных исследований, последствия агрогенного воздействия на черноземы приводят к их физической деградации: переуплотнению, распылению, растрескиванию, глыбистости [5, 10, 11]. Показатели физического состояния имеют одно из первостепенных значений, определяющих эффективное плодородие и продуктивность агроценозов.

В ряде работ отмечается существенная деградация основных показателей физического состояния почв под влиянием сельскохозяйственного использования: укрупнение (или распыление) структуры, повышение плотности, снижение пористости и влагоемкости, падение водопрочности агрегатов [19–21, 23–25].

Повсеместное ухудшение структурного состояния и плотности сложения черноземов и других почв, которые в наибольшей степени влияют на урожай, требует организации мониторинга за этими изменениями для прогноза состояния и качества земель и определения пути оптимизации их структурного состава и плотности [7].

Важно отметить, что на состояние почвенного покрова оказывает влияние не только агрогенное, но и лесомелиоративное воздействие. Тем самым, оценка комплексного характера этого влияния на почву является приоритетным направлением современного почвоведения [1, 13, 14, 17]. Проведенные исследования в Каменной Степи указывают на положительную роль лесных насаждений в физическом состоянии черноземов [6, 15].

Для разработки эффективных мер по устранению физической деградации почв необходимы количественные показатели оценки их физического состояния. Цель исследований – оценка эволюционных изменений физических свойств черноземных почв в различных агролесоландшафтах Центрального Черноземья.

Объекты и методы исследования

Для оценки эволюционных изменений физических свойств черноземных почв в агролесоландшафтах в результате длительного антропогенного и лесомелиоративного воздействия в 2018–2019 гг. отделом агропочвоведения и агролесомелиорации НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева была осуществлена закладка

опытного участка в пределах агролесоландшафта. Для отбора почвенных образцов производилось бурение по сетке с ячейкой 25×25 м на следующих объектах: залежь косая 1882 г. заповедника № 1; лесополоса (л.п.) № 40; пашня 1952 г. распахки (рис. 1). Образцы почвы на участке площадью 1,2 га отбирались с 24 точек опробования.



Рис. 1. Космоснимок расположения опытного участка в Каменной Степи

Fig. 1. Satellite image of the location of the test area in the Kamennaya Steppe

Заповедник № 1 расположен между лесной полосой № 40 (с запада) и южным селекционным севооборотом (с востока). Косая залежь (1882 г.) – один из трех участков заповедника площадью 10,7 га. Она представлена степной разнотравно-злаковой растительностью, подвергающейся ежегодному скашиванию. В связи с тем, что этой залежи почти 140 лет, ее можно отнести к естественным угодьям.

Лесная полоса № 40 полезащитного назначения посажена Н.Я. Михайловым в 1903 г. Насаждение примечательно своими размерами: ширина – 106 м, длина – 750 м. Эта самая широкая лесная полоса в оазисе, заложенная как основная ветроударная и водорегулирующая на водоразделе 2 основных балок – Таловой и Озерки, является интересным опытом по изучению совместного выращивания дуба обыкновенного с другими древесно-кустарниковыми породами [12]. В качестве дополнительных вариантов изучались западная и восточная опушки лесной полосы № 40, которые представлены кленом ясенелистным.

Участок пашни, эксплуатируемый с 1952 г., находится западнее лесной полосы № 40. После введения в эксплуатацию он использовался для возделывания различных сельскохозяйственных культур, в том числе озимой пшеницы и кукурузы.

Почвенный покров объектов исследования представлен черноземом сегрегационным (обыкновенным по классификации 1977 г.). В почве объектов исследования (слои 0...10; 10...20 и 20...40 см) изучались структурно-агрегатный состав по Н.И. Саввинову (фракционирование почвы в воздушно-

сухом состоянии) и плотность ее сложения (методом взятия почвенных проб с ненарушенным сложением с помощью режущих колец) [3, 18, 22].

Экспериментальные данные подвергались статистической обработке корреляционным и дисперсионным методами с помощью программы Microsoft Excel. Для пространственного отображения результатов использовались геостатистические возможности пакета Surfer-V.9.0.

Результаты исследования и их обсуждение

При эволюционном развитии почвенного покрова происходит изменение его структурного состояния [2]. Анализ наших исследований свидетельствует о перегруппировке количества почвенных агрегатов верхнего слоя почвы под воздействием антропогенеза и агролесомелиоративного комплекса. Наиболее контрастно изменялась доля глыбистой части фракции (>10 мм). Минимальное количество агрегатов характерно для чернозема обыкновенного естественных угодий залежи косимой. В верхнем слое почвы (0...10 см) содержалось ($2,86 \pm 0,24$) % глыбистых частиц, под лесным насаждением отмечено их некоторое увеличение – до ($7,05 \pm 0,96$) %. Интенсивное сельскохозяйственное использование приводит к существенному изменению структурного состояния. Доля агрегатов размером >10 мм увеличивается многократно и находится в среднем на уровне ($40,31 \pm 2,26$) % (табл. 1).

Таблица 1

**Средние значения основных показателей структурного состава почв
Каменной Степи в зависимости от вида воздействия (2019 г.)**

Вариант	Сумма агрономически ценных мезоагрегатов (10...0,25 мм), %	Коэффициент структурности K_c	Сумма макроагрегатов (>10 мм), %	Сумма агрегатов (10...5 мм), %	Сумма макро- и микроагрегатов ($\Sigma >10$ мм + $<0,25$ мм), %
<i>На глубине 0...10 см</i>					
1	$94,43 \pm 1,35$	$18,89 \pm 3,97$	$2,86 \pm 0,24$	$10,70 \pm 1,17$	$5,57 \pm 1,35$
2	$85,61 \pm 3,50$	$6,67 \pm 1,52$	$11,85 \pm 4,43$	$19,65 \pm 2,36$	$14,46 \pm 3,56$
3	$91,57 \pm 0,81$	$11,73 \pm 1,16$	$7,05 \pm 0,96$	$20,77 \pm 2,35$	$8,43 \pm 0,81$
4	$86,58 \pm 4,51$	$9,02 \pm 4,03$	$11,70 \pm 4,90$	$28,77 \pm 2,33$	$13,41 \pm 4,51$
5	$58,65 \pm 2,28$	$1,46 \pm 0,15$	$40,31 \pm 2,26$	$19,19 \pm 0,74$	$41,35 \pm 2,28$
<i>На глубине 10...20 см</i>					
1	$90,12 \pm 1,46$	$9,55 \pm 1,46$	$5,69 \pm 1,45$	$18,21 \pm 0,36$	$9,88 \pm 1,46$
2	$88,26 \pm 0,71$	$7,58 \pm 0,52$	$9,33 \pm 1,07$	$21,33 \pm 1,51$	$11,74 \pm 0,71$
3	$91,17 \pm 0,72$	$10,98 \pm 1,04$	$6,25 \pm 0,77$	$18,12 \pm 2,33$	$8,83 \pm 0,72$
4	$85,22 \pm 5,63$	$7,66 \pm 2,53$	$13,82 \pm 5,74$	$33,50 \pm 0,49$	$14,78 \pm 5,63$
5	$62,30 \pm 2,06$	$1,70 \pm 0,15$	$36,94 \pm 2,06$	$21,28 \pm 1,11$	$37,70 \pm 2,06$
<i>На глубине 20...40 см</i>					
1	$85,87 \pm 2,08$	$6,36 \pm 0,95$	$9,33 \pm 2,54$	$17,05 \pm 0,70$	$14,13 \pm 2,08$
2	$86,05 \pm 2,12$	$6,51 \pm 1,13$	$11,30 \pm 2,49$	$18,59 \pm 0,97$	$13,95 \pm 2,12$
3	$86,97 \pm 0,99$	$7,10 \pm 0,71$	$9,86 \pm 0,94$	$14,66 \pm 1,17$	$13,03 \pm 1,00$
4	$82,71 \pm 5,08$	$5,87 \pm 1,92$	$16,15 \pm 5,36$	$29,50 \pm 5,82$	$17,29 \pm 5,08$
5	$73,36 \pm 2,50$	$2,76 \pm 0,07$	$25,62 \pm 0,56$	$20,57 \pm 0,87$	$26,64 \pm 0,51$

Примечание. Варианты опыта: 1 – залежь 1882 г.; 2 – опушка с восточной стороны лесополосы № 40; 3 – лесополоса № 40; 4 – опушка с западной стороны лесополосы № 40; 5 – пашня 1952 г. распашки.

Таким образом, в результате сельскохозяйственного использования отмечается закономерное укрупнение структуры агрогенного горизонта. В этом случае можно говорить о неустойчивости почвенной структуры черноземов, подверженной значительным изменениям в результате проводимых ежегодно приемов обработки почвы. Также необходимо отметить такую особенность, как увеличение доли глыбистой фракции в почве лесной полосы на опушечной ее части, и, следовательно, уменьшение количества агрономически ценных агрегатов по отношению к центру насаждения.

Для слоя 10...20 см разрыв содержания глыбистой фракции на залежи и в лесной полосе по сравнению с пашней сохранился высоким: 6...7 % против 37 %. В слое 20...40 см доля глыбистой фракции на залежи и в лесной полосе увеличилась незначительно (>9...10 %), в то время как на пашне произошло ее снижение с 37 до 26 %. Анализ полученных данных показал, что содержание глыбистой фракции в пахотном горизонте в среднем в 14 раз больше по сравнению с залежью и в 6 раз выше, чем в лесной полосе № 40.

Ухудшение структуры на пашне проявляется в основном за счет увеличения доли глыбистых агрегатов размером >10 мм. Рост плотности сложения после прохода сельскохозяйственных машин, уменьшение количества червей и корневой массы в пахотном слое почвы приводят к образованию глыбистых агрегатов [4].

Необходимо отметить существенные различия в величине коэффициента структурности. Почвы под лесной полосой и естественной растительностью характеризовались высокими показателями. Максимальное значение для слоя почвы 0...10 см отмечено на залежи: $K_c = 18,89 \pm 3,97$. Интенсивное сельскохозяйственное использование приводит к существенному его снижению: $K_c = 1,46 \pm 0,15$. В результате хозяйственной деятельности он уменьшается в среднем в 13 раз по сравнению с залежью (табл. 1) и в 8 раз по сравнению с лесной полосой. Это свидетельствует, с одной стороны, о нестабильности почвенной структуры черноземов, с другой – о хорошей оструктуренности почвы не только на целине, но и под влиянием лесной полосы. Несколько меньшие значения, отмеченные в почвах лесной полосы, обусловлены изменением характера растительности и водного режима, приводящим к укрупнению структуры.

Ближние и высокие значения коэффициента структурности в почвах лесной полосы сохраняются и в нижележащих слоях почвы на глубине 10...40 см. Это еще раз подтверждает положительное влияние агролесомелиоративного воздействия на структуру черноземных почв в современных агроландшафтах. Отмечается постепенное уменьшение K_c от верхних горизонтов к нижним. При этом для залежного участка характерно резкое снижение оструктуренности нижних слоев почвы – с $18,89 \pm 3,97$ (на глубине 0...10 см) до $9,55 \pm 1,46$... $6,36 \pm 0,95$ (10...40 см).

В агрогоризонте пашни практически отсутствует зернистая структура, что приводит к снижению оструктуренности почвы по всем слоям. Для пашни низкий коэффициент структурности характерен и для слоев почвы 10...20 см и 20...40 см, где он составляет от 2,00 до 3,00.

Изменение структурного состояния черноземов всегда проявляется в изменении содержания крупной фракции (>1 мм) и в основном охватывает верхние горизонты почвы. Как отмечено выше, наиболее контрастно проявляется изменение глыбистой фракции (>10 мм) с максимальным значением

в пахотной почве. С глубиной доля этой фракции в агрогенном слое постепенно снижается в отличие от лесного ценоза и естественной растительности. В почве лесной полосы отмечается постепенное укрупнение структуры с глубиной, наиболее высокие значения характерны для опушечной ее части, т. е. древесные растения вызывают некоторое «огрубление» структуры, связанное с воздействием крупных корневых систем. Содержание крупных отдельностей под залежью варьировало в интервале от 2,86 % (0...10 см, табл. 2) до 9,33 % (20...40 см, табл. 4), в центре лесной полосы – от 7,05 % до 9,86 %, увеличиваясь в опушечной части до 16,20 %.

Таблица 2

**Статистическое распределение (%) почвенных агрегатов различного размера
в слое 0...10 см (2019 г.)**

Статистический показатель	Размер, см							
	>10	10...5	5...3	3...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	<0,25
<i>Залежь 1882 г.</i>								
Среднее	2,86	10,70	26,87	32,73	16,78	4,27	3,09	2,71
Стандартная ошибка	0,24	1,17	3,78	1,15	1,51	0,32	0,86	1,14
Стандартное отклонение	0,42	2,02	6,55	1,99	2,62	0,55	1,49	1,97
Интервал	0,81	3,76	12,53	3,50	5,12	1,10	2,97	3,71
Коэффициент вариации	14,55	18,90	24,36	6,09	15,61	12,89	48,13	72,69
<i>Опушка с восточной стороны лесополосы № 40</i>								
Среднее	11,85	19,65	16,52	24,13	17,47	4,21	3,63	2,61
Стандартная ошибка	4,43	2,36	1,63	1,15	2,03	0,48	0,98	0,98
Стандартное отклонение	7,68	4,09	2,82	1,99	3,51	0,83	1,70	1,70
Интервал	13,72	8,17	5,11	3,48	6,13	1,66	3,35	3,39
Коэффициент вариации	64,83	20,79	17,08	8,26	20,08	19,74	46,88	65,01
<i>Лесополоса № 40</i>								
Среднее	7,05	20,77	26,78	27,00	12,54	2,58	1,90	1,38
Стандартная ошибка	0,96	2,35	0,93	1,48	1,20	0,30	0,29	0,24
Стандартное отклонение	2,89	7,06	2,79	4,43	3,59	0,89	0,88	0,72
Интервал	7,28	25,34	9,13	14,10	12,50	2,98	2,86	2,34
Коэффициент вариации	41,06	33,99	10,42	16,42	28,64	34,66	46,67	52,22
<i>Опушка с западной стороны лесополосы № 40</i>								
Среднее	11,70	28,77	20,86	19,83	11,94	2,86	2,31	1,71
Стандартная ошибка	4,90	2,33	1,71	2,01	1,69	0,55	0,60	0,51

Окончание табл. 2

Статистический показатель	Размер, см							
	>10 см	10...5	5...3	3...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	<0,25
Стандартное отклонение	8,48	4,04	2,97	3,49	2,92	0,95	1,04	0,88
Интервал	16,92	7,94	5,85	6,78	5,18	1,71	1,89	1,68
Коэффициент вариации	72,46	14,02	14,22	17,61	24,48	33,37	45,12	51,42
<i>Пашня 1952 г. распапки</i>								
Среднее	40,31	19,19	9,39	12,77	11,71	3,50	2,11	1,04
Стандартная ошибка	2,26	0,74	0,61	0,80	0,37	0,26	0,16	0,09
Стандартное отклонение	5,54	1,82	1,49	1,97	0,90	0,63	0,39	0,21
Интервал	12,87	5,18	3,84	5,22	2,20	1,52	0,99	0,62
Коэффициент вариации	13,74	9,50	15,82	15,42	7,70	18,09	18,59	20,61

Для почв пашни отмечено минимальное значение содержания агрономически ценных агрегатов ($\Sigma 0,25...10$ мм) по сравнению с залежью и лесополосой для всех анализируемых почвенных слоев. Для пашни средние значения лежат в пределах 58...73 %, тогда как для лесной полосы и залежи доля агрегатов размером 0,25...10 мм составляет 85...95 % (см. табл. 1). Основная масса почвы – агрономически ценные структурные отдельности размером 1...5 мм. При этом доминантной (лидирующей) фракцией для залежных почв и лесной полосы являются мезоагрегаты размером 2...3 мм. В агрогенной почве лидирующее место в группе агрономически ценных отдельностей принадлежит фракции 5...10 мм.

В черноземе под естественной растительностью в верхнем слое почвы (0...10 см) на долю лидирующей фракции (2...3 мм) приходится максимальное количество ценных агрегатов – 32,7 %. Следует отметить, что в нижележащих слоях при некотором снижении (до 24,5...25,9 %) сохраняется ее доминантное положение по отношению к другим фракциям.

Второе место в составе агрономически ценных агрегатов принадлежит частицам размером 3...5 мм, на долю которых приходится от 26,9 % (слой 0...10 см) до 17,8 % (слой 20...40 см). Пылеватая часть почвы составляет всего 2,7...4,8 %. Причем с глубиной эти значения возрастают. Самое высокое количество агрономически ценных фракций отмечается в слое 0...10 см (94,4 %).

В нижних слоях (20...40 см) их содержание снижается от 90,1 до 85,6 %, при этом возрастает доля глыбистой фракции. В слоях 10...20 см (табл. 3) и 20...40 см (табл. 4) растет количество крупных мезоагрегатов (>5 мм) и падает доля зернистых агрегатов размером 1...5 мм.

Таблица 3

**Статистическое распределение (%) почвенных агрегатов различного размера
в слое 10...20 см (2019 г.)**

Статистический показатель	Размер, см							
	>10	10...5	5...3	3...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	<0,25
<i>Залежь 1882 г.</i>								
Среднее	5,69	18,21	20,70	25,93	16,92	3,96	4,40	4,19
Стандартная ошибка	1,45	0,36	0,75	0,33	0,92	0,19	0,28	0,38
Стандартное отклонение	2,51	0,62	1,29	0,58	1,60	0,33	0,49	0,67
Интервал	5,01	1,18	2,53	1,10	3,03	0,64	0,96	1,19
Коэффициент вариации	44,03	3,42	6,24	2,23	9,45	8,37	11,12	15,89
<i>Опушка с восточной стороны лесополосы № 40</i>								
Среднее	9,33	21,33	19,21	23,79	15,78	4,66	3,49	2,41
Стандартная ошибка	1,07	1,51	1,13	1,09	0,30	0,99	0,54	0,45
Стандартное отклонение	1,85	2,61	1,97	1,88	0,51	1,72	0,94	0,78
Интервал	3,59	4,70	3,89	3,50	0,90	3,25	1,67	1,48
Коэффициент вариации	19,86	12,23	10,23	7,91	3,24	36,84	26,84	32,21
<i>Лесополоса № 40</i>								
Среднее	6,25	18,12	22,62	27,41	15,74	3,92	3,36	2,58
Стандартная ошибка	0,77	2,33	0,86	1,11	0,91	0,33	0,34	0,32
Стандартное отклонение	2,30	7,00	2,58	3,32	2,73	1,07	1,01	0,95
Интервал	6,73	22,32	7,03	9,90	9,64	3,51	3,33	2,51
Коэффициент вариации	36,89	38,60	11,40	12,11	17,32	27,19	30,03	36,86
<i>Опушка с западной стороны лесополосы № 40</i>								
Среднее	13,82	33,5	20,90	18,17	9,25	2,13	1,27	0,95
Стандартная ошибка	5,74	0,49	2,27	1,89	0,97	0,37	0,24	0,13
Стандартное отклонение	9,94	0,85	3,93	3,28	1,69	0,64	0,41	0,22
Интервал	18,19	1,69	7,51	6,43	3,16	1,25	0,75	0,43
Коэффициент вариации	71,94	2,53	18,79	18,05	18,24	30,16	32,35	22,80
<i>Пашия 1952 г. распахки</i>								
Среднее	36,94	21,28	11,92	14,84	10,51	2,51	1,25	0,77
Стандартная ошибка	2,06	1,11	0,58	0,91	0,80	0,26	0,19	0,04
Стандартное отклонение	5,04	2,72	1,43	2,25	1,97	0,65	0,45	0,10
Интервал	12,49	7,45	4,07	5,77	4,41	1,49	1,05	0,25
Коэффициент вариации	13,64	12,78	12,03	15,17	18,73	25,75	36,21	12,72

Таблица 4

**Статистическое распределение (%) почвенных агрегатов различного размера
в слое 20...40 см (2019 г.)**

Статистический показатель	Размер, см							
	>10	10...5	5...3	3...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	<0,25
<i>Залежь 1882 г.</i>								
Среднее	9,33	17,05	17,80	24,53	16,90	4,51	5,09	4,79
Стандартная ошибка	2,54	0,70	0,68	0,50	1,25	0,55	0,90	0,52
Стандартное отклонение	4,40	1,21	1,18	0,87	2,17	0,95	1,56	0,90
Интервал	8,30	2,20	2,30	1,73	4,32	1,89	3,09	1,79
Коэффициент вариации	47,10	7,08	6,65	3,55	12,83	21,06	30,69	18,80
<i>Опушка с восточной стороны лесополосы № 40</i>								
Среднее	11,30	18,59	18,38	24,55	16,10	4,41	4,02	2,65
Стандартная ошибка	2,49	0,97	0,75	0,10	0,59	0,40	0,33	0,36
Стандартное отклонение	4,31	1,68	1,30	0,18	1,02	0,69	0,57	0,63
Интервал	8,58	3,35	2,30	0,32	1,96	1,20	1,13	1,26
Коэффициент вариации	38,13	9,03	7,06	0,73	6,31	15,63	14,22	23,85
<i>Лесополоса № 40</i>								
Среднее	9,86	14,66	19,70	27,52	16,72	4,25	4,12	3,17
Стандартная ошибка	0,94	1,15	0,81	0,63	0,59	0,14	0,36	0,34
Стандартное отклонение	2,81	3,46	2,42	1,88	1,78	0,42	1,07	1,01
Интервал	7,51	10,78	7,56	6,42	6,12	1,14	3,04	2,92
Коэффициент вариации	28,49	23,63	12,28	6,82	10,64	9,86	25,8	32,0
<i>Опушка с западной стороны лесополосы № 40</i>								
Среднее	16,15	29,50	19,30	19,31	10,64	2,29	1,67	1,13
Стандартная ошибка	5,36	5,82	2,34	4,40	2,67	0,63	0,47	0,28
Стандартное отклонение	9,29	10,08	4,06	7,62	4,63	1,09	0,82	0,49
Интервал	18,20	18,67	8,09	14,93	9,14	2,14	1,64	0,93
Коэффициент вариации	57,51	34,17	21,02	39,46	43,52	47,48	49,35	43,19

Окончание табл. 4

Статистический показатель	Размер, см							
	>10	10...5	5...3	3...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	<0,25
<i>Пашня 1952 г. распапки</i>								
Среднее	25,62	20,57	14,79	18,89	13,48	3,47	2,15	1,03
Стандартная ошибка	0,56	0,87	0,67	0,53	0,56	0,33	0,31	0,18
Стандартное отклонение	1,38	2,13	1,65	1,30	1,38	0,82	0,77	0,44
Интервал	3,93	6,14	4,97	2,57	3,13	2,31	2,25	1,12
Коэффициент вариации	5,38	10,35	11,15	6,86	10,22	23,59	35,68	43,16

В черноземах под лесной растительностью отмечен несколько иной характер распределения структурных отдельностей. В слое 0...10 см (центр лесной полосы) наибольшее и примерно равное количество приходится на агрегаты размером 2...3 и 3...5 мм: соответственно 27,0 и 26,8 %. По отношению к почвам естественных ценозов характерно увеличение крупной фракции (5...10 мм) до 20,8 % (залежь – 10,7 %). Следует отметить снижение доли мелких агрегатов размером 0,25...1 мм на общем фоне уменьшения агрономически ценных частиц. В слое почвы 10...20 и 20...40 см на первое место выходит фракция размером 2...3 мм, при этом сохраняются довольно высокие значения содержания частиц размером 5...10 и 3...5 мм с несколько повышенным количеством последних. В черноземах лесной полосы при незначительной доле пылеватой фракции ее величина уступает залежному аналогу – 2,4...2,6 % против 2,7...4,8 %.

К особенностям структурного состояния почв на опушечной части лесной полосы необходимо отнести снижение агрономически ценной их части, особенно в черноземах западной опушки. В центре лесной полосы и на восточной опушке количество агрономически ценных агрегатов близко к почвам естественной степной растительности. Для слоя почвы 0...10 см эти значения составляют соответственно 91,6...85,6 и 94,4 %. В нижележащих слоях почвы различия сглаживаются, и количество агрегатов размером 0,25...10 мм на залежи в слое почвы 10...20 см – 90,1 %, в центре лесной полосы – 91,2 %. Близкие значения характерны для чернозема восточной опушки (91,2 %), на западной они снижаются до 85,2 %.

В слоях 10...20 и 20...40 см доля глыбистых агрегатов на западной опушке возрастает по сравнению с восточной (табл. 3, 4). Это связано с постоянной работой тяжелой техники при обустройстве лесной полосы с западной стороны, где расположены основные подъездные пути.

При сравнении доли мезоагрегатов (размером 0,25...10 мм) на западной и восточной опушках выявлено их примерно равное количество для всех исследуемых слоев почвы (см. табл. 1), но основную лепту там вносят разные фракции. На опушке с восточной стороны лесной полосы № 40 количество агрегатов размерами 0,25...0,5; 0,5...1; 1...2 и 2...3 мм больше, чем в почве опушки с западной стороны. Данное обстоятельство характерно для всех изученных слоев почв (табл. 2–4).

Учитывая, что восточная опушка образовалась на месте залежи, исходная почвенная структура здесь сохранилась на должном уровне. На западной опушке, напротив, выше доля агрегатов большего размера: 3...5 мм и 5...10 мм. Данное обстоятельство можно объяснить большой шириной лесополосы (более 100 м), что создает различные микроклимат и направление ветров. Сама лесная полоса благоприятно влияет на почвенную структуру, которая по наличию агрономически ценных агрегатов лишь незначительно отличается от целинной почвы на залежи (см. табл. 2).

Для пылевой фракции ($<0,25$ мм) установлено, что минимальное ее количество определено на пашне и прилегающей к ней опушке – 1 % (табл. 2–4). На залежи, прилегающей к опушке, и в лесной полосе данной фракции значительно больше (2...4 %). По нашему мнению, столь малое количество мелких частиц на пашне объясняется элюированием их из верхних горизонтов под действием осадков.

Результаты статистической обработки данных показывают, что коэффициент вариации максимален для распределения доли пылевой фракции ($<0,25$ мм) в слое почвы 0...10 см для всех объектов исследования и лежит в пределах от 20 до 72 % (см. табл. 2). Это означает, что он максимально варьирует в верхнем исследуемом слое почвы. Для более глубокого слоя (20...40 см) максимальное значение коэффициента вариации на всех объектах, кроме пашни, отмечено для глыбистых агрегатов (табл. 4).

Переход черноземов из целинного состояния в пашню обязательно сопровождается дезинтеграцией естественной структуры почвы и нарушением ее воспроизводства. Этот процесс, многократно усиленный различными нарушениями агротехники, в результате приводит к тому, что агрогоризонты черноземов сохраняют агрегированность только на микроуровне [8].

Несмотря на общую дезинтеграцию отдельностей и разрушение зернистых агрегатов, структурное состояние агрочерноземов Каменной Степи даже в условиях старой пашни (120 лет освоения) остается достаточно хорошим [9]. Важной особенностью визуализации распределения основных показателей плодородия является построение карт и картосхем варьирования этих показателей в пространстве. Для того, чтобы получить локализацию участков с различной почвенной структурой, на основе экспериментального материала нами построены картосхемы распределения основных показателей структурно-агрегатного состояния черноземных почв на изучаемом опытном участке.

На рис. 2 приведено распределение агрономически ценных агрегатов (0,25...10 мм) в пределах всех исследуемых объектов (темноокрашенные области относятся к максимальному содержанию агрономически ценных агрегатов в анализируемом слое почвы).

По данному изображению можно судить, что такие области представлены на залежи и в лесной полосе № 40. Далее по убыванию значений стоит опушка лесной полосы, минимальные значения с самыми светлыми областями выявлены для пашни.

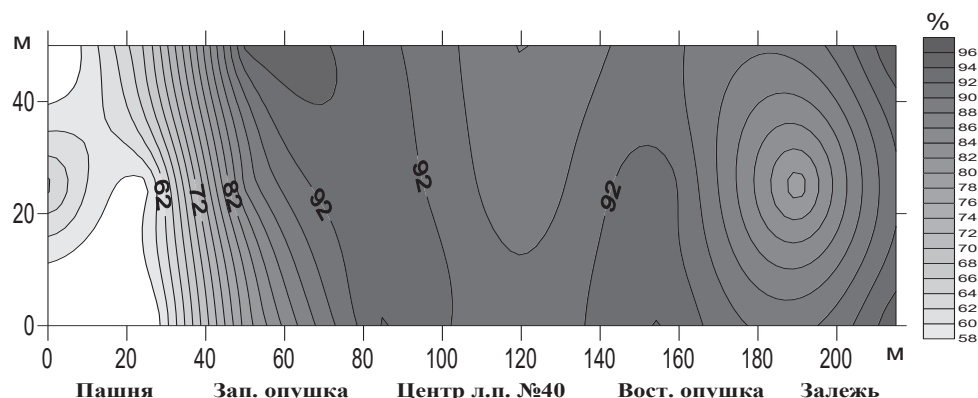


Рис. 2. Картограмма двумерного распределения доли агрономически ценных агрегатов в слое почвы 0...10 см в пространстве всего заложённого опытного участка (справа – доля, %; слева и по горизонтали – расстояние, м)

Fig. 2. Schematic map of the two-dimensional distribution of the share of agronomically valuable aggregates in the soil layer of 0–10 cm in the space of the whole planted test area (on the right – share, %; on the left and horizontally – distance, m)

Важным показателем структурно-агрегатного состояния почвы является коэффициент структурности. На рис. 3 показано пространственное распределение этого показателя вдоль всех объектов исследования.

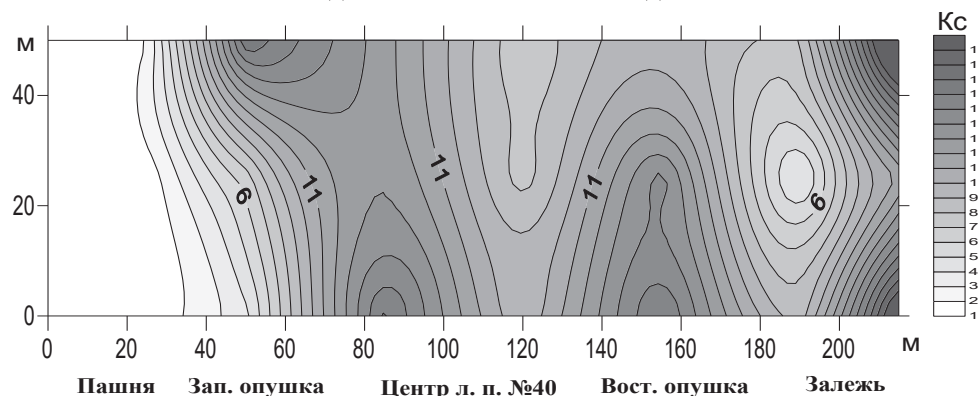


Рис. 3. Картограмма двумерного распределения коэффициента структурности (K_c) в слое почвы 0...10 см в пространстве всего заложённого опытного участка (слева и по горизонтали – расстояние, м)

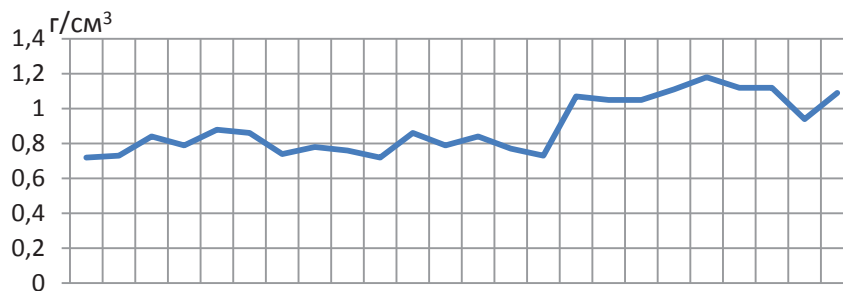
Fig. 3. Schematic map of the two-dimensional distribution of the structural coefficient (K_c) in the soil layer of 0–10 cm in the space in the space of the whole planted test area (on the left and horizontally – distance, m)

Так как коэффициент структурности находится в прямой зависимости от количества мезоагрегатов (0,25...10 мм), то визуальное отображение будет аналогично рис. 2 для всех объектов. Максимальные значения с темноокрашенными областями выявлены для залежи. В пределах лесной полосы коэффициент структурности составляет около 11,00, а минимальные значения (самые светлые области) относятся к пашне.

Одним из важнейших показателей физического состояния почвенного покрова является плотность сложения. В результате длительного агрогенного и лесомелиоративного воздействия на почвенный покров она подвержена изменению. Чтобы определить визуально, как изменяется плотность сложения в ряду залежь–лесополоса–пашня, нами построены пространственные диа-

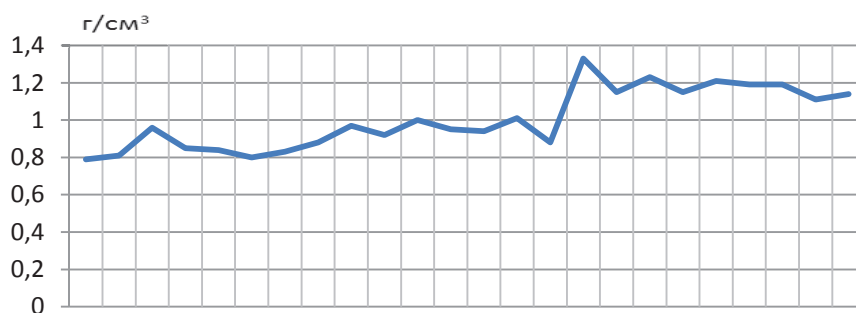
граммы распределения этой величины вдоль объектов исследования для различных слоев почв.

На рис. 4 представлено визуальное отображение значений плотности сложения на объектах исследования по 3 слоям почв: 0...5; 10...15 и 20...25 см. По оси ординат отображены значения плотности сложения, а на оси абсцисс распределены 24 точки опробования вдоль исследуемых объектов.



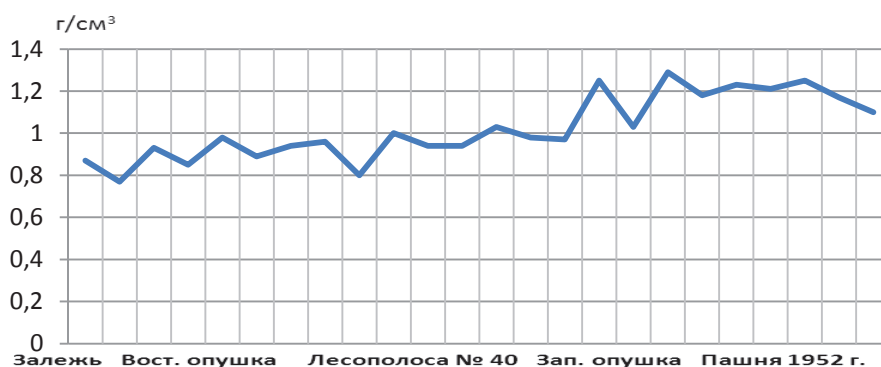
Залежь Вост. опушка Лесополоса № 40 Зап. опушка Пашня 1952 г.

a



Залежь Вост. опушка Лесополоса № 40 Зап. опушка Пашня 1952 г.

б



Залежь Вост. опушка Лесополоса № 40 Зап. опушка Пашня 1952 г.

в

Рис. 4. Разброс значений плотности почвы (г/см^3) на объектах исследования по глубинам, см: *a* – 0...5; *б* – 10...15; *в* – 20...25

Fig. 4. Scattering of soil density values (g/cm^3) at the study objects in depth, cm: *a* – 0–5; *б* – 10–15; *в* – 20–25

Данные рис. 4 показывают, что на исследуемых участках идет повышение плотности сложения в ряду залежь–лесополоса–пашня на глубинах 0...5; 10...15 и 20...25 см. Что касается восточной опушки лесополосы, то значения плотности сложения на ней близки к значениям плотности на залежи. На западной опушке, на глубинах 10...15 и 20...25 см, значения плотности максимальны и даже выше, чем на пашне. Это, по нашему мнению, связано с проведением рубок ухода в 1990–2000 гг. и применением тяжелой техники. На пашне в верхнем горизонте почва была переуплотнена с образованием трещин, разделяющих крупные блоки. Сложение почвенной массы внутри блоков очень плотное, особенно на уровне «плужной подошвы», и практически равно плотности почвообразующей породы.

Выводы

1. Отличие структурного состава почв лесной полосы от залежи состоит в том, что в слое 0...40 см чернозем под древесной растительностью характеризуется повышенным содержанием глыбистой фракции и мезоагрегатов размером 5...10 мм. Также отмечается пониженное содержание фракции пыли и мелких агрегатов размером 0,25...0,5 мм.

2. Изменение физических свойств черноземов различных агролесоландшафтов происходит с соблюдением некоторых закономерностей. При агрогенном воздействии на почву (с введением почв в сельскохозяйственное использование) происходит ухудшение ее структурного состояния, увеличиваются доли глыбистой и мелкоглыбистой фракций, уменьшается доля пылеватой фракции. Ухудшение структуры на пашне проявляется в основном за счет роста числа макроагрегатов. Почвы пашни имеют более низкий показатель структурности, что является результатом хозяйственной деятельности человека. Для почв пашни отмечено минимальное значение содержания агрономически ценных агрегатов ($\Sigma 10...0,25$ мм) по сравнению с залежью и лесополосой для всех отобранных слоев. Для пашни средние значения агрегатов ($\Sigma 10...0,25$ мм) лежат в пределах 58...73 %, тогда как для лесной полосы и залежи доля агрегатов размером 0,25...10 мм составляет 85...95 %. На снижение агрономически ценной структуры на пашне повлияло уменьшение содержания фракций размером 0,25...0,5; 0,5...1; 1...2; 2...3 и 3...5 мм по сравнению с залежью.

3. При лесомелиоративном воздействии у черноземов улучшается структурное состояние. Доля глыбистой фракции значительно ниже, чем на пашне. Коэффициент структурности близок к значениям его на залежи. Однако в слоях 10...20 и 20...40 см доля глыбистых агрегатов на западной опушке лесной полосы возрастает по сравнению с восточной. Это связано с постоянным применением тяжелой техники при обустройстве лесной полосы с западной стороны, где расположены основные подъездные пути.

4. При определении показателей плотности сложения на различных глубинах участков объекта выявлена следующая закономерность: в ряду залежь–лесополоса–пашня происходит увеличение значений плотности сложения для всех исследуемых слоев почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адерихин П.Г., Богатырева З.С. Влияние лесных полос на структуру обыкновенных черноземов Каменной Степи // Почвоведение. 1972. № 2. С. 71–81. [Aderikhin P.G., Bogatyreva Z.S. Influence of Forest Belts on Structure of Ordinary Chernozems of the Kamennaya Steppe. *Pochvovedenie* [Soviet Soil Science], 1972, no. 2, pp. 71–81].

2. Базыкина Г.С., Гребенников А.М., Чевердин Ю.И. Сравнительная характеристика агрофизических свойств миграционно-мицеллярных черноземов многолетней залежи и разновозрастных пашен Каменной степи // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование: материалы Первой Всерос. открытой конф., Москва, 8–10 октября 2014 г. М., 2014. С. 174–179. [Bazykina G.S., Grebennikov A.M., Cheverdin Yu.I. Comparative Analysis of Agrophysical Properties Migration-Micellar Chernozems of a Long-Term Fallow and Uneven-Age Arable Lands of the Kamennaya Steppe. *Soil and Land Resources: Condition, Estimation and Use. Proceedings of the First All-Russian Open Conference, Moscow, October 8–10, 2014*. Moscow, 2014, pp. 174–179].

3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с. [Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Methods of Studying the Physical Properties of Soils*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 416 p.].

4. Гармашов В.М., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Белобров В.П., Гребенников А.М., Исаев В.А. Влияние основной обработки почвы на агрофизические свойства миграционно-мицеллярных агрочерноземов // Вестн. рос. с.-х. науки. 2017. № 3. С. 26–29. [Garmashov V.M., Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Belobrov V.P., Grebennikov A.M., Isaev V.A. The Tillage Influence on the Migratory Micellar Agro Chernozemic Soil Agrophysical Properties. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Vestnik of the Russian Agricultural Science], 2017, no. 3, pp. 26–29].

5. Еремин Д.И., Груздева Н.А. Агрогенные изменения плотности серых лесных почв в Северном Зауралье // Сиб. вестн. с.-х. науки. 2017. № 5. С. 13–22. [Eremin D.I., Gruzdeva N.A. Agrogenic Changes in Density of Gray Forest Soils in Northern Trans-Ural Region. *Sibirskij vestnik sel'skohozyajstvennoy nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2017, no. 5, pp. 13–22]. DOI: [10.26898/0370-8799-2017-5-2](https://doi.org/10.26898/0370-8799-2017-5-2)

6. Королев В.А., Громовик А.И., Йонко О.А. Изменение физических свойств почв Каменной Степи под влиянием полевых защитных лесных полос // Почвоведение. 2012. № 3. С. 299–308. [Korolev V.A., Gromovik A.I., Ionko O.A. Changes in the Physical Properties of Soils in the Kamennaya Steppe under the Impact of Shelterbelts. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2012, no. 3, pp. 299–308]. DOI: [10.1134/S1064229312030064](https://doi.org/10.1134/S1064229312030064)

7. Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М.: Наука, 2015. 198 с. [Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. *Agrolandscapes of the Central Chernozem Region. Zoning and Management*. Moscow, Nauka Publ., 2015. 198 p.].

8. Лебедева И.И., Королева И.Е., Гребенников А.М. Концепция эволюции черноземов в условиях агроэкосистем // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2013. № 71. С. 16–26. [Lebedeva I.I., Koroleva I.E., Grebennikov A.M. The Concept of Evolution of Chernozems in Agroecosystems. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchayeva* [Dokuchaev Soil Bulletin], 2013, no. 71, pp. 16–26].

9. Лебедева И.И., Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Гребенников А.М., Маркина Л.Г. Структурное состояние миграционно-мицеллярных (типичных) агрочерноземов Каменной Степи в условиях разновозрастной пашни // Почвоведение. 2017. № 2. С. 227–238. [Lebedeva I.I., Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Grebennikov A.M., Markina L.G. Structural State of Migrational-Mycelial (Typical) Agrochernozems of the Kamennaya Steppe on Plowed Fields of Different Ages. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2017, no. 2, pp. 227–238]. DOI: [10.7868/S0032180X17020095](https://doi.org/10.7868/S0032180X17020095)

10. Максимова Н.Б., Вороничев А.А., Морковкин Г.Г., Барышников Г.Я. Изменение структурного состояния черноземов Алтайского края при длительном использовании в составе пахотных угодий // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2017. № 5. С. 71–75. [Maksimova N.B., Voronichev A.A., Morkovkin G.G., Baryshnikov G.Ya. Changes of Structural Composition of Chernozems and Chestnut Soils in the Natural Zones of the South-Western Altai Region after Long-Term Use as Arable Lands. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2017, no. 5, pp. 71–75].

11. Мамонтов В.Г., Белопухов С.Л., Витязев В.Г., Сторчевой В.Ф. Влияние сельскохозяйственного использования на агрегатное состояние чернозема обыкновенного // Науч. жизнь. 2017. № 7. С. 27–38. [Mamontov V.G., Belopukhov S.L., Vitязev V.G., Storchevoy V.F. Influence of Agricultural Usage on the Aggregate State of Common Black Soil. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], 2017, no. 7, pp. 27–38].
12. Мильков Ф.Н., Нестеров А.И., Петров П.Г., Скачков Б.И., Дроздов К.А., Семаго Л.Л. Каменная степь: Лесоаграрные ландшафты. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. 224 с. [Mil'kov F.N., Nesterov A.I., Petrov P.G., Skachkov B.I., Drozdov K.A., Semago L.L. *Kamennaya Steppe: Forest Agricultural Landscapes*. Voronezh, VGU Publ., 1992, 224 p.].
13. Панников В.Д. Влияние леса на структуру лесостепных почв и накопление гумуса // Почвоведение. 1977. № 11. С. 116–127. [Pannikov V.D. Influence of Forest on the Structure of Forest-Steppe Soils and Humus Accumulation. *Pochvovedenie* [Soviet Soil Science], 1977, no. 11, pp. 116–127].
14. Сауткина М.Ю., Кузнецова Н.Ф., Тунякин В.Д. Современное состояние по-
лезащитных лесных полос с преобладанием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в
Каменной Степи // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2018. № 1. С. 78–89.
[Sautkina M.Yu., Kuznetsova N.F., Tunjakin V.D. Current State of Forest Shelter Belts with
Predominance of English Oak (*Quercus robur* L.) of the Stone Steppe. *Lesokhozyaystven-
naya informatsiya* [Forestry information], 2018, no. 1, pp. 78–89]. DOI: [10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.07](https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.07)
15. Тихонравова П.И. К вопросу о структурном составе и сложении почв Каменной
Степи // Разнообразие почв Каменной Степи: науч. тр. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева,
2009. С. 284–298. [Tikhonravova P.I. To the Issue of Structural Composition and Consistency
of Soils of the Kamennaya Steppe. *Diversity of Soils of the Kamennaya Steppe: Academic
Papers*. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2009, pp. 284–298].
16. Чевердин Ю.И., Титова Т.В., Беспалов В.А., Сапрыкин С.В., Гармашова
Л.В., Чевердин А.Ю. Взаимосвязь микробиологических параметров и физических
свойств черноземов сегрегационных // Живые и биокосные системы. 2017. № 21. С. 2.
[Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Bepalov V.A., Saprikin S.V., Garmashova L.V., Cheverdin
A.Yu. The Relationship of Microbiological Parameters and Physical Properties of Chernoz-
ems Segregation. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*, 2017, no. 21, p. 2].
17. Чендев Ю.Г., Беспалова Е.С. Оценка роли лесополос в оптимизации почв и
ландшафтов: лит. обзор сведений // Науч. вед. Белгор. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки.
2019. Т. 43, № 2. С. 124–133. [Chendev Y.G., Bepalova E.S. Assessment of the Role of
Shelterbelts in Optimization of Soils and Landscapes: Literature Review of Information.
*Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye
nauki* [Scientific bulletins of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], 2019,
vol. 43, no. 2, pp. 124–133]. DOI: [10.18413/2075-4671-2019-43-2-124-133](https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-2-124-133)
18. Brus D.J. Statistical Sampling Approaches for Soil Monitoring. *European Jour-
nal of Soil Science*, 2014, vol. 65, iss. 6, pp. 779–791. DOI: [10.1111/ejss.12176](https://doi.org/10.1111/ejss.12176)
19. Castro Filho C., Lourenço A., Guimarães M. de F., Fonseca I.C.B. Aggregate
Stability under Different Soil Management Systems in a Red Latosol in the State of Parana,
Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2002, vol. 65, iss. 1, pp. 45–51. DOI: [10.1016/S0167-1987\(01\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00275-6)
20. Chenu C., Le Bissonnais Y., Arrouays D. Organic Matter Influence on Clay Wet-
tability and Soil Aggregate Stability. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, vol. 64,
iss. 4, pp. 1479–1486. DOI: [10.2136/sssaj2000.6441479x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441479x)
21. Haynes R.J., Naidu R. Influence of Lime, Fertilizer and Manure Applications on
Soil Organic Matter Content and Soil Physical Conditions: A Review. *Nutrient Cycling in
Agroecosystems*, 1998, vol. 51, pp. 123–137. DOI: [10.1023/A:1009738307837](https://doi.org/10.1023/A:1009738307837)
22. Hůla J., Novák P. Translocation of Soil Particles during Primary Soil Tillage.
Agronomy Research, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 392–399.

23. Munkholm L.J., SchjØnning P., Debosz K., Jensen H.E., Christensen B.T. Aggregate Strength and Mechanical Behaviour of a Sandy Loam Soil under Long-Term Fertilization Treatments. *European Journal of Soil Science*, 2002, vol. 53, iss. 1, pp. 129–137. DOI: [10.1046/j.1365-2389.2002.00424.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00424.x)

24. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The Effect of Organic Matter on the Difference between Particle-Size Distribution Data Obtained by the Sedimentometric and Laser Diffraction Methods. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, pp. S84–S90. DOI: [10.1134/S106422930613014X](https://doi.org/10.1134/S106422930613014X)

25. Subbian P., Lal R., Akala V. Long-Term Effects of Cropping Systems and Fertilizers on Soil Physical Properties. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2000, vol. 16, iss. 2, pp. 89–100. DOI: [10.1300/J064v16n02_08](https://doi.org/10.1300/J064v16n02_08)

CHANGES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF SEGREGATIONAL CHERNOZEMS IN AGROFOREST LANDSCAPES OF THE CENTRAL CHERNOZEM REGION

V.I. Turusov, Doctor of Agriculture, Academician of RAS;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5853-9549>

Yu.I. Cheverdin, Doctor of Biology, Chief Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9905-0547>

V.A. Bespalov, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-929X>

T.V. Titova, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6435-5455>

V.V. Dokuchaev Scientific Research Institute of Agriculture of the Central-Chernozem Zone, 81, kvartal V, pos. 2-go uchastka Instituta imeni Dokuchayeva, Talovskiy District, Voronezh Region, 397463, Russian Federation; e-mail: niishlc@mail.ru

The basic physical properties of chernozems in agroforest landscapes of the Central Chernozem region are studied within the framework of the program by the topic of the state assignment for 2018–2020. The studies carried out in the conditions of agrocenoses and undisturbed ecosystems were divided by the effect of agrogenic and agroforestral nature. Agrogenic effect was considered through a case study of the fallow lands put in operation in tillage. While agroforestral effect was considered through a case study of the influence of forest belts on soil cover. It is found that rearrangement of soil aggregates number takes place under the influence of forest belts and at introduction of fallow lands to agricultural use, but in different scenarios. The soil blocky fraction (less than 10 mm) in the arable horizon increases by 6–14 times under the agrogenic effect in comparison with the fallow. Contrary to this, the share of silt fraction (less than 0.25 mm) on the arable land decreases by 2–4 times and the structure coefficient decreases by 8–13 times. The minimum content of agronomically valuable aggregates (sum of 0.25–10 mm) is registered for the arable land soils compared to the fellow and forest belt for all selected layers. The average amount of aggregates lies in the range of 58–73 % for the arable lands, whereas the share of aggregates in the size of 0.25–10 mm is in the range of 85–95 % for the forest belt and fallow. A content reduction in the fractions of the following sizes 0.25–0.5; 0.5–1; 1–2; 2–3 and 3–5 mm influenced on a decrease in the agronomically valuable structure of the arable land in comparison with the fallow. The agroforestral effect on the structural composition of soil cover is more gently. The share of soil blocky fraction increases slightly. The sum of the agronomically valuable aggregates in the soil of the forest belt in depth of 10–20 and 20–40 cm corresponds the chernozem level of the fallow. Herewith, the share of the silt fraction in the soils of the natural

cenoses is higher. And as a consequence of this, the values of the structural soil coefficient of the forest belt chernozem insignificantly exceed similar values in the fallow soils at the same depths. Statistical features of distribution of the basic aggregates in the soils subjected to intensive agrogenic and agroforestral influence are established in comparison with the fallow lands. Some statistical characteristics of distribution of the basic structural separates of the chernozem soils are calculated. The indicators of bulk density at various depths of the study sites are defined. They increase in the row of fallow – forest belt – arable land.

For citation: Turusov V.I., Cheverdin Yu.I., Bespalov V.A., Titova T.V. Changes in the Physical Properties of Segregational Chernozems in Agroforest Landscapes of the Central Chernozem Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 95–112. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-95-112

Keywords: forest belts, fallows, chernozem, structural composition of soils, bulk density.

Поступила 08.08.19 / Received on August 8, 2019

УДК 630*561.24:812:582.475.4:181

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-113-122

VARIABILITY PROPERTIES OF *Pinus sylvestris* L. WOOD IN GROWING STOCK UNDER TECHNOGENIC IMPACT

R.V. Schekalev¹, *Candidate of Biology*; *ResearcherID:* [AAH-3861-2019](https://orcid.org/0000-0001-7657-1705),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7657-1705>

A.A. Martynyuk¹, *Doctor of Agriculture, Corresp. Member of RAS*; *ResearcherID:* [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

V.I. Melekhov², *Doctor of Engineering, Prof.*; *ResearcherID:* [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institut-skaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation;
e-mail: schekalevrv@yandex.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: v.melekhov@narfu.ru

The issues of variability of pinewood (*Pinus sylvestris* L.) properties in growing stock located in the vicinity of operating industrial facilities is still relevant. The paper aims to assess the technogenic impact on the radial increment as well as the physical and mechanical properties of pinewood in the conditions of Northern Taiga. The impact of the distance from the source of emissions on variability of the radial increment and the volume and technical properties of wood were determined. Distribution maps of the conventional wood density and its compressive strength along the fibers inside the trunk were formed. It is found that with a decrease in the distance from the source of emissions, the average value of the radial increment of trees occurs. It is revealed that there is a decrease in wood density from the butt to the top, and from the pith to the sapwood. Also, it is determined that wood density increases as the distance to the source of emissions decreases. However, there were obtained no valid differences of the indicator of wood resistance to compression along the fibers at various distances from to the source of emissions.

For citation: Schekalev R.V., Martynyuk A.A., Melekhov V.I. Variability Properties of *Pinus sylvestris* L. Wood in Growing Stock under Technogenic Impact. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 113–122. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-113-122

Keywords: pine, wood, radial increment, wood density, wood compressive strength along the fibers, emission source distance.

Introduction

The issue of studying heterogeneity of the pine trunk (*Pinus sylvestris* L.) in terms of the physical and mechanical properties of wood is still of practical interest. Such studies help to better understand the process of wood formation at various age stages of tree growth and depending on the growing conditions [14, 15]. In tandem with the study of growth, wood density indices also make it possible to evaluate the intensity of tree cambium activity in various trunk zones [19, 34]. Uniformity of wood density inside the trunk appears to be its advantage in terms of wood processing, whereas sharp fluctuations of strength characteristics of wood inside the trunk up and down its section are unfavourable for most product ranges [12].

It is obvious that within a single forest stand, the physical and mechanical wood properties of individual trees can vary significantly. Typically, the variability of these properties occurs at a low level of variability. For example, specific wood density of pine in an air-dry state fluctuates within the range from 0.41 to 0.60 g/cm³. Trees of the same age class, similar in development and growing in the identical conditions are supposed to form wood with similar properties [3, 13, 22, 25, 26, 32].

With the advancement to the south from the northern areas, pine shows an expected decrease in the technical properties of wood. Our data shows [3, 16, 28, 33] that the average value of the compressive strength along the fibers of pine, which grows in the Northern European conditions, is 450–500; in the Central European regions – 439; within the territory of Ukraine and Białowieża Forest – 384 and 377 kgf/cm², respectively (measurement units are given in accordance with the data sources). Moreover, there is a functional dependence of the technical and bulk properties on the structure of annual growth. It should also be taken into account that the data on the high variability of the physical and mechanical properties of wood from individual trees that can be found in scholarly literature is substantially influenced by differences in research objects and varying methodological approaches used by the authors [20].

The studies show [4, 5, 21, 30, 33] that due to the impact of industrial emissions, in particular the wood processing industry, a decrease in the period of cambial activity of conifers was observed, as a result the number of early wood tracheids declined in the annual ring of the wood trunk, while the share of late wood grew alongside the deterioration of the growing conditions. Also, there is an upward trend in the percentage of late tracheids in the structure of the annual ring as long as the distance to the sources of pollution decreases. As the distance to them gets shorter, a consistent decrease in the total value of the radial increment is noted. The impact of the anthropogenic load is more vividly reflected in low-productive forest stands, in particular, in forest stands of the sphagnum group.

The study purpose is an analysis of the technogenic impact on the radial increment as well as the physical and mechanical properties of pine wood in Northern Taiga.

Research objects and methods

The research was carried out on 11 sample plots (trial areas) in the ripe pine stands of the 5th quality class of the fruticulose-sphagnum forest type in the Northern Taiga zone (the area of the Northern Dvina River estuary). Establishment of the sample plots was done at various distances from the nearest source of aerotechnogenic emissions (Arkhangelsk Pulp and Paper Mill; Arkhangelsk Thermal Power Plant) in accordance with the procedures, recommendations and regulatory reference materials adopted from the forest management practice [2, 8, 18, 23]. The distance towards the source of emissions reflects the degree of aerotechnogenic pollution [29].

There was a complete inventory of trees carried out on the sample plots with the measurement step of 2-cm thickness. Based on the results of the measurement performed with the help of the methods adopted from forest inventory, the average diameter, height, sum of the trunk cross-sections, the overall stock, and the composition formula of the forest stand were determined. To determine the radial

increment at the height of 1.3 m from the trunk base the cores of the pinewood were selected based on the method of random sampling (not less than 30 pine trees per each sample plot).

To determine the physical and mechanical wood properties beyond the area of the sample plots, 7 model trees were selected [10]. A sample of saw cuts and cores from each model tree was done at the following heights: 1.3 m from the root collar; at relative heights (H) of the trunk: 0, 1/4, 2/4, 3/4. At each height, up to 5 wood samples of 20×20×30 mm in size were selected: 3 samples in the core (center, middle and periphery) and 2 samples in the sapwood [7]. The zone of juvenile wood was excluded from the experiment. The value of the radial increment as well as the width of the zones of early and late tracheids was measured in wood cores using a stereoscopic microscope MBS-1 with an accuracy of ± 0.01 mm. The percentage of late wood in the annual ring was calculated [24].

The basic wood density was determined based on the method of maximum sample humidity, which has a relatively small volume [9, 13, 31]. The basic wood density characterizes the dry basis of lignin in the volume unit of the fresh wood. In addition to it, an indicator of wood compressive strength along the fibers was chosen as a criterion of wood mechanical properties. Also, the validity of this choice is determined by the fact that wood structures, for the most part, while in operation appear to undergo a load precisely under compression and, to a lesser extent, structures undergo a load under bending and tension [16, 30]. Moreover, when conducting strength tests, it is enough to provide a load along the fibers, that is, along the trunk axis, while rotation around the axis does not affect the accuracy of the experiment in any way, which does not hold true, for example, when determining the wood's ultimate strength under compression across the fibers. This largely determines the low level of variability of this indicator [6, 13, 33]. The research test [11] was conducted with the help of a universal testing machine SHIMADZU, model AGS-100kNX, which was verified at the Arkhangelsk Center of Standardization and Metrology.

The processing of the experimental data is based on correlation analysis [17]. The findings and regularities are reliable at a significance level of 5 %. All measurement results were processed using MS Excel and developed to accelerate calculations of analytical programs in C++ using a specialized statistical analysis and forecasting package ALGLIB.

Results and discussion

As a result of this study, it was determined that the total value of the radial increment in pine stands of the fruticulose-sphagnum forest type decreased when approaching the source of emissions (Fig. 1). The approximation ratio of the obtained dependences increases from the center of the core to the sapwood. At the same time, in the central part of the core, the coefficient of determination (R^2) does not reach the value of 0.2. The lack of dependence is obviously associated with a low level of aerotechnogenic pollution in the 1940s. The detected dependence is marked at the heights (0H, 1/4H, 1.3 m) located in the trunk part cleared of wood knots. The difference in the radial increment of the sapwood and the core periphery between the forest stands growing at a distance of up to 8 km and farther from the source of emissions is noticed.

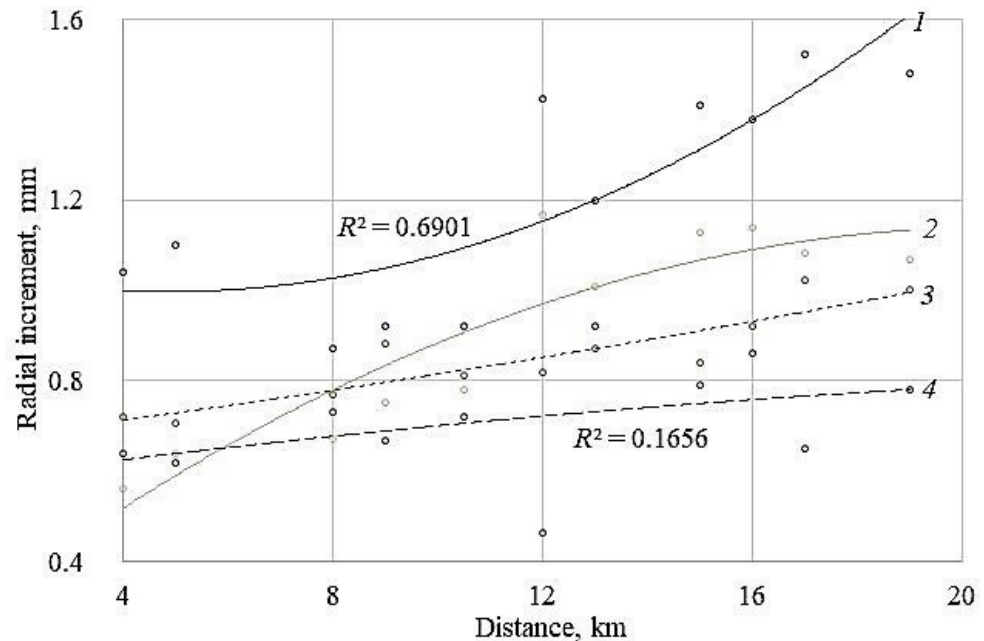


Fig. 1. Variability of the radial increment at the pine trunk bottom depending on the distance from the source of emissions: 1 – sapwood; 2 – core periphery; 3 – core middle; 4 – core center

Fluctuation of variability of the radial increment (all along the trunk radius) occurs within the range of 25–54 % with an increase in the basipetal direction inside the trunk and when approaching the emission source. A tight correlation between the value of growth in diameter and the width of the late wood zone (Table) is observed, which is very logical and consistent with conclusions of other authors [1, 4, 27, 29]. When evaluating growth only over the last 30 years, the correlation ratio significantly reduces. The result obtained requires additional studies to be conducted and applying measurements of the anatomical organization of individual elements in the radial increment such as the number of tracheids of the early and late wood zone, their linear sizes, etc.

Values of the correlation ratio between growth and width of the late wood zone

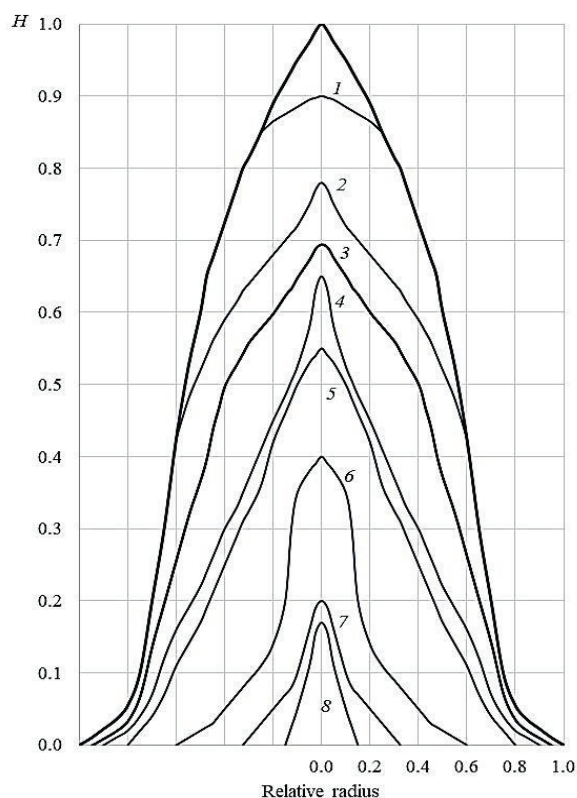
Distance, km	4	8	12	16	20
Correlation ratio (r)	0.815	0.836	0.797	0.781	0.823

The width of the late wood zone and the share of its participation in the formation of the annual ring are some of the most important indicators that characterize the technical properties of wood; the higher their value, the stronger the wood both at fracture and compression. Based on the research results, it becomes possible to talk about a downward trend in correlation between the percentage of the late wood and increment value as the distance from the source of pollution increases; the level of the environmental pollution decreases (Table).

Based on the results of laboratory measurements of basic wood density, a data set was formed, during the processing of which maps of the density distribution inside the trunk were designed separately for the experimental plots, and on the whole for the study area (Fig. 2). A decrease in the basic density was determined

alongside an increase in the height of the wood sample with a slight levelling off in the crown area. This pattern seems quite logical, provided that the distribution of the main mechanical loads on the butt-log portion of the trunk is taken into account. The nature of the dynamics of wood density along the trunk radius for various heights of sample selection is described by the following dependences: *s*-shaped curve at the height of $0H$, a hyperbolic curve at the breast height (1.3 m); and a parabolic curve or a straight line at the heights of $1/4H$ and $2/4H$. The density changes between wood in the central part of the core and sapwood at the heights of $0H$ and 1.3 m are significant.

Fig. 2. Wood density distribution inside the pine trunk. Forest type – fruticulose-sphagnum; area – the Northern Dvina River estuary. Isolines, g/cm^3 : 1 – 350; 2 – 375; 3 – 400; 4 – 425; 5 – 450; 6 – 475; 7 – 500; 8 – 525



It was found that pinewood density at the recorded heights (average radial value) of the sample increased whenever the distance to the source of emissions decreased (Fig. 3).

On average, the region under study reveals a consistent positive correlation of the basic density and wood compressive strength along the fibers, both in the core and in the sapwood of the trunk (0.767 and 0.547, respectively). The different nature of the dynamics of the indicator under consideration along the radius depending on the height of the sample was determined (Fig. 4). In the butt-log portion of the trunk ($0H$ and 1.3 m), the indicator of wood resistance to compression decreases incrementally with the advancement along the radius from the center of the trunk. In contrast, at heights above $1/2 H$ and $1/4H$ it increases.

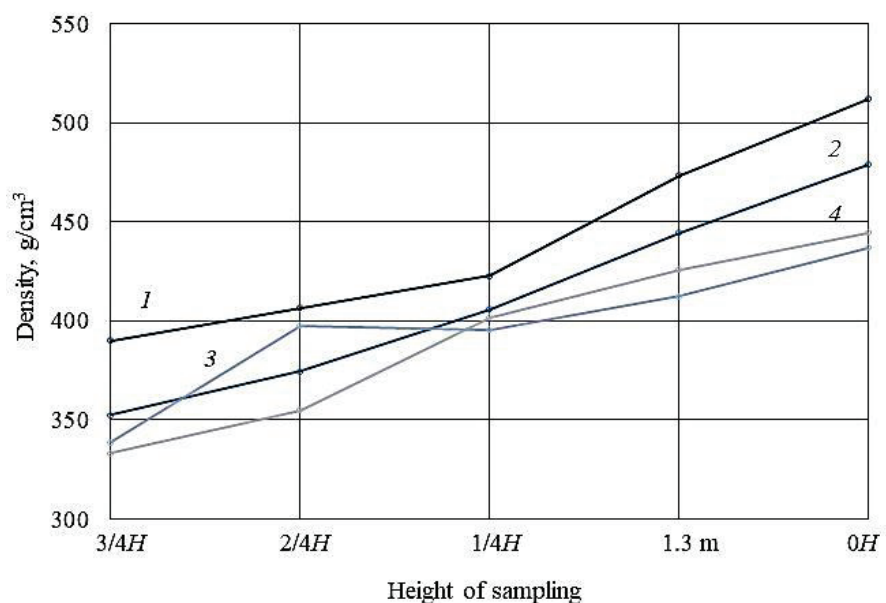


Fig. 3. Wood density distribution inside the pine trunk at different distances from the source of emissions, km: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16

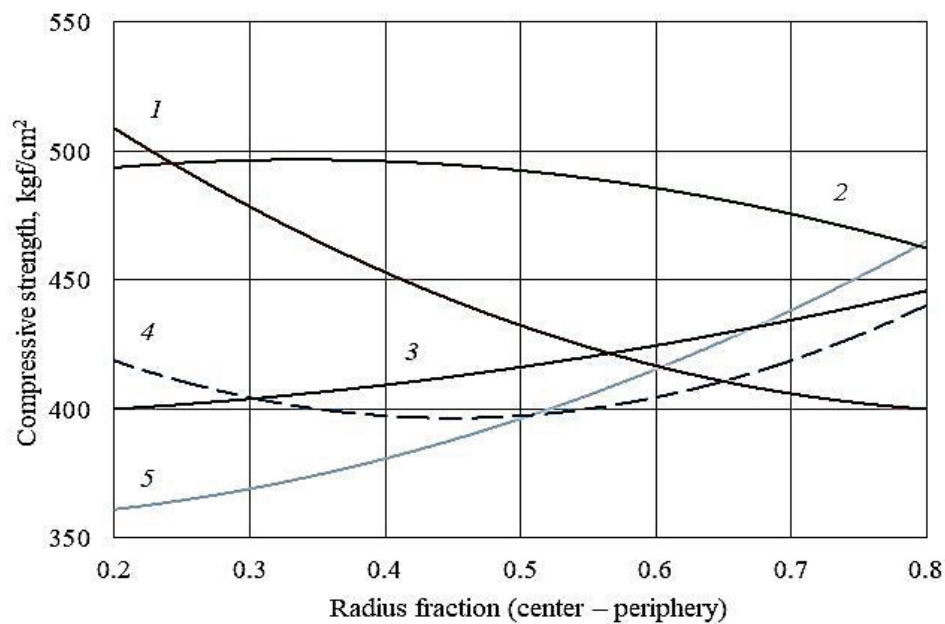


Fig. 4. Dynamics of wood resistance to compression along the fibers inside the pine trunk: 1 – 0H; 2 – 1.3 m; 3 – 1/4H; 4 – 2/4H; 5 – 3/4H (height)

The level of variability of the indicator of wood compressive strength along the fibers does not exceed 20 %. When comparing the values of the indicator under consideration at different distances from the source of emissions, no valid differences were registered.

Conclusions

1. As the distance from the source of emissions decreases, the value of the radial increment of the fruticulose-sphagnum pine stands in the northern Taiga sub-zone decreases, while the density of pine wood increases.
2. Inside the trunk of a growing tree wood density decreases from the butt log to the top and from the center of the trunk to the sapwood.
3. A positive correlation between indicators of the relative wood density and its resistance to compression along the fibers was determined. No significant differences of this indicator at various distances from the source of emissions were revealed.

REFERENCES

1. Алексеев А.С. Радиальный прирост деревьев и древостоев в условиях атмосферного загрязнения // Лесоведение. 1993. № 4. С. 66–71. [Alekseev A.S. Radial Increment of Trees and Stands under Ambient Conditions. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1993, no. 4, pp. 66–71].
2. Анучин Н.П. Лесная таксация. 5-е изд. М.: Лесн. пром-ть, 1982. 552 с. [Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p.].
3. Бабич Н.А., Мелехов В.И., Антонов А.М., Клевцов Д.Н., Коновалов Д.Ю. Влияние условий местопроизрастания на качество древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) в посевах // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. XXIV, № 1. С. 54–58. [Babich N.A., Melekhov V.I., Antonov A.M., Klevtsov D.N., Konovalov D.Yu. Impact of Habitat Conditions on the Quality of Pinewood (*Pinus sylvestris* L.) in Plantings. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2007, vol. 24, no. 1, pp. 54–58].
4. Белов А.А. Особенности радиального прироста древесины в ослабленных сосняках-черничниках Брянской области, загрязненных радионуклидами // Лесохоз. информ. 2017. № 1. С. 42–51. [Belov A.A. Features of the Radial Wood Growth in the Weakened Pine-Bilberries of Bryansk Region Contaminated with Radionuclides. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2017, no. 1, pp. 42–51].
5. Вахнина И.Л. Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зеленой зоне г. Читы во второй половине прошлого столетия // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 180–182. [Vakhnina I.L. Radial Increment in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Greenbelt of the City of Chita in the Latter Half of the Last Century. *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and Natural Resources], 2011, no. 1, pp. 180–182].
6. Вихров В.Е., Лобасенок А.К. Технические свойства древесины в связи с типами леса. Минск: Изд-во М-ва высш., сред. спец. и проф. образования БССР, 1963. 72 с. [Vikhrov V.E., Lobasenok A.K. *Technical Properties of Wood in Relation to Forest Types*. Minsk, MVSSPO BSSR Publ., 1963. 72 p.].
7. Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. Измерение массы, объема и плотности. М.: Изд-во стандартов, 1972. 624 с. [Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovskiy A.N. *Measurement of Mass, Volume and Density*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1972. 624 p.].
8. ГОСТ 16128–70. Пробные площади лесоустроительные. Методы закладки. М.: Изд-во стандартов, 1971. 23 с. [GOST 16128-70. *Forest Management Sampling Plots. Methods of Laying out*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1971. 23 p.].
9. ГОСТ 16483.1–84. Древесина. Метод определения плотности. М.: Изд-во стандартов, 1985. 6 с. [GOST 16483.1-84. *Wood. Methods for Definition of Density*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1985. 6 p.].
10. ГОСТ 16483.6–80. Древесина. Методы отбора модельных деревьев и разделки их на кряжи для определения физико-механических свойств древесины насаждений. М.: Изд-во стандартов, 1980. 4 с. [GOST 16483.6-80. *Wood. Method of Selection of Model Trees and Logs for Determination of Physical and Mechanical Properties of Wood Plantations*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1980. 4 p.].

11. ГОСТ 16483.10–73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с. [GOST 16483.10–73. *Wood. Methods for Determination of Ultimate Strength in Compression Parallel the Grain*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 7 p.].
12. Гриб В.М. Влияние хозяйственных мероприятий на качество древесины сосны обыкновенной // Совершенствование лесного хозяйства и защитного лесоразведения: сб. науч. тр. УСХА. Киев, 1987. С. 55–58. [Grib V.M. The Influence of Economic Measures on the Quality of Scots Pine Wood. *Improving Forestry and Protective Afforestation: Collection of Academic Papers of USKhA*. Kiev, 1987, pp. 55–58].
13. Древесина. Показатели физико-механических свойств. РТМ. М.: Ком. стандартов при СМ СССР, 1962. 48 с. [Wood. *Characteristics of Physical-Mechanical Properties. Technical Guides*. Moscow, Committee of Standards at the Council of Ministers of the USSR, 1962. 48 p.].
14. Кищенко И.Т. Формирование древесины ствола *Picea abies* (L.) Karst. в разных типах сообществ таежной зоны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 32–39. [Kishchenko I.T. Formation of *Picea abies* (L.) Karst. Trunk Wood in Different Taiga Zone Communities. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 32–39]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.1.32](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.32), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f41/32_39.pdf
15. Косиченко Н.Е. Формирование структуры и плотности в онтогенезе // Строение, свойства и качество древесины-2000: материалы III межд. симп. Петрозаводск: ИЛ КарНЦ РАН, 2000. С. 58–61. [Kosichenko N.E. *Formation of Structure and Density in Ontogeny. Structure, Properties and Quality of Wood-2000: Proceedings of the 3rd International Symposium*. Petrozavodsk, IL KarRC RAS Publ., 2000, pp. 58–61].
16. Леонтьев Н.Л. Исследование физико-механических свойств кольской сосны // Физико-механические свойства древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. С. 122–141. [Leont'yev N.L. A Study of the Physical and Mechanical Properties of Kola Pine. *Physical and Mechanical Properties of Wood*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953, pp. 122–141].
17. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений. 2-е изд. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 250 с. [Leont'yev N.L. *Technique of Statistical Computations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 250 p.].
18. Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР: нормативные материалы для Архангельской, Вологодской областей и Коми АССР. Архангельск: Правда Севера, 1986. 358 с. [Forest Inventory Handbook for the Northeast of the European Part of the USSR: Guidance Materials for Arkhangelsk and Vologda Regions and the Komi ASSR. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 1986. 358 p.].
19. Лобжанидзе Э.Д., Гоциридзе Л.А., Цинцадзе М.С. Биология образования древесины сосны // Современные проблемы лесоведения. Красноярск, 1987. С. 64–65. [Lobzhanidze E.D., Gotsiridze L.A., Tsintsadze M.S. Biology of Pinewood Formation. *Modern Issues of Wood Science*. Krasnoyarsk, 1987, pp. 64–65].
20. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (На примере семейства *Pinaceae* на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с. [Mamayev S.A. *Forms of Intraspecific Variability in Woody Plants (Case Study of Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p.].
21. Мартынюк А.А. Сосновые экосистемы в условиях аэротехногенного загрязнения. М.: ВНИИЛМ, 2004. 160 с. [Martynyuk A.A. *Pine Ecosystems in the Conditions of Aerotechnogenic Pollution*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 160 p.].
22. Мелехов И.С. Значение структуры годичных слоев и ее динамики в лесоводстве и дендроклиматологии // Изв. вузов. Лесн. журн. 1979. № 4. С. 6–14. [Melekhov V.I. The value of the structure of annual layers and its dynamics in forestry and dendroclimatology. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1979, no. 4, pp. 6–14]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1979.pdf>

23. Методические рекомендации по выделению групп типов леса в таежной зоне европейской части РСФСР. М.: ВНИИЛМ, 1979. 61 с. [*Instructional Guidelines for the Identification of Forest Type Groups in the Taiga Zone of the European Part of the RSFSR*. Moscow, VNIILM Publ., 1979. 61 p.].

24. Молчанов А.А., Смирнов В.В. Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 95 с. [Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Methodology for Studying the Increment of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 95 p.].

25. Москалева С.А., Чибисов Г.А., Крыжановская Л.Е., Белова Т.В. Влияние рубок ухода на плотность древесины стволов сосны в продольном направлении // Материалы отчет. сессии по итогам НИР за 1987 г. Архангельск: АИЛИХ, 1988. С. 63–65. [Moskaleva S.A., Chibisov G.A., Kryzhanovskaya L.E., Belova T.V. The Influence of Cleaning Cutting on Wood Density of Pine Trunks along the Length. *Proceedings of the Reporting Session Summarizing the Research Results in 1987*. Arkhangelsk, AILILKh Publ., 1988, pp. 63–65].

26. Перелыгин Л.М. Строение древесины. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 200 с. [Perelygin L.M. *Wood Structure*. Moscow, AN SSSR Publ., 1954. 200 p.].

27. Пиндюра Б.С., Семенчук Е.С. Изменение соотношения прироста ранней и поздней древесины у дефолированных хвойных в эксперименте // Хвойные деревья и насекомые-дендрофаги. Иркутск: Сиб. ин-т физиологии и биохимии растений, 1978. С. 105–113. [Pindyura B.S., Semenchuk E.S. Change in the Growth Ratio of the Early and Late Wood in Defoliated Conifers in the Experiment. *Conifers and Dendrophagous Insects*. Irkutsk, SIFIBR Publ., 1978, pp. 105–113].

28. Полубояринов О.И., Федоров Р.Б. Изменчивость плотности древесины сосны и ели в Европейской части СССР // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Л.: ЛТА, 1982. Вып. 11. С. 128–133. [Poluboyarinov O.I., Fedorov R.B. Variability in Wood Density of Pine and Spruce in the European Part of the USSR. *Forestry, Forest Crops and Soil Science*. Leningrad, LTA Publ., 1982, iss. 11, pp. 128–133].

29. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения. Диагностика состояния. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 333 с. [Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Konovalov V.N. *Forest Ecosystems of the Northern Dvina Basin in the Conditions of Atmospheric Pollution. Diagnostics*. Yekaterinburg, UB RAN Publ., 2004. 333 p.].

30. Тарханов С.Н., Щекалев Р.В. Внутриорганизменная и внутрипопуляционная изменчивость количественных признаков *Pinus sylvestris* L. в северной тайге Северодвинского бассейна при атмосферном загрязнении // Лесн. вестн. 2007. № 5. С. 116–123. [Tarkhanov S.N., Schekalev R.V. Variability of Quantitative Attributes *Pinus sylvestris* L. at a Level of an Organism and Group in Northern Taiga at Atmospheric Pollution. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2007, no. 5, pp. 116–123].

31. Уголев Б.Н. Испытания древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 251 с. [Ugolev B.N. *Testing of Wood and Wood-Based Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 251 p.].

32. Чавчавадзе Е.С. Древесина хвойных. Л.: Наука, 1979. 169 с. [Chavchavadze E.S. *Wood of Conifers*. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 169 p.].

33. Щекалев Р.В., Тарханов С.Н. Радиальный прирост и качество древесины сосны обыкновенной в условиях атмосферного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 125 с. [Schekalev R.V., Tarhanov S.N. *Radial Increment and Quality of Scots Pine Wood in Terms of Atmospheric Pollution*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2006. 125 p.].

34. Seth M.K., Chaman L., Madhu B. Effect of Several Variables on Specific Gravity in Different Zones of Blue Pine. *Indian Journal of Forestry*, 1988, vol. 11(1), pp. 42–47.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСИНЫ *Pinus sylvestris* L. В ДРЕВОСТОЯХ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Р.В. Щекалев¹, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAH-3861-2019](https://orcid.org/0000-0001-7657-1705),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7657-1705>

А.А. Мартынюк¹, д-р с.-х. наук, чл.-кор. РАН; ResearcherID: [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

В.И. Мелехов², д-р техн. наук, проф; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

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

¹Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; e-mail: schekalevr@yandex.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.melekhov@narfu.ru

Вопросы изменчивости характеристик древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в насаждениях, произрастающих в зонах влияния промышленных объектов, не теряют своей актуальности. Цель данной работы – оценка влияния техногенного воздействия на радиальный прирост и физико-механические характеристики древесины сосны в условиях северной тайги. Проанализировано влияние фактора расстояния от источника промышленных выбросов на изменчивость радиального прироста, объемных и технических характеристик древесины. Сформированы карты распределения условной плотности древесины и ее сопротивления сжатию вдоль волокон внутри ствола. Выявлено, что с сокращением расстояния до источника выбросов происходит уменьшение средней величины радиального прироста деревьев. Установлено снижение плотности древесины от основания к верхней части дерева и от сердцевины ствола к его заболони. Определена тенденция повышения плотности древесины с сокращением расстояния до источника эмиссий. Достоверных различий показателя сопротивления древесины сжатию вдоль волокон на разном расстоянии от источника эмиссий не выявлено.

Для цитирования: Schekalev R.V., Martynyuk A.A., Melekhov V.I. Variability Properties of *Pinus sylvestris* L. Wood in Growing Stock under Technogenic Impact // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 113–122. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-113-122

Ключевые слова: сосна, древесина, радиальный прирост, плотность древесины, сопротивление древесины сжатию вдоль волокон, расстояние до источника выбросов.

Поступила 29.12.19 / Received on December 29, 2019



УДК 634.31

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-123-133

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕСУРС ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ЛЕСХОЗОВ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

А.Н. Заикин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

С.А. Коньшакова, канд. экон. наук, доц.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-1488>

В.В. Сиваков, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

С.Г. Кузнецов, канд. экон. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-2732>

Н.А. Булхов, канд. экон. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0373-374X>

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru, glер@bk.ru, sv@bgtu.ru, pro_econom@bgtu.ru, pismaanick@mail.ru

Лесной сектор экономики России – сложноорганизованная система отраслей и видов деятельности, в которую входят лесозаготовительное, деревообрабатывающее, мебельное и целлюлозно-бумажное производства. Базовой точкой развития любого из указанных направлений деятельности является организация лесозаготовок, во многом формирующая эффективность функционирования любого предприятия этого сектора. Оценка факторов, определяющих эффективность лесозаготовительной деятельности, является актуальной задачей как теоретических, так и экспериментально-полевых исследований, способствующих выявлению и конкретизации проблем, снижающих эффективность лесозаготовительного и перерабатывающего производств с учетом региональной специфики. Развитие конкурентных отношений в лесном хозяйстве позволяет рассмотреть особую роль лесхозов в лесном секторе регионов, сформировать соответствующую региональной политике институциональную структуру взаимоотношений участников лесопользования. Имеется два варианта развития лесного хозяйства: поддержка малого бизнеса, работающего в лесном комплексе, и привлечение крупных инвесторов к освоению ресурсов леса. Реализация приоритетных национальных проектов в данной области наиболее привлекательна для крупных многопрофильных лесоперерабатывающих предприятий, обладающих значительным финансовым потенциалом и готовых осваивать лесные ресурсы региона в долгосрочной перспективе. Современные лесхозы, выполняющие роль государственного институционального участника лесных отношений, осуществляют лесозаготовительную деятельность в наименее привлекательных, с конкурентной точки зрения, участках леса, способствуя своевременному и качественному исполнению плана освоения лесов, поступлению доходов в местные бюджеты. Если государственные автономные организации лесного хозяйства функционируют в регионе, то региональная политика в области развития лесного комплекса должна учитывать решение задач развития лесхозов за счет системной модернизации их технической базы, что позволит последним стать полноправными участниками лесных отношений, обеспечивающими эффективное развитие лесозаготовок. Однако серьезная модернизация лесхозов невозможна без определения реального состояния лесозаготовительной техники. Объектом исследования является лесной сектор Республики Башкортостан с объемом лесного фонда 760,3 млн м³ и ежегодной заготовкой древесины 9156 тыс. м³, в котором рабо-

тают 32 государственные автономные организации лесного хозяйства. Авторами в декабре 2017 г. была проведена оценка технического состояния лесозаготовительной техники лесохозяйственных учреждений Республики Башкортостан для определения ее состояния и возможностей эффективного использования, формирования рекомендаций по повышению качества организации лесозаготовок. По результатам инвентаризации этой техники установлено общее ее количество (184 ед.), 57 % из которого относятся к колесным тракторам. Специализированная трелевочная техника практически отсутствует. Важной методической составляющей проведенных исследований являлась оценка уровня износа используемой техники. Для этого была использована методология, соответствующая Федеральному стандарту «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки». В качестве критериев оценки накопленного износа техники применялась утрата машинами их потребительской стоимости в связи с износом, при этом рассматривались следующие оценочные показатели: изменение ресурса машины; изменение издержек производства, связанных с реализацией единицы ресурса в течение срока службы. Выявлено, что более половины лесхозов республики Башкортостан не обеспечены лесозаготовительной техникой для освоения плановых объемов лесозаготовок; более 80 % имеющейся в их распоряжении техники имеет износ более 90 %, при котором ее применение экономически нецелесообразно; лесхозы Республики Башкортостан имеют слабую ремонтную базу и недостаточное количество квалифицированных кадров.

Для цитирования: Заикин А.Н., Коньшакова С.А., Сиваков В.В., Кузнецов С.Г., Булхов Н.А. Технологический ресурс лесозаготовительной техники лесхозов Республики Башкортостан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 123–133. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-123-133

Ключевые слова: лесхоз, лесозаготовительная техника, технологический ресурс, износ, оценка состояния техники, Республика Башкортостан.

Введение

Лесной сектор экономики Российской Федерации представляет собой сложноорганизованную систему отраслей и видов деятельности. В эту систему входят лесозаготовительная деятельность, деревообрабатывающее, мебельное и целлюлозно-бумажное производства. Базовой точкой развития любого направления деятельности, ориентированного на лесопотребление и переработку лесных ресурсов, является организация лесозаготовок. Именно с лесозаготовительной деятельности начинается формирование эффективности функционирования любого предприятия лесного сектора. Оценка факторов, определяющих эффективность лесозаготовительной деятельности, – актуальная задача как теоретических, так и экспериментально-полевых исследований, позволяющих выявлять и конкретизировать проблемы, снижающие эффективность лесозаготовительного и перерабатывающего производств с учетом региональной специфики.

Проблема организации эффективности лесозаготовок актуальна уже не одно десятилетие, активно обсуждается и освещается в работах А.И. Смирновой, Г.А. Прешкина, В.А. Лукина, С.О. Медведева и др. [6, 9, 12]. Ученые и специалисты в качестве факторов, определяющих эффективность лесозаготовок, выделяют природные, технологические, технические и социальные [1–3, 11, 15, 17, 19].

Лесной кодекс России [7] определяет, что основными территориальными единицами управления в области использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов являются лесничества и лесопарки. Заготовка древесины

представляет собой предпринимательскую деятельность, связанную с рубкой лесных насаждений, а также с вывозкой древесины из леса.

Объекты и методы исследования

Развитие конкурентных отношений в лесном хозяйстве позволяет по-новому рассмотреть роль лесхозов в лесном секторе региона, сформировать такую институциональную структуру взаимоотношений участников лесопользования, которая бы соответствовала региональной политике.

В связи с этим внимание к малому бизнесу в лесном комплексе обусловлено необходимостью его поддержки. Значительная часть лесных ресурсов еще не освоена, а на доступных участках требуется внедрение интенсивного лесопользования. Основной перспективой становится переработка древесины внутри страны. Развивать импортозамещающее производство возможно в различных сегментах целлюлозно-бумажной и химической промышленности. Есть спрос на рынке деревянного домостроения, в мебельном производстве и др. В последнем случае небольшие деревообрабатывающие фабрики, например, по производству деревянных домов, получают сырье от таких же небольших лесозаготовительных предприятий. Получается, что наращивать объемы заготовки древесины должны не только крупные предприятия, но и малый бизнес. Более того, если проанализировать данные статистики, окажется, что именно небольшие предприятия играют весьма заметную роль в лесозаготовках.

Альтернативный вариант развития лесозаготовительного хозяйства в регионе предполагает привлечение крупных инвесторов к освоению лесных ресурсов. Реализация приоритетных национальных проектов в области освоения лесов наиболее привлекательна для больших многопрофильных лесоперерабатывающих предприятий, обладающих значительным финансовым потенциалом и готовых осваивать лесные ресурсы региона в долгосрочной перспективе.

Таким образом, в освоении лесов региональные власти либо отдают предпочтение крупному бизнесу, либо ориентируются на развитие малых и средних предприятий.

Современные лесхозы выполняют роль государственного институционального участника лесных отношений. Их деятельность, и вообще наличие их в системе лесного хозяйства региона, позволяет осуществлять лесозаготовительную деятельность в наименее привлекательных, с конкурентной точки зрения, участках леса, способствуя своевременному и качественному исполнению плана освоения лесов, поступлению доходов в местные бюджеты.

Если государственные автономные организации лесного хозяйства функционируют в регионе, то региональная политика в области развития лесного комплекса должна учитывать решение задач развития лесхозов за счет системной модернизации их технической базы. Только исполнение данного условия позволит лесхозам стать полноправными участниками лесных отношений региона, обеспечивающими эффективное развитие лесозаготовительного сектора.

Объектом исследований является лесной сектор Республики Башкортостан. Высокая лесистость территории, составляющая 39,8 %, запас лесного фонда в объеме 760,3 млн м³, установленный объем ежегодной заготовки древесины 9156 тыс. м³ [8] определяют высокую значимость лесного сектора в экономике региона, его инвестиционную привлекательность. В настоящее время в лесном секторе Республики работают 32 государственные автономные организации лесного хозяйства.

Результаты исследования и их обсуждение

В декабре 2017 г. были обследованы лесохозяйственные предприятия Республики Башкортостан в целях анализа и оценки фактического состояния лесозаготовительной техники для возможности выполнения лесозаготовительных работ.

По результатам проведенной инвентаризации лесозаготовительной техники лесхозов Республики установлено, что общее количество техники составляет 184 ед., из которого 57 % относится к колесным тракторам, в основном марки МТЗ (рис. 1). Специализированная трелевочная техника практически отсутствует.

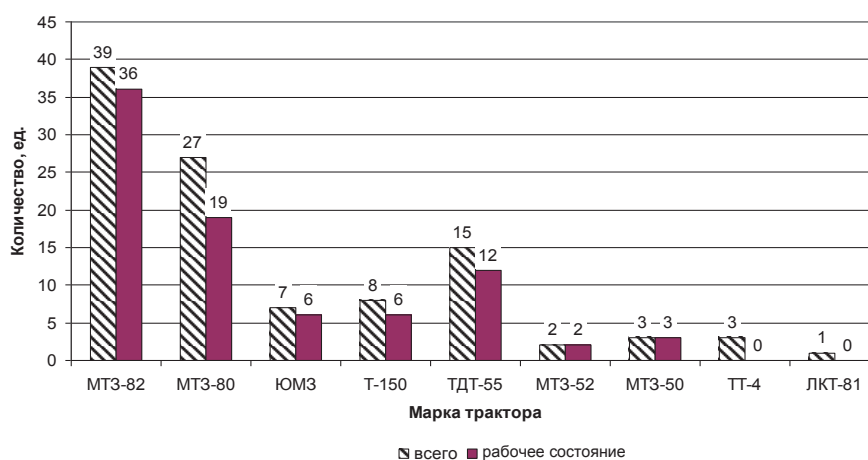


Рис. 1. Распределение тракторов по маркам

Fig. 1. Distribution of tractors by brands

Для вывозки древесины используется 78 автолесовозов, из них в рабочем состоянии находится 64 %. Широко применяется техника марок УРАЛ и КАМАЗ (рис. 2), 28 % автолесовозов используют гидроманипуляторы для погрузки бревен (рис. 3).

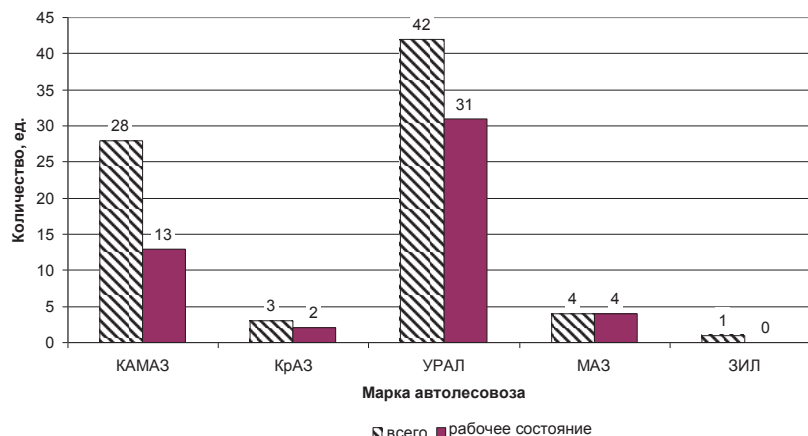


Рис. 2. Распределение автолесовозов по маркам

Fig. 2. Distribution of logging trucks by brands



Рис. 3. Распределение автолесовозов по наличию дополнительного оборудования (гидроманипулятора)

Fig. 3. Distribution of logging trucks by the presence of optional equipment (hydromanipulator)

Обеспеченность лесхозов лесозаготовительной техникой не равномерная, максимальное количество достигает 22 ед., в ряде лесхозов техника вообще отсутствует (рис. 4).

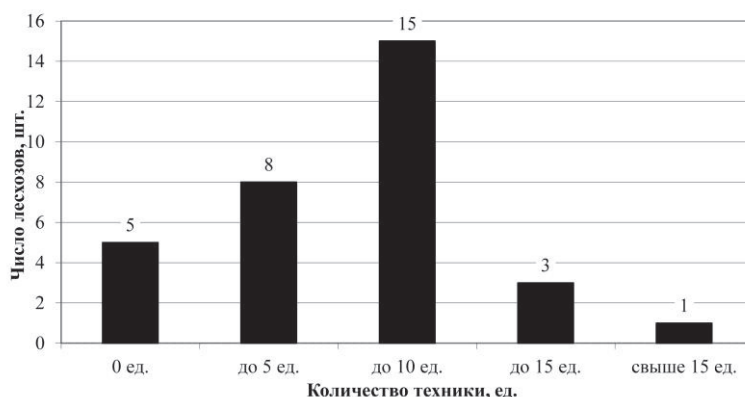


Рис. 4. Обеспеченность лесхозов лесозаготовительной техникой

Fig. 4. Maintenance of forestries with forestry equipment

Важной методической составляющей проведенных исследований явилась оценка уровня износа используемой техники. В данной работе для оценки износа использовались методология и методика, соответствующие стандартам оценочной деятельности. В Федеральном стандарте «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки» [14] отмечается, что если в рамках проведения оценки с использованием затратного подхода «...объекту оценки свойственно уменьшение стоимости в связи с физическим состоянием, функциональным или экономическим устареванием, необходимо учитывать износ и все виды устаревания».

В Международных стандартах оценки [16] упоминается, что накопленное устаревание активов может включать: физический износ (physical deterior-

ration); функциональное устаревание (functional obsolescence); экономическое (внешнее) устаревание (economic or external obsolescence).

В качестве критериев оценки накопленного износа лесозаготовительной техники выступает утрата машинами и оборудованием их потребительской стоимости в связи с износом [4, 5, 13]. Практически рассматриваются два оценочных показателя: изменение ресурса машины; изменение издержек производства, связанных с реализацией единицы ресурса в течение срока службы.

Следует отметить, что износ машины происходит непрерывно в течение всего периода ее существования, а затраты труда и средств, связанные с возобновлением нарушенных регулировок или износившихся деталей, происходят периодически. Несовпадение по времени процесса изнашивания и затрат, связанных с восстановлением машины, закрывает характер проявления износа и в связи с этим затрудняет его определение.

В рамках исследования применялся метод экономической оценки износа, предложенный Р.М. Петуховым [10], с использованием следующей формулы:

$$И = \frac{C_d \frac{t}{T} + C_p \frac{t_p}{T_p}}{C_d + C_p} 100 \%,$$

где И – износ, %; C_d – первоначальная стоимость (стоимость воспроизводства) машины, р.; t – фактический срок службы машины на момент определения его износа, лет; T – полный амортизационный срок службы, лет; C_p – стоимость ремонта машины, р.; t_p – фактический срок службы машины после очередного ремонта, лет; T_p – межремонтный срок службы машины, лет.

Выявлено, что средний износ всей лесозаготовительной техники составляет 87 %, при этом 27 % техники находится в неработоспособном состоянии и требует списания и утилизации (рис. 5).

Рис. 5. Состояние лесозаготовительной техники

Fig. 5. The state of forestry equipment



Результаты оценки износа лесозаготовительной техники по лесхозам Республики Башкортостан приведены в таблице.

Лесхоз	Количество техники, ед.	Износ техники, %
Абзелиловский	5	83
Авзянский	6	93
Альшеевский	1	90
Архангельский	4	62
Аскинский	8	95
Баймакский	5	92

Окончание таблицы

Лесхоз	Количество техники, ед.	Износ техники, %
Белебеевский	8	86
Белокатайский	7	94
Бирский	4	90
Бураевский лес	9	92
Бурзянский	7	93
Гафурийский	5	89
Дуванский	9	93
Зианчуринский	2	98
Зилаирский	13	75
Иглинский	4	86
Илишеевский	4	40
Инзерский	5	90
Калтасинский лес	8	91
Кананикольский	3	37
Караидельский	5	87
Макаровский	11	77
Нуримановский	9	87
Салаватский	5	94
Стерлитамакский	23	93
Тирлянский	1	88
Янаульский	13	94

Выводы

1. Установлено, что имеющаяся лесозаготовительная техника лесохозяйственных предприятий Республики Башкортостан не может эффективно применяться для выполнения требуемых объемов лесозаготовок по следующим причинам: лесхозы не обеспечены лесозаготовительной техникой для освоения плановых объемов лесозаготовок; износ более 80 % имеющейся лесозаготовительной техники составляет более 90 %, поэтому ее использование экономически нецелесообразно; лесхозы имеют слабую ремонтную базу и недостаточное количество квалифицированных кадров.

2. Главными факторами, сдерживающими развитие лесозаготовительного производства лесного хозяйства Республики Башкортостан, являются низкая инвестиционная активность лесозаготовителей; слабый уровень развития лесной инфраструктуры; высокий функциональный и физический износ машин, оборудования и транспортных средств; имеющаяся лесозаготовительная техника требует капитального ремонта, глубокой модернизации или должна быть утилизирована, кроме того ее недостаточно для осуществления экстенсивного лесопользования.

3. Основные предложения по повышению эффективности лесного хозяйства для развития лесхозов Республики Башкортостан:

разработать программу развития лесного хозяйства региона с подпрограммой технического оснащения лесхозов для эффективного выполнения возложенных на них основных функций;

предложить механизм государственно-частного партнерства для системного развития и обеспечения эффективного взаимодействия лесозаготовителей и лесопереработчиков на основе баланса интересов всех участников инвестиционного процесса (как вариант – создание леспромхозов или лесозаготовительных участков лесопереработчиков на арендуемых лесных площадях);

проанализировать возможности внедрения позитивного опыта других субъектов Российской Федерации (например, республики Татарстан) по государственной поддержке развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дац Ф.А. Совершенствование технической эксплуатации зарубежных лесозаготовительных машин (на примере Вологодской области): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУЛ, 2011. 19 с. [Dats F.A. *Improvement of Technical Operation of Foreign Logging Machines (Case Study of Vologda Region)*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, MGUL Publ., 2011. 19 p.].
2. Заикин А.Н., Изюмова Е.Г. Теоретические основы технологии лесозаготовительных производств: учеб. пособие для специалистов, бакалавров и магистров вузов, обучающихся по направлению 250400 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств». Брянск: БГИТА, 2010. 156 с. [Zaikin A.N., Izyumova E.G. *Theoretical Background of the Logging Operations Technology*. Bryansk, BGITA Publ., 2010. 156 p.].
3. Заикин А.Н., Рыжикова Е.Г., Теремкова И.И. Метод оперативного планирования и управления лесосечными работами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2(356). С. 107–118. [Zaikin A.N., Ryzhikova E.G., Teremkova I.I. Method of Operational Planning and Control of Logging Operations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 107–118]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.2.107](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.107), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d1f/1_zaikin.pdf
4. Игонин В.В. Развитие методов финансово-стоимостной экспертизы износа при оценке машин и оборудования: автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2012. 26 с. [Igonin V.V. *Development of Methods of Financial and Cost Inspection of Wear and Tear in the Assessment of Machinery and Equipment*: Cand. Econ. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2012. 26 p.].
5. Козлов В.В. Влияние функционального устаревания на ценообразование машин и оборудования // Вопросы оценки. 2016. № 2(84). С. 30–41. [Kozlov V.V. Impact of Functional Obsolescence on Machinery and Equipment Pricing. *Voprosi ocenki* [The Appraisal Issues], 2016, no. 2(84), pp. 30–41].
6. Ле Ан Туан, Смирнова А.И. Экономические подходы к обоснованию технологии лесозаготовок в лесопромышленном холдинге // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 5-6. С. 170–173. [Le An Tuan, Smirnova A.I. Economic Approaches to Harvesting Technologies Substantiation in Forest Industrial Holding Company. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2001, no. 5-6, pp. 170–173]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e24/e24ee1b43b9cd52e8c6d87c1e855e3f0.pdf>
7. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 18.12.2018 г.). (Дата обращения: 05.06.2019). [*The Forest Code of the Russian Federation of December 4, 2006 No. 200-FZ* (As Amended on 18.12.18)].
8. Лесной план республики Башкортостан. Кн. 1. «Пояснительная записка»: утв. указом Главы республики Башкортостан 27.12.2018 г., № УГ-76С. Уфа, 2018. 337 с.

[*The Forest Plan of the Republic of Bashkortostan*. Book 1. Explanatory Note: Approved by the Decree of the Head of the Republic of Bashkortostan of December 27, 2018 No. UG-76C. Ufa, 2018. 337 p.].

9. Мохирев А.П., Горяева Е.В., Медведев С.О. Оценка технологических процессов лесозаготовительных предприятий // Лесотехн. журн. 2016. Т. 6, № 4(24). С. 139–147. [Mokhirev A.P., Goryaeva E.V., Medvedev S.O. Estimation of Technological Processes of Logging Enterprises. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 139–147]. DOI: <https://doi.org/10.12737/23448>

10. Петухов Р.М. Методика экономической оценки износа и сроков службы машин. М.: Наука, 1965. 167 с. [Petukhov R.M. *Methodology for Economic Assessment of Machinery Wear and Service Life*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 167 p.].

11. Пошарников Ф.В., Юдина Н.Ю., Буланов А.С., Леденцов П.С. Анализ состояния технического оснащения лесозаготовительной промышленности // Лесотехн. журн. 2012. № 2(6). С. 100–105. [Posharnikov F.V., Yudina N.Yu., Bulanov A.S., Ledentsov P.G. State Analysis of Technological Infrastructure of Logging Industry. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2012, no. 2(6), pp. 100–105].

12. Прешкин Г.А. Модель рационального использования лесосырьевых ресурсов // Изв. вузов. Лесн. журн. 1988. № 6. С. 93–96. [Preshkin G.A. Model of Sustainable Use of Forest Resources. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1988, no. 6, pp. 93–96]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1988/%E2%84%966-1988.pdf>

13. Серёда Н.А. Оценка износа и восстановительной стоимости техники в современных экономических условиях // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. 2013. № 3. С. 100–104. [Sereda N.A. Assessment of Wear and Replacement Value of Technique in Today's Economy. *Vestnik FGOU VPO «MGAU imeni V.P. Goryachkina»* [Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University], 2013, no. 3, pp. 100–104].

14. Федеральный стандарт оценки «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки (ФСО № 1): утв. приказом Минэкономразвития России от 20.05.2015 г. № 297. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/91703/> [Federal Standard of Assessment “General Concepts of Assessment, Approaches and Requirements for the Assessment” (FSA No.1): Approved by the Order of the Ministry of Economic Development of Russia of May 20, 2015 No. 297].

15. Hejiazian M., Lotfalian M., Mohammadi Limaei S. Estimating the Economic Life of Forest Machinery Using the Cumulative Cost Model and Cost Minimization Model in Iranian Caspian Forests. *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64(5), pp. 216–223. DOI: [10.17221/133/2017-JFS](https://doi.org/10.17221/133/2017-JFS)

16. *International Valuation Standards 2017*. London, International Valuation Standards Council, 2016. 125 p. Available at: <https://www.ivsc.org/files/file/view/id/812> (accessed 05.06.19).

17. Kim S., Nussbaum M.A., Schoenfisch A.L., Barrett S.M., Chad Bolding M., Dickerson D.E. Occupational Safety and Health Concerns in Logging: A Cross-Sectional Assessment in Virginia. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 11, art. 440. DOI: [10.3390/f8110440](https://doi.org/10.3390/f8110440)

18. Leverkus A.B., Rey Benayas J.M., Castro J., Boucher D., Brewer S., Collins B.M. et al. Salvage Logging Effects on Regulating and Supporting Ecosystem Services – A Systematic Map. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 983–1000. DOI: [10.1139/cjfr-2018-0114](https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0114)

19. Violato Espada A.L., Vasconcellos Sobrinho M. Logging Community-Based Forests in the Amazon: An Analysis of External Influences, Multi-Partner Governance, and Resilience. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 6, art. 461. DOI: [10.3390/f10060461](https://doi.org/10.3390/f10060461)

TECHNOLOGICAL RESOURCES OF HARVESTING AND LOGGING MACHINERY OF BASHKORTOSTAN FORESTRIES

A.N. Zaikin, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

S.A. Konshakova, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-1488>

V.V. Sivakov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

S.G. Kuznetsov, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-2732>

N.A. Bulkhov, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0373-374X>

Bryansk State Engineering Technological University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru, glor@bk.ru, sv@bgtu.ru, pro_econom@bgtu.ru, pismaanick@mail.ru

The forest sector of the Russian economy is a complex system of industries and activities, which include logging, woodworking, furniture and pulp and paper productions. The logging organization, which forms to a great extent the operation effectiveness of any enterprise in the forest sector, is the base point for the development of any of the indicated activities. Assessment of the factors determining the efficiency of logging activities is an urgent issue of both theoretical and experimental studies, which allow identifying and specifying problems that reduce the effectiveness of logging and processing production, taking into account regional specificity. The development of competitive relations in forestry provides an opportunity to consider the essential role of forestries in the forest sector of the regions and to form the institutional framework of relations between the forest management participants relevant to the regional policy. There are two variants for the development of forestry: supporting small businesses, which operates in the forest complex, and recruitment of large investors for the forest resources development. The implementation of the national priority projects in the field of forest development is the most attractive procedure for large multi-profile wood processing enterprises with significant financial capacity and ready to develop the forest resources of the region over the long run. Modern forestries, which fulfill a function of the state institutional participant in the forest relations, carry out logging activities in the least attractive forest areas (from a competitive point of view) contributing to the well-timed and high-quality performance of the forest development plan and income to local budgets. If the state autonomous forestry organizations function in the region, then regional policy for the forest complex development should take into account the problem solving of the development of forestries through systemic modernization of their technical basis, which will allow the latter to become full members of the forest relations ensuring the effective development of the logging sector. However, a serious modernization of forestries is impossible without determining the real state of their forestry equipment. The research object is the forest sector of the Republic of Bashkortostan with the forest fund volume of 760.3 mln m³ and the established volume of annual wood harvesting of 9,156 ths m³, where 32 state autonomous forestry organizations work. In December 2017, we assessed the technical condition of the harvesting and logging equipment of the forestry institutions of the Republic of Bashkortostan in order to determine its state and opportunities for efficient use, and give the recommendations on the logging quality improvement. According to the results of the inventory of this equipment, its total number (184 units) was found, 57 % of which relate to wheeled tractors. Specialized skidding equipment is practically absent. The assessment of the wear level of the existing machinery was the important methodological component of the research. The methodology corresponding to the Federal Standard of Assessment “General Concepts of Assessment, Approaches and Requirements for the Assessment” was used for the wear assessment. The loss of the consumer value of the machines due to their wear

was used as the criteria for assessing the accumulated wear of logging machinery, herewith the following estimated indicators were considered: change in the machine resource; change in production costs associated with the implementation of the resource unit during the life cycle. In the course of the research it has been found that: more than half of the Bashkortostan forestries are not provided with harvesting and logging machinery for the development of planned volumes of logging; more than 80 % of the available forestry machinery has wear of more than 90 % and its use is not economically feasible; forestries of the Republic of Bashkortostan have a weak repair facility and insufficient number of qualified personnel.

For citation: Zaikin A.N., Konshakova S.A., Sivakov V.V., Kuznetsov S.G., Bulkhov N.A. Technological Resources of Harvesting and Logging Machinery of Bashkortostan Forestries. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 123–133. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-123-133

Keywords: forestries, harvesting and logging machinery, technological resources, wear, machinery condition assessment, Republic of Bashkortostan.

Поступила 18.07.19 / Received on July 18, 2019



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-134-146

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ЛИСТВЕННИЧНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

Ш.Г. Зарипов¹, д-р техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-2453>

В.А. Корниенко², канд. техн. наук, доц.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1709-9153>

¹Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, просп. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, стр. 5, Красноярск, Россия, 660012; e-mail: kornvlad@mail.ru

Конвективную сушку пиломатериалов следует рассматривать как относительно простой способ удаления влаги из древесины. Такие технологии широко используются при доведении влажности в пиломатериалах до определенного уровня. В то же время для указанного способа сушки характерна повышенная продолжительность процесса, что автоматически увеличивает расходы на тепловую и электрическую энергию. Продолжительность сушки пиломатериалов из древесины лиственницы в среднем в 1,5...2,5 раза выше по сравнению с другими породами, что дополнительно повышает себестоимость сушки. Поэтому есть необходимость поиска путей снижения продолжительности сушки лиственничных пиломатериалов в условиях конвективного теплообмена. Одним из путей решения указанной проблемы является разработка и применение таких режимов сушки, которые позволяли бы максимально ускорить процесс удаления влаги из древесины. Вариант совершенствования режимов предлагается финскими специалистами фирмы «Jartek Oy». Разработанная конструкция сушильной камеры позволяет реализовывать двухстадийную структуру режимов сушки: на первой стадии – с нарастающей температурой, на второй – с нисходящей. В данной работе приведены результаты анализа эксплуатации сушильных камер непрерывного действия с позонной циркуляцией для сушки пиломатериалов из древесины лиственницы. Анализ показал, что направление движения агента сушки по длине камеры при сушке лиственничных пиломатериалов имеет принципиальное значение. Такой вывод следует из того, что лиственница своеобразно реагирует на изменение температуры. В начальный период сушки на поверхности лиственничной доски формируется пленка из экстрактивных веществ, которая блокирует вывод водного раствора экстрактивных веществ из древесины. В этих условиях целесообразно формировать режимы, где температура агента сушки с каждым шагом штабеля пиломатериалов в сушильной камере повышается, что позволяет поддерживать некоторую интенсивность вывода из древесины водного раствора экстрактивных веществ. Указанное принципиальное условие при сушке лиственничных пиломатериалов соблюдается только в отсеке камеры, где осуществляется противоточная циркуляция. Второй отсек, где реализуется прямоточная циркуляция, практически работает вхолостую, так как температура агента сушки с каждым шагом сушильного штабеля пиломатериалов снижается. Из этого следует вывод о том, что подобные конструкции сушильных камер для сушки лиственничных пиломатериалов эксплуатировать нецелесообразно.

Для цитирования: Зарипов Ш.Г., Корниенко В.А. Влияние технологии сушки лиственничных пиломатериалов на длительность процесса обезвоживания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 134–146. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-134-146

Ключевые слова: технология сушки, лиственничные пиломатериалы, циркуляция, температура, сушильная камера, водный раствор экстрактивных веществ.

Введение

Актуальность проблемы, обозначенной в названии работы, не вызывает сомнений. Данное утверждение основывается на следующих положениях. Известно, что сушка пиломатериалов характеризуется длительностью процесса, которая исчисляется от нескольких десятков до сотен часов. Нетрудно убедиться в том, что продолжительность сушки оказывает прямое влияние на расходы тепловой энергии. Поэтому разработка мероприятий, направленных на сокращение длительности процесса при сохранении качества продукции, является актуальной.

Для сушки пиломатериалов из древесины лиственницы данная проблема имеет особое значение. Это связано с тем, что длительность сушки лиственничных пиломатериалов в сопоставимых условиях по сравнению с сосновыми выше в 1,5–2,5 раза.

Для решения указанной проблемы разработаны и в настоящее время применяются с определенной эффективностью различные технологические режимы конвективной сушки. Наиболее распространенной является многоступенчатая структура режимов сушки. При ее реализации температурно-влажностные условия в сушильной камере изменяются по нарастающей жесткости испарения [7, 11, 12, 16, 18, 19] – температура в сушильной камере возрастает, относительная влажность – снижается.

В последние годы получила развитие двухэтапная технология сушки, которая предложена финскими специалистами (фирма «Jartek Oy») [9]. Реализуется данная технология в сушильных камерах непрерывного действия с позонной циркуляцией. Особенностью этой технологии является то, что в сушильной камере проходного типа осуществляются две схемы циркуляции сушильного агента – противоточная (первый этап) и прямоточная (второй этап).

В каждой зоне сушильной камеры реализуется многоступенчатая технология. На первом этапе выполняется общепринятая технология сушки в сушильных камерах непрерывного действия, при которой происходит постепенный переход на более жесткие режимы сушки. При реализации второго этапа наблюдается ступенчатое смягчение режимов сушки за счет перехода на прямоточную схему циркуляции сушильного агента.

По мнению разработчиков данной технологии, благодаря разделению процесса сушки на два этапа значительно уменьшается время сушки, а значит, увеличивается производительность туннеля [9]. Причем данное утверждение в одинаковой степени справедливо для сушки пиломатериалов основных видов хвойных пород древесины, включая лиственничные.

В специальной литературе практически нет данных по анализу эффективности предлагаемой двухэтапной технологии сушки лиственничных пиломатериалов. Однако при разработке технологии сушки таких пиломатериалов необходимо учитывать экстракцию водорастворимых веществ, которая имеет место при повышении температуры [3].

Процесс экстракции в древесине при сушке отмечается рядом российских ученых [5, 6]. В ходе изучения экологических проблем деревопереработки зарубежными специалистами указывалось на то, что при сушке древесины выделяется значительное количество веществ, которые загрязняют окружающую среду [13–15, 17, 20–22]. Однако сведений о влиянии экстракции веществ на процесс удаления влаги из древесины при сушке нет. В то же время влияние на процесс сушки экстрактивных веществ, которые скапливаются на поверхности листовенных пиломатериалов в результате экстракции, значительно.

Поэтому есть необходимость проведения комплексного анализа влияния структуры режима сушки, которая реализуется в двухзонной сушильной камере финской фирмы «Jartek Oy». Цель данной работы – провести анализ технологической целесообразности применения двухэтапной технологии для сушки пиломатериалов из древесины лиственницы.

Объекты и методы исследования

Для изучения особенностей кинетики сушки пиломатериалов из древесины лиственницы в двухзонной сушильной камере авторы данной статьи провели специальные экспериментальные исследования, которые позволили получить ряд важных, на наш взгляд, закономерностей.

На рис. 1 приведены значения удельной скорости сушки древесины лиственницы (G_w) при осциллирующих температурных режимах сушки [3].

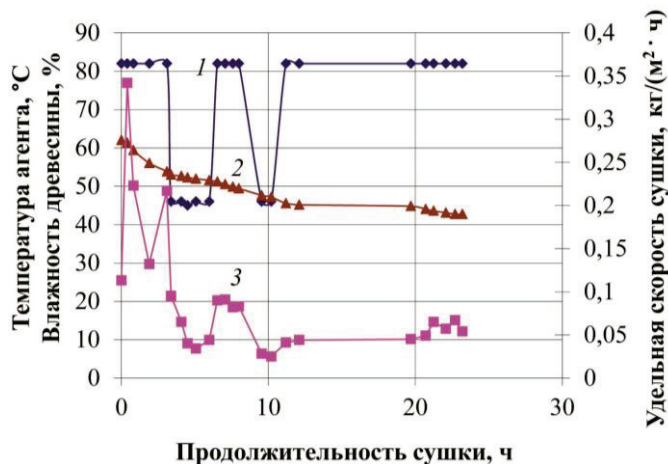


Рис. 1. Кинетика сушки древесины лиственницы сибирской: 1 – температура сушильного агента; 2 – влажность древесины; 3 – удельная скорость сушки

Fig. 1. Kinetics of drying Siberian larch wood: 1 – drying agent temperature; 2 – wood moisture content; 3 – specific drying rate

Сушка начинается с подъема температуры в сушильной установке до $t_c = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет довести удельную скорость сушки до $G_w = 0,22 \dots 0,35\text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Снижение температуры агента сушки до $t_c = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$, как ожидалось, уменьшило удельную скорость сушки до $G_w = 0,04\text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что в 5,5...8,8 раза ниже по сравнению с интенсивностью удаления воды в начале процесса при $t_c = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Во втором цикле температура агента сушки, как и в первом, была доведена до $t_c = 84$ °С. Значение удельной скорости сушки не превысило $G_W = 0,094$ кг/(м²·ч), что в 2,3...3,7 раза ниже, чем в первом цикле. Уменьшение температуры до $t_c = 43$ °С понизило удельную скорость сушки до $G_W = 0,03$ кг/(м²·ч), что в 3,1 раза ниже по сравнению с первым периодом второго цикла.

В третьем цикле температура агента сушки была повышена также, как и в предыдущих двух циклах, до $t_c = 84$ °С. Значение удельной скорости сушки было зафиксировано на уровне $G_W = 0,045$ кг/(м²·ч), что в 4,9...7,8 раза ниже по сравнению с первым циклом и в 2,01 раза – со вторым. Дублирующие опытные сушки подтвердили описанную выше закономерность изменения удельной скорости сушки лиственничных пиломатериалов от температурного режима.

Следует обратить внимание на то, что все указанные изменения удельной скорости сушки происходят в течение 10 ч. За данный промежуток времени глубина просыхания заготовки не превышает 2...3 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ представленных на рис. 1 данных показал, что удельная скорость сушки древесины лиственницы G_W зависит от:

- температуры агента сушки;
- очередности изменения температуры.

Влияние температуры агента сушки на удельную скорость сушки древесины лиственницы. Результаты проведенного эксперимента (рис. 1) указывают на то, что влияние температуры на процесс вывода влаги из древесины лиственницы носит сложный и неоднозначный характер. Поэтому для более интенсивного удаления влаги из древесины при конвективной сушке недостаточно просто увеличить уровень температуры, важно учитывать реакцию древесины на ее изменение.

Анализ особенностей удаления влаги из древесины лиственницы низкотемпературными режимами позволил выдвинуть гипотезу о том, что влагоперенос целесообразно рассматривать как составную часть процесса массопереноса. Это значит, что влага из древесины лиственницы выводится в составе водного раствора экстрактивных веществ. Поэтому температуру агента сушки следует изучать как основной фактор, оказывающий влияние на массоперенос при сушке лиственничных пиломатериалов [3].

При этом древесина лиственницы представляется в виде системы микрополостей клеток. Значительная часть водорастворимых экстрактивных веществ зафиксирована в ранней древесине (рис. 2).

Полости клеток между собой сообщаются системой окаймленных пор. Встречаемость этих пор на единицу площади, как в радиальном, так и тангенциальном направлении практически равная (рис. 3). Наличие в окаймленных порах мембран (поз. 1) создает условия формирования избыточного давления в полости клетки. Источником избыточного давления является наличие парогазовой смеси, которая образуется в результате реакций гидролиза [4].

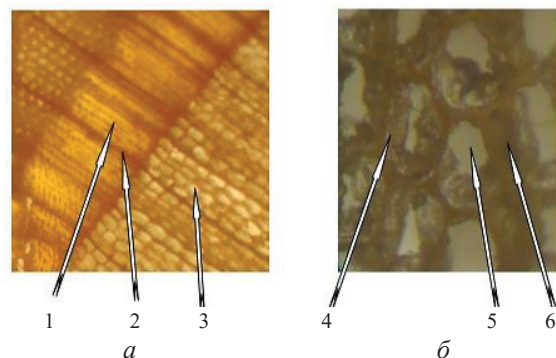


Рис. 2. Поперечный разрез древесины лиственницы сибирской под микроскопом: *а* – фрагмент годичного слоя; *б* – фрагмент ранней древесины годичного слоя; 1 – поздняя древесина; 2 – сердцевинный луч; 3 – ранняя древесина; 4 – наполнение полости клетки ранней древесины экстрактивными веществами; 5 – полость клетки ранней древесины; 6 – клеточная стенка

Fig. 2. Cross section of Siberian larch wood under a microscope: *a* – annual layer fragment; *б* – spring wood fragment; 1 – late wood; 2 – wood ray; 3 – early wood; 4 – filling the early wood cell cavity with extractive substances; 5 – early wood cell cavity; 6 – cell wall

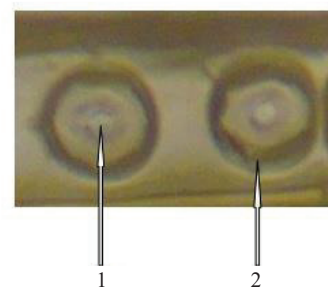


Рис. 3. Расположение межклеточных окаймленных пор древесины лиственницы сибирской: 1 – мембрана; 2 – окаймление

Fig. 3. Location of intercellular bordered pores of Siberian larch wood: 1 – membrane; 2 – bordering

Интенсивность протекания реакций гидролиза во многом зависит от температурного уровня, что предопределяет скорость вытеснения раствора из древесины через мембранную систему. Следовательно, массоперенос в древесине лиственницы следует рассматривать как один из видов баромембранного процесса (рис. 4) [10].

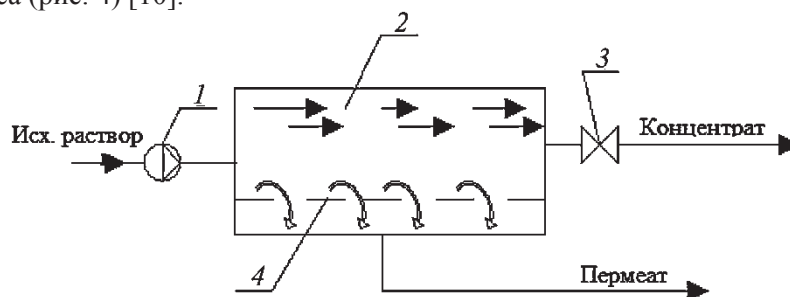


Рис. 4. Структурная схема массопереноса в древесине лиственницы сибирской при конвективной сушке пиломатериалов: 1 – нагнетательный насос (создает избыточное давление); 2 – мембранный аппарат (система межклеточных мембран древесины лиственницы); 3 – дроссель (контроль температуры древесины); 4 – система полупроницаемых (межклеточных) мембран

Fig. 4. Structural diagram of mass transfer in Siberian larch wood during convective drying of lumber: 1 – pressure pump (creates overpressure); 2 – membrane apparatus (system of intercellular membranes of larch wood); 3 – throttle (wood temperature control); 4 – a system of semipermeable (intercellular) membranes

Как показали результаты экспериментов, мембранная система древесины лиственницы не является тем фактором, по которому древесину лиственницы принято относить к категории трудносохнущих. Фактор, определяющий интенсивность удаления влаги из ее древесины, формируется в процессе сушки (см. рис. 1).

На начальном этапе сушки из древесины лиственницы вытесняется водный раствор экстрактивных веществ. Следующий этап удаления содержимого из высушиваемых пиломатериалов – массообменные процессы. С поверхности доски удаляются парогазовая смесь, а также жидкая фаза путем элементарного слива или испарения [2]. Кроме того, на поверхности доски скапливаются экстрактивные вещества в виде пермеата [3].

Следовательно, интенсивность вывода раствора экстрактивных веществ во многом устанавливается температурой древесины. С повышением температуры растет проницаемость мембраны, что приводит к увеличению интенсивности вывода водного раствора экстрактивных веществ из древесины. В результате на поверхности доски за сравнительно короткий промежуток времени (5...60 ч) образуется слой пермеата [3]. В течение 5 ч слой пермеата формируется, если в начальный период температура древесины достигает 80 °С и выше (см. рис. 1). Если в начальный период сушки температурный уровень древесины составляет 44...46 °С, то время формирования слоя пермеата увеличится до 60 ч (рис. 5, график 3).

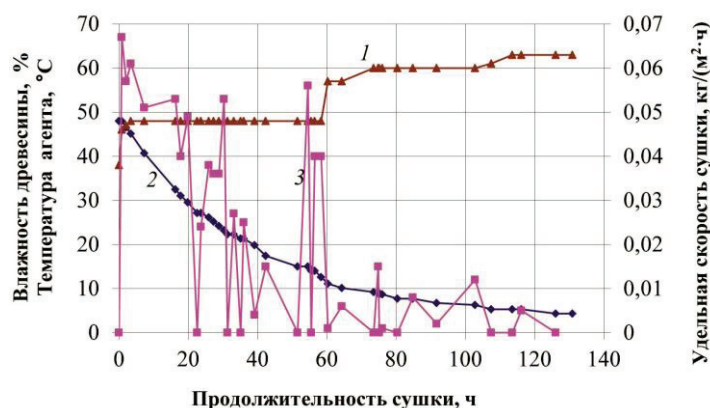


Рис. 5. Кинетика процесса сушки лиственничных пиломатериалов сечением 25×100 мм: 1 – температура сушильного агента; 2 – влажность древесины; 3 – удельная скорость сушки

Fig. 5. Drying kinetics of larch lumber with a cross section of 25×100 mm: 1 – drying agent temperature; 2 – wood moisture content; 3 – specific drying rate

Ввиду того, что полученный слой пермеата обладает полиэлектролитными свойствами, наблюдается значительное его набухание [8] – на поверхности доски формируются полости, в которых скапливается вода. Важной особенностью полученного слоя является то, что он чувствителен к изменению внешних условий (температуры, давления) [8].

Изменение любого из указанных параметров приводит к скачкообразному уплотнению экстрактивных веществ, находящихся на поверхности

доски, – полости лопаются, вода из полостей выводится на поверхность слоя. В результате образующаяся полимерная пленка [8] перекрывает каналы вывода водного раствора экстрактивных веществ.

На графике 3 рис. 5 наблюдается скачкообразное снижение интенсивности удаления влаги из древесины – в 4–5 раз. Следовательно, образование полимерной пленки является основным фактором, посредством которого устанавливается проницаемость системы и, как следствие, скорость удаления водного раствора из древесины лиственницы.

На факт скачкообразного снижения проницаемости высушиваемой системы указывают результаты еще одного эксперимента, которые представлены на рис. 6 [3]. При измерении давления в центре лиственничной доски было установлено, что в самом начале процесса удаления влаги оно не превышало 10...20 кПа. Аналогичные данные были получены и при проведении опытных сушек досок из сосны. Такие данные указывают на то, что природная проницаемость древесины лиственницы срабатывает при избыточном давлении $p_{\text{изб}} = 10...20$ кПа.

Образование полимерной пленки на поверхности доски способствует увеличению избыточного давления в ее центре. Избыточное давление растет скачкообразно до определенного значения, которое соответствует некоторому температурному уровню. Повышение температуры нагрева древесины приводит к образованию новых порций парогазовой смеси [4], в результате чего избыточное давление возрастает.

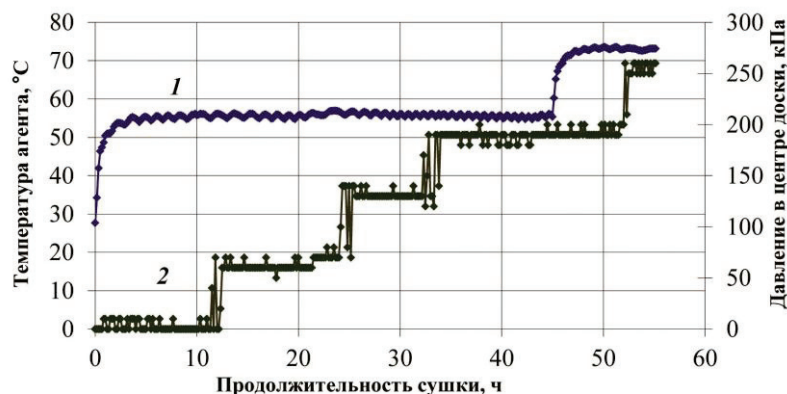


Рис. 6. Температура агента сушки t_c (1) и избыточное давление в центре доски $p_{\text{ц}}$ (2) в зависимости от продолжительности сушки (в начальный период сушки $t_c = 55$ °C)

Fig. 6. Drying agent temperature t_c (1) and overpressure in the center of the board $p_{\text{ц}}$ (2) depending on the drying time (in the initial drying period t_c is 55 °C)

Впервые сдерживающий эффект образовавшейся в процессе сушки полимерной пленки был описан в монографии [11, с. 90]: «...при средней скорости снижения влажности древесины 6,5 % в сутки в течение первых двух суток влажность снижалась до 20 %. Затем скорость сушки понижалась и при влажности древесины ниже 25 % составляла 2...3 % в сутки. За первые пять суток влажность пиломатериалов снизилась на 55 %, а за последние шесть суток – только на 16 %».

Как показали результаты специальных исследований, в процессе дальнейшей сушки блокирование вывода влаги из древесины лиственницы только возрастает (рис. 6). Поэтому для частичного восполнения понижения проницаемости системы требуется постоянное повышение температуры агента сушки.

Из вышеказанного следует основополагающий вывод о том, что технология сушки лиственничных пиломатериалов должна предусматривать ступенчатое повышение температурного режима, начиная от $t_c \cong 42...44$ °C [3]. Такие режимы позволяют поддерживать в полостях клеток избыточное давление, что способствует проведению эффективного вывода из древесины лиственницы экстрактивных веществ и влаги.

Анализ времени сушки пиломатериалов из древесины лиственницы в сушильных камерах непрерывного действия с позонной циркуляцией. Сушильные штабеля, последовательно проходя по сушильной камере непрерывного действия (рис. 7), подвергаются различным температурно-влажностным воздействиям. Для анализа изменения температурно-влажностных условий воспользуемся уравнением расчета теплосодержания в сушильной камере [1]:

$$I_{\text{вх}} \cong I_{\text{вых}} = i_{\text{сух}} + i_{\text{вл}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$ – теплосодержание соответственно на входе в штабель (штабеля) и на выходе из него (них); $i_{\text{сух}}$, $i_{\text{вл}}$ – соответственно сухая и влажная составляющие теплосодержания.

Такой подход основывается на следующих постулатах. При прохождении через штабеля теплосодержание агента сушки остается практически без изменения. В то же время наблюдается перераспределение тепловой энергии. Значительная часть тепловой энергии расходуется на испарение влаги с поверхности пиломатериалов. По мере увеличения времени контакта с влажной поверхностью происходит снижение температуры агента сушки [1]:

$$t_i = \frac{I_i - 2,49 d_i}{1,0 + 0,00193 d_i}, \quad (2)$$

где t_i – температура агента сушки в i -й точке сушильной камеры; I_i – теплосодержание в i -й точке сушильной камеры; d_i – текущее значение влагосодержания в i -й точке сушильной камеры.

Следовательно, температура в «сыром» конце сушильной камеры или отсека зависит как от температуры агента сушки на входе в штабель, так и от его насыщенности влагой. В свою очередь, процесс насыщения зависит от скорости циркуляции агента сушки по поверхности пиломатериалов и наличия влаги на поверхности. Изучение влияния скорости циркуляции агента сушки на процесс насыщения является предметом специального изучения.

В сушильной камере непрерывного действия с позонной циркуляцией выделяется две зоны [9]: первая – противоточная, вторая – прямоточная (рис. 7).

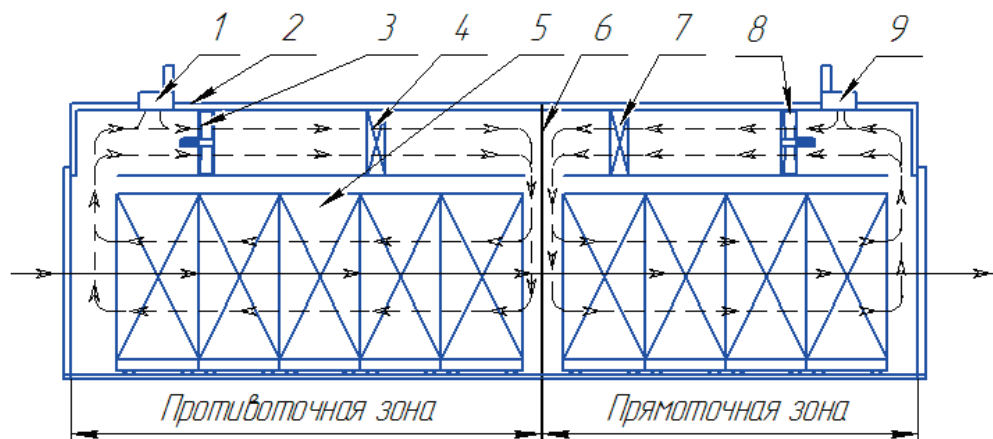


Рис. 7. Принципиальная схема функционирования двухстадийной сушильной камеры проходного типа: 1, 9 – рекуператор; 2 – сушильная камера; 3, 8 – вентиляционный узел; 4, 7 – калорифер; 5 – штабель пиломатериалов; 6 – внутрикамерные ворота

Fig. 7. Layout diagram of the operation of a two-stage throughfeed drying kiln: 1, 9 – recuperator; 2 – drying kiln; 3, 8 – ventilation unit; 4, 7 – calorifier; 5 – lumber pile; 6 – intra-kiln gates

В противоточном варианте сушильной камеры предусматривается движение агента сушки против перемещения сушильных штабелей по отсеку – от «сухого» конца к «сырому». Перед подачей в штабеля пиломатериалов паровоздушная смесь предварительно проходит двухэтапное осушение.

Первый этап осушения осуществляется перед вентиляционным узлом (рис. 7, поз. 3), где смешиваются два потока воздуха: один поток – увлажненный нагретый (после прохождения по сушильным штабелям), а второй поток – сухой с пониженной температурой (подача с «улицы»). Второй этап осушения реализуется непосредственно в калорифере (рис. 7, поз. 4), где повышается температура парогазовой смеси без влагообмена, что приводит к снижению ее относительной влажности.

Таким образом, подсушенный и с повышенной температурой агент сушки направляется в штабеля пиломатериалов (рис. 7, поз. 5). Данная циркуляция агента сушки позволяет выполнить одно из основных условий – сохранение целостности пиломатериалов, а также эффективное удаление влаги.

Схематично изменение влажности в лиственничных пиломатериалах и температуры агента сушки по длине каждой стадии показано на рис. 8. Изменение влажности и температуры в первой зоне сушильной камеры следует рассматривать в виде двух периодов. Деление на периоды связано с образованием на поверхности пиломатериалов полимерной пленки. Образование полимерной пленки приводит к резкому уменьшению интенсивности вывода влаги из древесины (точка перегиба 1 на рис. 8), что автоматически приводит к снижению влагосодержания.

Из уравнения (2) следует, что снижение влагосодержания приводит к повышению температуры агента сушки (точка перегиба 2 на рис. 8).

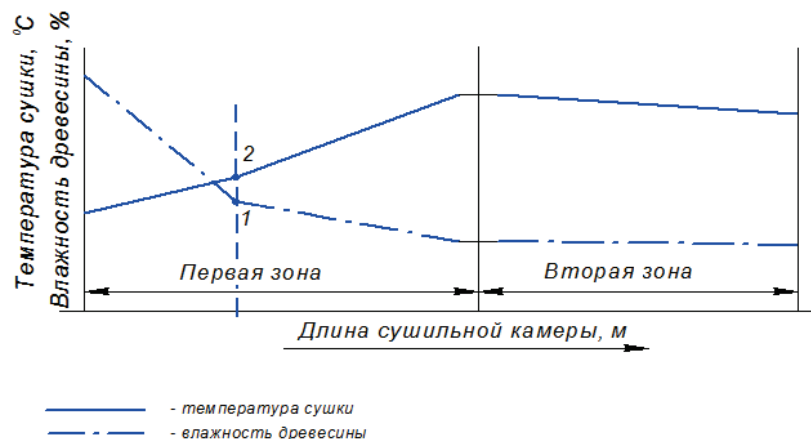


Рис. 8. Изменение основных параметров процесса сушки по длине сушильной камеры: температуры агента сушки и средней влажности пиломатериалов

Fig. 8. Change in the main parameters of drying along the length of the drying kiln: drying agent temperature and average lumber humidity

Во второй зоне сушильной камеры процесс удаления воды из пиломатериалов производится на фоне наличия на поверхности доски полимерной пленки. При этом реализуется прямоточная схема циркуляции агента сушки (см. рис. 7).

Прохождение агента сушки по штабелям выстроено таким образом, что температура на входе в указанную зону имеет максимальное значение. Перед подачей в сушильное пространство агент сушки, как и при реализации первого этапа, подвергается двухстадийному осушению – при смешивании с сухим, но охлажденным воздухом, а также при продвижении через калориферный узел (см. рис. 7, поз. 7) за счет увеличения теплосодержания без влагообмена. По мере прохождения по штабелям температура агента сушки снижается.

Уменьшение температуры древесины приводит к приостановке образования в древесине парогазовой смеси, что автоматически влечет понижение удельной скорости сушки (см. рис. 1). Следовательно, эффективность сушки лиственных пиломатериалов во второй зоне камеры близка к нулевому значению.

Таким образом, при наличии на поверхности доски блокирующей вывод раствора полимерной пленки целесообразно не уменьшать температуру, а увеличивать, что и осуществляется в традиционных конструкциях противоточных сушильных камер непрерывного действия. Поэтому ожидать от двухзонной конструкции сушильной камеры более высокой производительности по сравнению с традиционной не следует.

Выводы

1. Предлагаемая финскими учеными конструкция сушильной камеры непрерывного действия с позонной циркуляцией, где в одной зоне осуществляется противоточная циркуляция, а в другой – прямоточная, малоэффективна для сушки пиломатериалов из древесины лиственницы.

2. Низкая эффективность сушильных камер с позонной циркуляцией для сушки лиственных пиломатериалов объясняется тем, что при эксплуатации сушильного оборудования не учитываются особенности протекания процессов в таких пиломатериалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акишенков С.И., Корнеев В.И. Проектирование лесосушильных камер и цехов. 3-е изд., перераб и доп. СПб.: ЛТА, 1992. 87 с. [Akishenkov S.I., Korneev V.I. *Designing Wood Drying Kilns and Workshops*. Saint Petersburg, LTA Publ., 1992. 87 p.].
2. Голицын В.П., Голицына Н.В. Сравнительная оценка энергозатрат на сушку пиломатериала в сушильном оборудовании различного типа и способа сушки // Лесн. эксперт. 2004. № 16. С. 18–25. [Golitsyn V.P., Golitsyna N.V. Comparative Assessment of Energy Consumption for Drying Lumber in the Equipment of Various Types and Methods of Drying. *Lesnoy ekspert*, 2004, no. 16, pp. 18–25].
3. Зарипов Ш.Г. Совершенствование технологии сушки лиственных пиломатериалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. 243 с. [Zaripov Sh.G. *Improving the Technology of Larch Lumber Drying*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2016. 243 p.].
4. Зарипов Ш.Г., Корниенко В.А. Гидролиз при конвективной сушке лиственных пиломатериалов низкотемпературными режимами // Хвойные бореальной зоны. 2018. № 6. С. 542–547. [Zaripov Sh.G., Korniyenko V.A. Hydrolysis of Larch Lumber under Low-Temperature Modes during Convective Drying. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2018, no. 6, pp. 542–547].
5. Михайлова Ю.С. Оценка содержания фурфурола в отработанном агенте сушки после предварительной термохимической обработки древесины бука и дуба // Лесотехн. журн. 2011. № 3. С. 24–27. [Mikhaylova Yu.S. Estimation of Furfural Content in Spent Drying Agent after Preliminary Thermochemical Processing of Beech and Oak Wood. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2011, no. 3, pp. 24–27].
6. Михайлова Ю.С., Платонов А.Д. Исследование воздействия фурфурола и формальдегида на окружающую среду при сушке древесины бука и дуба // Науч. журн. КубГАУ. 2011. № 70(06). С. 306–317. [Mikhaylova Yu.S., Platonov A.D. Investigation of Furfural and Formaldehyde Influence on Environment during Drying of Beech and Oak Wood. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2011, no. 70(06), pp. 306–317].
7. Руководящие материалы по технологии камерной сушки древесины / под ред. Е.С. Богданова. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 152 с. [Guiding Materials on the Technology of Wood Kiln Drying. Ed. by E.S. Bogdanov. Arkhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1985. 152 p.].
8. Филиппова О.Е. «Умные» полимерные гидрогели // Природа. 2005. № 8. С. 11–17. [Filippova O.E. “Smart” Polymeric Hydrogels. *Priroda*, 2005, no. 8, pp. 11–17].
9. Финская компания Tekmawood. URL: <http://www.758.wood.ru/> [Finnish Company Tekmawood].
10. Хванг С.-Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения. М.: Химия, 1981. 464 с. [Hwang S.T., Kammermeyer K. *Membranes in Separations*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 464 p.].
11. Чудинов Б.С., Тюриков Ф.Т., Зубань П.Е. Древесина лиственницы и ее обработка. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 144 с. [Chudinov B.S., Tyurikov F.T., Zuban' P.E. *Larch Wood and Its Processing*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 144 p.].
12. *Air Drying of Lumber*. General Technical Report FPL–GTR–117. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 62 p. DOI: [10.2737/FPL-GTR-117](https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-117)

13. Beakler B.W., Blankenhorn P.R., Brown N.R., Scholl M.S., Stover L.R. Quantification of the VOCs Released during Kiln-Drying Red Oak and White Oak Lumber. *Forest Products Journal*, 2007, vol. 57, iss. 11, pp. 27–32.

14. Beakler B.W., Blankenhorn P.R., Stover L.R., Ray C.D. Total Organic Compounds Released during Dehumidification of Air-Dried Hardwood Lumber. *Forest Products Journal*, 2005, vol. 55, iss. 2, pp. 57–61.

15. Bergman R.D., Bowe S.A. The Environmental Impact of Manufacturing Softwood Lumber in Northeastern and North Central Parts United States. *Wood Fiber Science*, 2010, vol. 42, suppl. 1, pp. 67–78.

16. Bois P.J. The Four Stages of Drying Thick Oak. *Lumber Drying Sourcebook: 40 Years of Practical Experience*. Ed. by E.M. Wengert, R. Toennisson. Madison, WI, Forest Products Society, 1998. 371 p.

17. Dahlen J., Prewitt L., Shmulsky R., Jones D. Hazardous Air Pollutants and Volatile Organic Compounds Emitted during Kiln Drying of Southern Pine Lumber to Interior and Export Moisture Specifications. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, iss. 3, pp. 229–234. DOI: [10.13073/0015-7473-61.3.229](https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.3.229)

18. *Lumber Drying Sourcebook: 40 Years of Practical Experience*. Ed. by E.M. Wengert, R. Toennisson. Madison, WI, Forest Products Society, 1998. 371 p.

19. McMillen J.M. *Accelerated Kiln Drying of Presurface 1-Inch Northern Red Oak*. Research Paper FPL–RP–122. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1969. 31 p.

20. Milota M., Mosher P. Emissions of Hazardous Air Pollutants from Lumber Drying. *Forest Products Journal*, 2008, vol. 58, no. 7/8, pp. 50–55.

21. Thompson A., Ingram Jr. L.L. Variation of Terpenes in Sapwood and Heartwood of Loblolly Pine: Impact on VOC Emissions from Drying Lumber Samples. *Forest Products Journal*, 2006, vol. 56(9), pp. 80–83.

22. Wengert E.M. *Drying Oak Lumber*. Madison, WI, University of Wisconsin, Department of Forestry, 1990. 167 p.

THE INFLUENCE OF LARCH LUMBER DRYING TECHNOLOGY ON THE DURATION OF DEHYDRATION

Sh.G. Zaripov¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-2453>

V.A. Kornienko², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1709-9153>

¹Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Krai, 662543, Russian Federation; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeni gazety «Krasnoyarskiy rabochiy», 31, str. 5, Krasnoyarsk, 660012, Russian Federation; e-mail: kornvlad@mail.ru

Convective drying of lumber should be considered as a relatively simple method of elimination moisture from wood. Such technologies are widely used in bringing moisture content in lumber to a certain level. Meanwhile, this drying method is characterized by an increased duration of the process, which automatically increases the expenses for thermal and electrical energy. The drying time of larch lumber is on average higher by 1.5–2.5 times compared to other species, which further increases the cost of drying. Therefore, there is a necessity of finding ways to solve the problem of reducing the drying time of larch lumber in the conditions of convective heat exchange. One of the ways is to develop and apply such drying schedules, which would allow to accelerate the process of wood dehydration. The option of improvement the drying schedules is offered by the Finnish experts of Jartek Oy company.

The developed design of the drying kiln allows to implement a two-stage structure of drying schedules: at the first stage with increasing temperature, at the second with decreasing temperature. This paper presents the results of the analysis of the operation of continuous drying kilns with zonal circulation for larch lumber drying. The analysis showed that the direction of drying agent movement along the length of the kiln during larch lumber drying is critical. This conclusion follows from the fact that larch responses in a peculiar way to temperature variations. In the initial period of drying a film of extractives is formed on the surface of the larch board. This film blocks the output of an aqueous solution of extractives from wood. In these circumstances, it is advisable to form such schedules that the drying agent temperature with each step of a lumber pile in the drying kiln increases. The specified principle condition for drying larch lumber is observed only in the kiln section, where counter-flow circulation is carried out. The second section, where the direct-flow circulation is implemented, practically runs idle, since the drying agent temperature with each step of the drying pile of lumber decreases. It follows that such designs of kilns for larch lumber drying is impractical for operation.

For citation: Zaripov Sh.G., Kornienko V.A. The Influence of Larch Lumber Drying Technology on the Duration of Dehydration. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 134–146. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-134-146

Keywords: drying technology, larch lumber, circulation, temperature, drying kiln, aqueous solution of extractives.

Поступила 28.10.19 / Received on October 28, 2019

УДК 630*812

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-147-156

ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРНО-КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ, ЗАГОТАВЛИВАЕМЫХ В АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

А.А. Тамби¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: J-9614-2017,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

С.А. Угрюмов², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: F-6510-2016,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

А.Р. Бирман², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: X-3713-2019,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>

И.А. Черноградская¹, аспирант; ResearcherID: X-1987-2019,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-8990>

¹Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677007; e-mail: a_tambi@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: ugr-s@yandex.ru

Эффективность работы деревообрабатывающих предприятий во многом зависит от размерно-качественных характеристик сырья – круглых лесоматериалов. Цель исследования – оценка основных таксационных характеристик круглых лесоматериалов в экономически доступных лесных массивах Архангельской области. Измерения производились на линии сортировки бревен по диаметрам на складах лесоматериалов ряда крупных предприятий Архангельской области с использованием современного фотометрического сканера «Вектор 3D». Общее количество исследованных пиловочных бревен – 18 931 шт. Длина сортиментов – 6 м. Диапазон диаметров лесоматериалов – 10...42 см. В результате экспериментов установлены средний диаметр заготавливаемых сортиментов сосны и ели, параметры кривизны, сбega и содержание коры в зависимости от вершинного диаметра лесоматериалов. В регионе сохраняется тенденция постепенного снижения среднего диаметра круглых лесоматериалов, в рассматриваемый период 2014–2018 гг. он варьировал от 11 до 16 см. Одновременно с уменьшением среднего диаметра круглых лесоматериалов снижаются кривизна, сбег и содержание коры, что может косвенно говорить о том, что в промышленное производство вовлекается древесина, не достигшая возраста спелости. Если в 2000-х гг. лесоматериалы малых и средних диаметров заготавливались преимущественно из вершинной части хлыста, то сегодня можно предположить, что источником таких лесоматериалов являются молодые деревья, не достигшие возраста технической спелости, но произрастающие вблизи объектов дорожной инфраструктуры. Изменения размерно-качественных характеристик круглых лесоматериалов носят системный характер и являются предпосылками для модернизации парка машин и оборудования, используемого лесозаготовительными предприятиями и лесопильными заводами. В условиях снижения среднего диаметра круглых лесоматериалов для сохранения текущих показателей производительности и объемного выхода пилопродукции необходимо увеличить скорость подачи и внедрить систему оптимизации, что позволит обеспечивать индивидуальный раскрой сортиментов в соответствии с их размерами и формой.

Для цитирования: Тамби А.А., Угрюмов С.А., Бирман А.Р., Черноградская И.А. Основные размерно-качественные характеристики круглых лесоматериалов, заготавливаемых в Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 147–156. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-147-156

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, средний диаметр, кривизна, сбег, сканирование лесоматериалов, пиловочные бревна.

Введение

Общий запас лесных насаждений в лесах Архангельской области составляет 2 573 млн м³, из них хвойные – 80,2 %, мягколиственные – 19,8 %. В запасе хвойных на первом месте находится ель – 53,3 %, второе место принадлежит сосне – 26,6 %. Доля запаса березовых и осиновых древостоев составляет 17,5 и 1,9 % соответственно. Возрастная структура лесов характеризуется преобладанием запасов спелых и перестойных насаждений (70,0 % от общего запаса, причем доля перестойных в общем запасе достигает 48,0 %). Доля приспевающих насаждений не превышает 9,0 %, молодняков и средневозрастных – 3,7 и 17,5 % соответственно. В 2016–2018 гг. использование расчетной лесосеки находилось на уровне 50 % и составляло около 12,3 млн м³ ликвидной древесины, в том числе в хвойном хозяйстве – 74 % от общего объема заготовки, в мягколиственном хозяйстве – 26 %. Из заготавливаемой древесины 88,8 % приходится на сплошные рубки. Из общего объема заготавливаемой древесины 95,5 % составляет заготовка в спелых и перестойных лесных насаждениях [2, 4].

Исходя из анализа Лесного плана, действовавшего в регионе в 2009–2017 гг., основными заготавливаемыми в регионе породами древесины являются ель и сосна, а возможный объем древесины, дополнительно вовлекаемой в промышленную переработку, может составлять до 12,3 млн м³. При этом необходимо учитывать, что хвойные лесоматериалы в регионе заготавливаются в 3 раза интенсивнее лиственных. Это оказывает большее влияние на изменение таксационных характеристик лесоматериалов из древесины сосны и ели, как более востребованных в промышленном производстве. В экономически развитых лесных регионах, к которым относится и Архангельская область, наблюдается истощение лесосырьевой базы вблизи объектов инфраструктуры, что оказывает непосредственное влияние на размерно-качественные характеристики сортиментов. В промышленное использование вовлекаются большие объемы лесоматериалов малых диаметров, переработка которых требует применения специализированного оборудования.

Эффективность работы предприятий лесопромышленного комплекса во многом закладывается на этапе выбора технологии переработки круглых лесоматериалов. Обоснованный выбор машин, станков и технологических линий, позволяющих перерабатывать древесину с максимальным выходом пиломатериалов в стоимостном выражении, невозможен без получения и анализа достоверной информации о структуре заготавливаемого сырья, включая породный состав и сведения о среднем диаметре и форме сортиментов, на основании которых должны выбираться конкретные модели технологического оборудования.

Цель исследования – оценка основных таксационных характеристик круглых лесоматериалов в экономически доступных лесных массивах Архангельской области. Полученные результаты обладают практической значимостью, поскольку являются базой для принятия проектных решений при обосновании параметров оборудования, которое необходимо устанавливать на новых и реконструируемых предприятиях.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись круглые лесоматериалы, заготавливаемые сортиментным способом на нескольких ведущих предприятиях Архангельской области.

Оценке подлежали порода древесины, диаметр сортиментов, кривизна, сбежистость и содержание коры в объеме круглых лесоматериалов.

Исследования выполнялись на участке сортировки круглых лесоматериалов. Параметры круглых лесоматериалов оценивались до окорки.

Измерения размеров и формы круглых лесоматериалов выполнялись с помощью фотометрического сканера «Вектор 3D» (производство компании «Автоматика Вектор»), позволяющего осуществлять 3-мерное сканирование профилей исследуемых сортиментов. Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52117–2003 «Лесоматериалы круглые. Методы измерений».

Количество исследованных сортиментов: сосна – 15 370 шт., ель – 3 561 шт. Диаметр сортиментов – от 10 до 42 см. Для древесины сосны исследования выполнялись в период с 2014 по 2018 г., для древесины ели – с 2014 по 2016 г. Бревна заготавливались на собственной арендной базе лесопильных предприятий.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследований получено распределение объемов бревен по диаметрам, представленное на рис. 1 и в таблице.

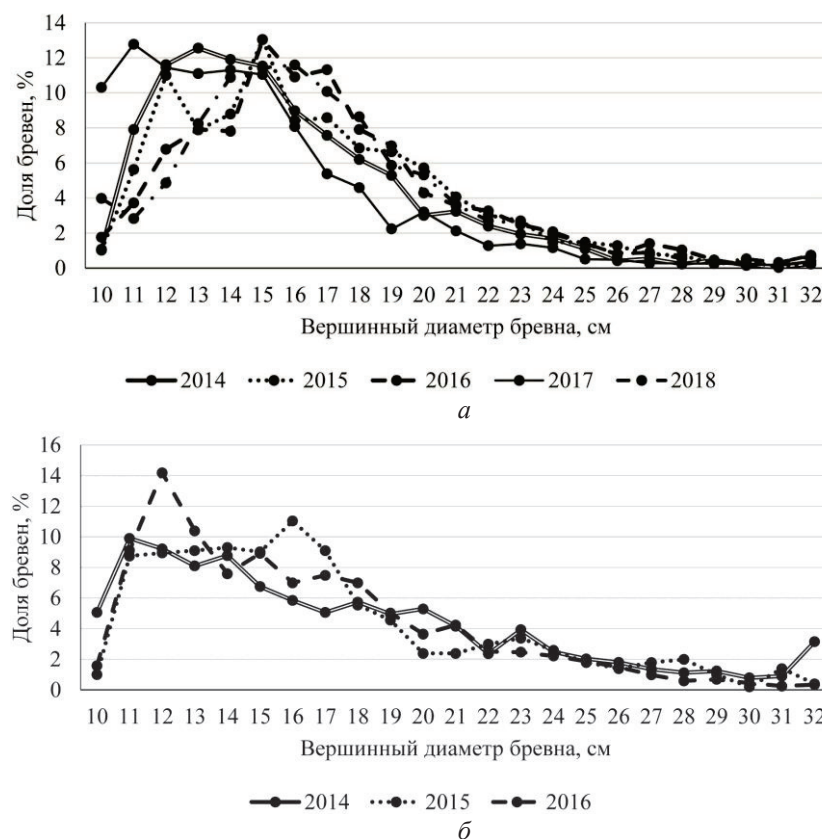


Рис. 1. Распределение объемов бревен по диаметрам: а – сосна; б – ель

Fig. 1. Volume distribution of logs by diameters: а – pine; б – spruce

Распределение объемов бревен (%) по диаметрам

Вершинный диаметр, см	Сосна					Ель		
	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016
10	1,07	1,01	1,76	10,31	3,98	5,06	0,99	1,58
11	7,91	5,62	3,72	12,78	2,83	9,90	8,75	9,11
12	11,60	10,97	6,77	11,44	4,87	9,22	8,95	14,19
13	12,55	7,87	7,91	11,10	8,24	8,10	9,10	10,39
14	11,91	8,77	7,81	11,30	10,88	8,77	9,30	7,59
15	11,53	13,03	13,03	11,05	11,43	6,75	9,02	8,92
16	8,98	8,40	10,91	8,07	11,59	5,85	11,04	7,00
17	7,57	8,57	11,32	5,38	10,07	5,06	9,10	7,49
18	6,20	6,83	7,91	4,59	8,63	5,74	5,54	7,00
19	5,29	6,63	6,98	2,24	5,86	4,95	4,56	5,02
20	3,00	5,70	4,29	3,20	5,31	5,29	2,39	3,65
21	3,23	4,05	3,57	2,12	3,61	4,16	2,39	4,24
22	2,40	3,01	3,26	1,27	2,69	2,36	2,98	2,51
23	1,94	2,69	2,48	1,39	2,56	3,94	3,38	2,46
24	1,67	1,48	2,07	1,16	1,94	2,47	2,58	2,22
25	1,10	1,48	1,40	0,51	1,41	2,02	1,79	1,87
26	0,42	1,27	0,78	0,48	0,81	1,80	1,39	1,48
27	0,53	0,78	1,40	0,28	0,89	1,35	1,79	0,99
28	0,23	0,72	1,03	0,25	0,55	1,12	1,99	0,59
29	0,46	0,26	0,47	0,25	0,29	1,24	0,99	0,69
30	0,15	0,35	0,16	0,23	0,52	0,79	0,20	0,44
31	0,04	0,09	0,31	0,17	0,31	0,90	1,39	0,25
32 и более	0,23	0,41	0,67	0,40	0,73	3,15	0,40	0,34

Примечание. Средний диаметр бревен в кривой сырья выделен жирным шрифтом.

Суммарная доля сортиментов диаметром более 32 см в большинстве случаев не превышала 1,5 %. При обработке результаты были объединены в одну группу диаметров, указанную в статье как диаметр 32 см.

На рис. 1 видно, что экстремумы экспериментальных кривых распределения объемов бревен смещены в левую сторону, что полностью соотносится с известными данными [1, 6–8, 10–12] других исследователей, изучавших размерные характеристики круглых лесоматериалов.

При анализе размерных характеристик лесоматериалов в период с 2014 по 2018 г. установлено, что средний диаметр пиловочного сырья для сосны и для ели варьирует в диапазоне 11...16 см и зависит от параметров лесосеки, эксплуатируемой в год наблюдения. Основной причиной сложившейся ситуации, по мнению авторов, является истощение лесосырьевого фонда, эксплуатируемого в непосредственной близости от имеющихся объектов инфраструктуры. Отдаленные лесные массивы, в которых отсутствует развитая дорожная сеть, не вовлекаются в процессы лесозаготовки и лесопиления. В результате реализации экстенсивной модели использования доступных лесосырьевых ресурсов потенциал региона используется не в полной мере, а производительность предприятий снижается.

За рассматриваемый период тенденция снижения среднего диаметра круглых лесоматериалов (толщины) сохранилась [9, 14, 16]. Текущие значения данного параметра позволяют судить о необходимости изменения подхода

к выбору лесопильного оборудования, которое должно быть ориентировано на преимущественную переработку мелких и средних лесоматериалов (рис. 2).

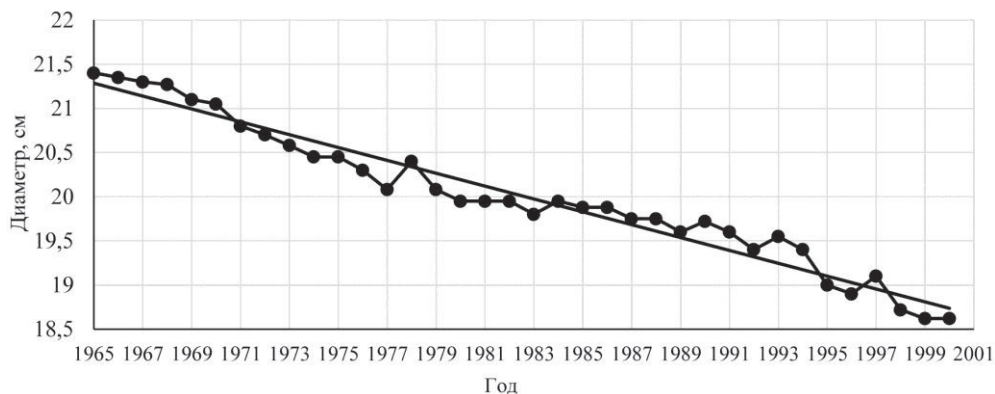


Рис. 2. Изменение среднего диаметра пиловочных бревен

Fig. 2. Change in the average diameter of sawlogs

Характер изменения кривизны сортиментов, снижающейся в последние годы (рис. 3), позволяет предположить, что в процессы лесопиления вовлекается молодая древесина, не достигшая возраста технической спелости.

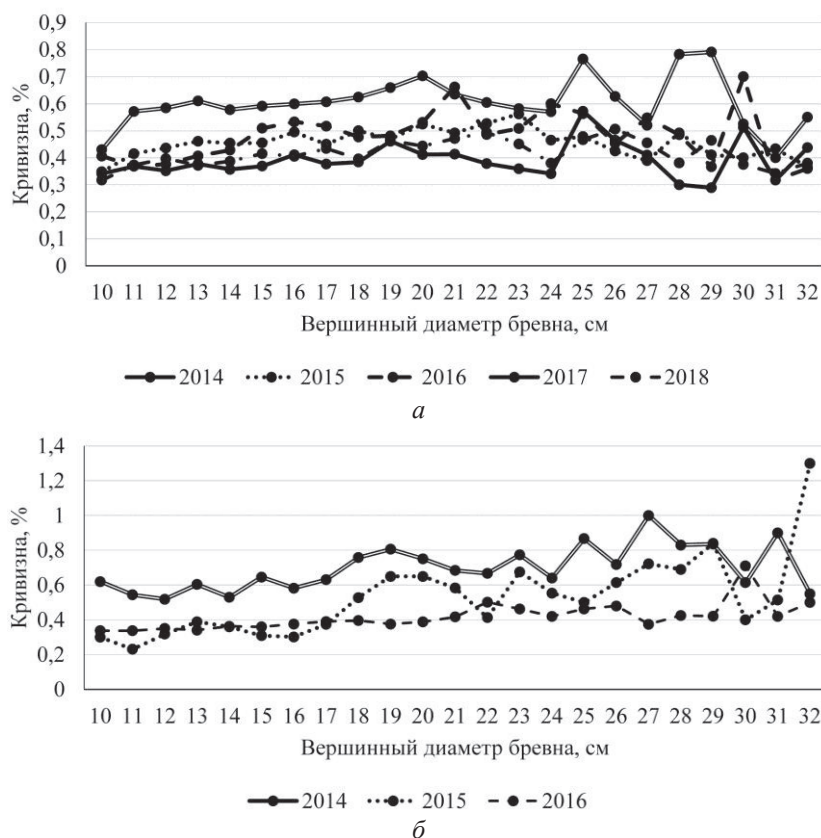


Рис. 3. Средние значения кривизны круглых лесоматериалов: *a* – сосна; *б* – ель

Fig. 3. Average values of round timber curvature: *a* – pine; *б* – spruce

Предпосылкой к такому предположению является то, что средняя кривизна сортиментов в области среднего диаметра 16 см за 4 года снизилась с 0,60 до 0,42 %. Подобные изменения (преимущественно в сторону снижения), фиксируемые на других диаметрах, не могут быть объяснены только общим повышением качества древостоев на новых делянках [13, 18, 19, 20].

Практически все изученные сортименты имеют кривизну, влияние которой на объемный выход пилопродукции можно снизить за счет уменьшения длины сортиментов, что не всегда возможно по условиям контрактов, либо использовать специализированное лесопильное оборудование, позволяющее изменять положение режущего инструмента (схему раскроя) индивидуально перед распиловкой каждого сортимента, либо базировать пиловочник по критерию максимального выхода спецификационной продукции [10, 11].

Еще одной предпосылкой к тому, что при заготовке пиловочника используется древесина, не достигшая технической спелости [15, 16], является сглаживание среднего сбега сортиментов, который при заготовке древесины в возрасте спелости зависит от места выпилки сортимента из хлыста [3, 5, 6].

На рис. 4 приведено изменение среднего сбега у древесины, заготовленной в Архангельской области.

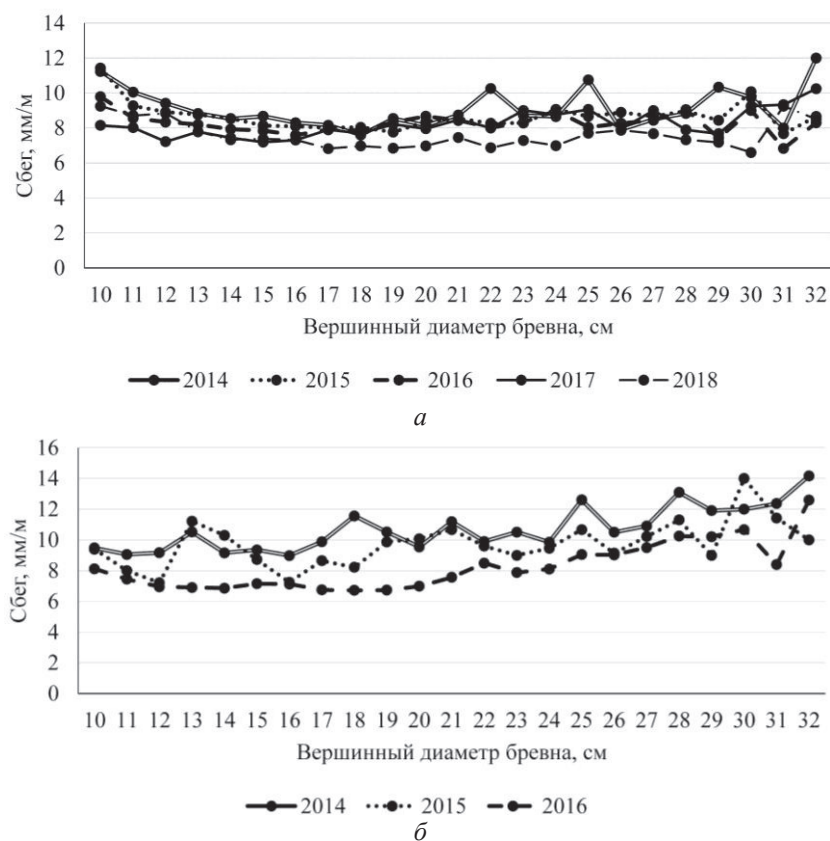


Рис. 4. Сбег круглых лесоматериалов: *a* – сосна; *б* – ель

Fig. 4. Taper of round timber: *a* – pine; *б* – spruce

В процессе исследований было установлено содержание коры (рис. 5).

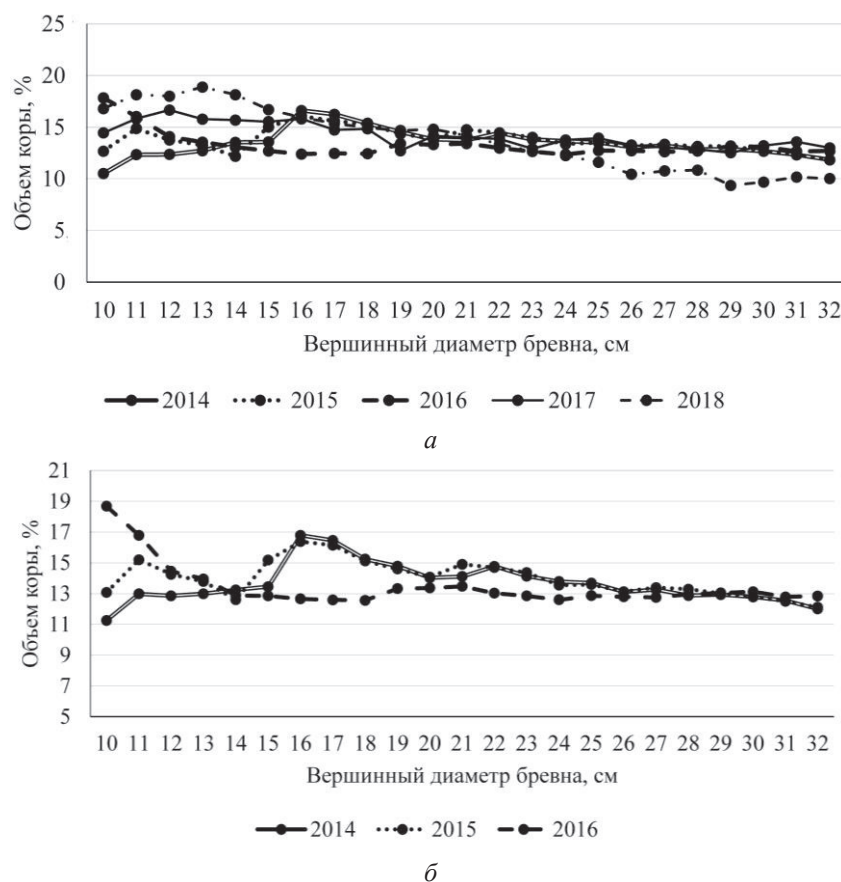


Рис. 5. Объем коры круглых лесоматериалов: а – сосна; б – ель

Fig. 5. Volume of round timber bark: a – pine; б – spruce

Объем коры определяли методом прямых измерений толщины коры, при последующем использовании соответствующих коэффициентов, зависящих от породы древесины и диаметра бревна и вводимых в программное обеспечение оптического сканера «Вектор 3D». Толщину коры измеряли в миллиметрах, объем коры рассчитывали путем вычитания из объема сорти-мента в коре, определенного сканированием, объема древесины, определенно-го в соответствии с ГОСТ Р 52117–2003 «Лесоматериалы круглые. Методы измерений».

Выводы

1. Средний диаметр круглых лесоматериалов в Архангельской области продолжает снижаться, и в рассматриваемый период его величина изменялась в диапазоне 11...16 см для исследуемых пород древесины (сосны и ели).

2. При сохранении тенденции следует ожидать дальнейшего уменьшения среднего диаметра до 11...14 см, а также увеличения доли сырья, заготавливаемого до достижения возраста технической спелости.

3. Для снижения влияния кривизны, сбега и содержания коры на объемный и качественный выход пилопродукции из круглых лесоматериалов необходимо использовать 3D-сканеры и/или рентгеновское оборудование, позволяющее сортировать пиловочные бревна по поставкам с учетом особенностей формы каждого сортимента.

4. Снижение доли средних и крупных круглых лесоматериалов в общем объеме сырья требует изменения или реконструкции основного лесопильного оборудования, которое должно быть ориентировано на переработку тонкомерной древесины и оснащено системами оптимизации, позволяющими осуществлять раскрой бревен с кривизной без снижения объемного выхода пилопродукции.

5. Результаты исследований, проводимых ежегодно с привлечением всех крупных лесозаготовительных и лесопильных компаний, позволят повысить точность прогнозирования производительности, во многом зависящую от среднего диаметра сырья, а также будут служить базой для анализа требований, предъявляемых к лесным машинам и лесопильному оборудованию при техническом перевооружении предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Мелехов В.И., Антонов А.М., Клевцов Д.Н., Коновалов Д.Ю. Влияние условий местопроизрастания на качество древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) в посевах // Хвойные бореальной зоны. 2007. С. 54–58. [Babich N.A., Melekhov V.I., Antonov A.M., Klevtsov D.N., Konovalov D.Yu. Influence of Vegetation Conditions on the Pine Wood (*Pinus sylvestris* L.) Quality in Plantings. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2007, vol. 24, no. 1, pp. 54–58].

2. Государственная программа «Охрана окружающей среды, воспроизводство и использование природных ресурсов Архангельской области (2014–2024 гг.)». Режим доступа: <https://dvinaland.ru/budget/programs/10> (дата обращения: 20.03.19). [State Program "Environmental Protection, Reproduction and Use of Natural Resources of Arkhangelsk Region (2014–2024)"].

3. Данилов Д.А., Беляева Н.В., Грязькин А.В. Особенности формирования запаса и товарной структуры модальных хвойных древостоев сосны и ели к возрасту спелого насаждения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 2. С. 40–48. [Danilov D.A., Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V. Features of Yield and Commodity Composition of Pine and Spruce Modal Coniferous Stands for the Age of Mature Stands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018. no. 2. pp. 40–48]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.2.40](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.2.40), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d09/40_48.pdf

4. Инвестиционный портал Архангельской области. Инвестиционные проекты. Режим доступа: <https://dvinainvest.ru/investment/projects/> (дата обращения: 20.03.19). [Investment Portal of Arkhangelsk Region. Investment Projects].

5. Исаев С.П. Определение размерных характеристик сортимента в зависимости от места его вырезки из хлыста // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. Вып. 4. Брянск: БГИТА, 2002. С. 40–44. [Isaev S.P. Determination of Assortment Dimensional Characteristics Depending on the Place of Its Cutting from a Tree Length Log. *Forest Complex: State and Development Prospects. Collection of Academic Papers*. Bryansk, BGITA Publ., 2002, iss. 4, pp. 40–44].

6. Калитеевский Р.Е. Лесопиление в 21 веке. СПб.: Профи Информ, 2005. 480 с. [Kaliteyevskiy R.E. *Sawmilling in the 21st Century*. Saint-Petersburg, Profi Inform Publ., 2005. 480 p.].

7. Корельская М.А., Копейкин А.М. О корректности определения размерных характеристик пиловочных бревен // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 1. С. 102–106. [Ко-

relskaya M.A., Kopeikin A.M. On Correctness of Saw Log Dimensions Calculation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 1, pp. 102–106]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c23/%D0%9C%D0%A2%D0%943.pdf>

8. Мелехов В.И., Корчагов С.А., Бабич Н.А. Комплексная оценка качества древесины хвойных пород в культурах: моногр. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. 130 с. [Melekhov V.I., Korchagov S.A., Babich N.A. *Comprehensive Assessment of the Wood Quality of Coniferous Plantations*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2013. 130 p.].

9. Рымашевский В.Л., Турушев В.Г., Копейкин А.М. Влияние размерно-качественного состава пиловочного сырья на эффективность экспорта пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2005. № 4. С. 112–115. [Rymashevsky V.L., Turushev V.G., Kopeikin A.M. Influence of Dimension-Quality Composition of Sawing Raw Material on Efficiency of Sawed Timber Export. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2005, no. 4, pp. 112–115]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ea2/ea2652b94d5f330e985d139e7feca630.pdf>

10. Рябokonь А.П. Методология качества древесины // Строение, свойства и качество древесины-2000: материалы III междунар. симп., 11–14 сент. 2000 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 265–268. [Ryabokon' A.P. Methodology of Wood Quality. *Proceedings of the 3rd International Symposium "Wood Structure, Properties and Quality-2000"*, Petrozavodsk, September 11–14, 2000. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2000, pp. 265–268].

11. Тамби А.А., Швец В.Л. Анализ некоторых таксационных характеристик сосны в Республике Карелия // Леса России в XXI в.: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. интернет-конф. СПб.: СПбГЛТА, 2010. С. 34–37. [Tambi A.A., Shvets V.L. Analysis of Some Inventory Characteristics of Pine in the Republic of Karelia. *Forests of Russia in the 21st Century: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference*. Saint Petersburg, LTA Publ., 2010. pp. 34–37].

12. Тамби А.А., Швец В.Л., Сажин В.Е. Основные направления повышения эффективности раскря пиловочного сырья // Forest Engineering: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. С. 256–260. [Tambi A.A., Shvets V.L., Sazhin V.E. The Main Directions of Improving the Cutting Efficiency of Sawing Raw Materials. *Forest Engineering: Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation, Yakutsk, May 30–31, 2018*. Yakutsk, NEFU Publ., 2018. pp. 256–260].

13. *Biology and Ecology of Norway Spruce*. Ed. by M.G. Tjoelker, A. Boratynski, B. Wladyslaw. Netherlands, Springer, 2007. 474 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-4841-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4841-8)

14. Bowyer J.L., Shmulsky R., Haygreen J.G. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. USA, Iowa State Press, 2003. 554 p.

15. Del Río M., Bravo-Oviedo A., Pretzsch H., Löf M., Ruiz-Peinado R. A Review of Thinning Effects on Scots Pine Stands: From Growth and Yield to New Challenges Under Global Change. *Forest Systems*, 2017, vol. 26, no. 2, art. eR03S. DOI: [10.5424/fs/2017262-11325](https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11325)

16. Gauthier M.-M., Barrette M., Tremblay S. Commercial Thinning to Meet Wood Production Objectives and Develop Structural Heterogeneity: A Case Study in the Spruce-Fir Forest, Quebec, Canada. *Forests*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 510–532. DOI: [10.3390/f6020510](https://doi.org/10.3390/f6020510)

17. Intensification of Forest Management and Improvement of Wood Harvesting in Northwest Russia – Final Report of the Research Project. Ed. by T. Karjalainen, T. Leinonen, Y. Gerasimov, M. Husso, S. Karvinen. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 110*. Vantaa, Finland, Finnish Forest Research Institute, 2009. 151 p.

18. Parviainen J., Västilä S. *State of Finland's Forest 2011. Based on the Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management*. Finland, Ministry of Agriculture and Forestry, 2011. 98 p.

19. Peltola H., Gort J., Pulkkinen P., Zubizarreta Gerendiain A., Karpinen J., Ikonen V.-P. Differences in Growth and Wood Density Traits in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.)

Genetic Entries Grown at Different Spacing and Sites. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 3, pp. 339–354. DOI: [10.14214/sf.192](https://doi.org/10.14214/sf.192)

20. *State of Europe's Forests 2011. Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*. Oslo, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 2011. 344 p.

DIMENSIONAL AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF ROUND TIMBER HARVESTED IN ARKHANGELSK REGION

A.A. Tambi¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

S.A. Ugryumov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

A.R. Birman², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-3713-2019](https://orcid.org/0000-0002-1693-0515),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>

I.A. Chernogradskaya¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [X-1987-2019](https://orcid.org/0000-0001-9708-8990),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-8990>

¹Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: a_tambi@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: ugr-s@yandex.ru

The efficiency of woodworking enterprises largely depends on the size and qualitative characteristics of round timber. The paper aims to assess the main inventory characteristics of round timber in economically accessible forest areas of Arkhangelsk region. The studies were carried out at a number of large enterprises in Arkhangelsk region using a modern VECTOR 3D photometric scanner. Measurements were made on the line for sorting logs by diameter at the warehouses of raw materials. There were examined 18,931 sawlogs. The length of each log was 6 m. The diameter range of round timber was from 10 to 42 cm. As a result of experiments, the average diameter of harvested logs of pine and spruce were found and the parameters of curvature, taper and bark content were determined depending on the top diameter of round timber. The region continues to trend a gradual decrease in the average diameter of round timber, the value of which in the considered period 2014–2018 varied in the range of 11–16 cm. Simultaneously with a decrease in the average diameter of round timber, the curvature, taper and bark content are reduced, which may indirectly indicate that wood under the age of ripeness is involved in industrial production. If in the 2000s small and medium-sized timber was harvested mainly from the tree top, today, it can be assumed that the source of such timber is young trees that have not reached the age of industrial ripeness but grow near the road infrastructure. Changes in the dimensional and qualitative characteristics of round timber are of a system nature and are makings for the modernization of the machinery and equipment used by logging enterprises and sawmills. In the context of reducing the average diameter of round timber, in order to maintain current performance and volume output of sawn timber, it is necessary to increase feed rates and introduce an optimization system resulting in provision of individual cutting of logs in accordance with their size and shape.

For citation: Tambi A.A., Ugryumov S.A., Birman A.R., Chernogradskaya I.A. Dimensional and Qualitative Characteristics of Round Timber Harvested in Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 147–156. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-4-147-156](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-147-156)

Keywords: round timber, average diameter, curvature, taper, timber scanning, sawlogs.

Поступила 30.08.19 / Received on August 30, 2019

УДК 539.4:539.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167

РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ LVL С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ

*А.Г. Черных, д-р техн. наук, зав. каф.**Е.В. Данилов, ст. преподаватель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8919-4600>**П.С. Коваль, ст. преподаватель*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: chagrig@lan.spbgasu.ru, sleepme@mail.ru, pkoval@lan.spbgasu.ru

Применение когтевых шайб в нагельных соединениях позволяет увеличить несущую способность и жесткость узлов. Вместе с тем совместная работа когтевых шайб и нагелей в конструкциях из современных материалов изучена недостаточно. В работе приводятся основные недостатки существующих методик расчета таких соединений. Представлены дифференциальные уравнения, моделирующие поведение нагельного соединения с когтевыми шайбами с учетом возможных изменений форм когтей, влажности древесины, длительности действия нагрузки. Нагель и коготь шайбы описываются уравнениями для балок, лежащих на упруго-вязком основании, с использованием ядра уравнения $K(\tau, t)$, отражающего нелинейность факторов, влияющих на деформации соединителя. Приведены уравнения деформации нагеля, которые предлагается решать путем разложения в ряд методом Бубнова–Галеркина. Полученные выражения объединяются в одном уравнении с использованием функций Хэвисайда. Также представлены уравнения деформирования, которые записываются с учетом возможного смещения когтя по двум ортогональным направлениям. Приводятся выражения, позволяющие перейти от расчета когтей шайбы и нагеля к определению общей несущей способности и жесткости узла. Для адекватного моделирования поведения элементов соединения при достижении пластической стадии учитывается возможность образования пластических шарниров за счет изменения граничных условий. В статье приводится методика определения теоретических смещений и линейной жесткости соединения. Уравнения рассчитываются с использованием зависимостей, полученных экспериментальным путем. В ходе решения уравнений можно установить значения линейной жесткости. Данные значения сравниваются с экспериментальными, полученными ранее, для оценки адекватности предложенных решений. Распределение теоретических и экспериментальных данных обладает средней сходимостью 91 %, что подтверждает справедливость представленной методики определения жесткости нагельных соединений в LVL с когтевыми шайбами. Предлагаемая методика может быть рекомендована для более точного расчета деревянных конструкций по прочности и жесткости, что позволит снизить их материалоемкость и повысить надежность.

Для цитирования: Черных А.Г., Данилов Е.В., Коваль П.С. Расчет жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 157–167. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167

Ключевые слова: когтевые шайбы, LVL, деревянные конструкции, жесткость, соединения.

Введение

В практике строительства из деревянных конструкций часто используются новые композиционные материалы на основе древесины, имеющие улучшенные прочностные и жесткостные характеристики. К ним

относится LVL брус (Laminated Veneer Lumber) – брус клееный из шпона. Этот материал изучен недостаточно. Его расчетные характеристики зависят от применяемого породного состава слоев и технологии изготовления. Для увеличения несущей способности и жесткости деревянных конструкций обосновано использование когтевых шайб, что позволяет повысить прочность и жесткость нагельных соединений.

Когтевые шайбы – это разновидность соединителей, выполненных в виде двух- или односторонней зубчато-кольцевой шпонки, изготовленной из круглой пластины, края которой вырезаны и наклонены под углом 90° к ее плоскости, образуя треугольные когти, выступающие попеременно с противоположных сторон пластины (двусторонние) или с одной стороны (односторонние) (рис. 1) [14]. При расчете по существующим методикам невозможно полностью учесть факторы, влияющие на характер одновременной работы двух разных соединителей. Поэтому развитие методик расчета жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в деревянных конструкциях является актуальной задачей.

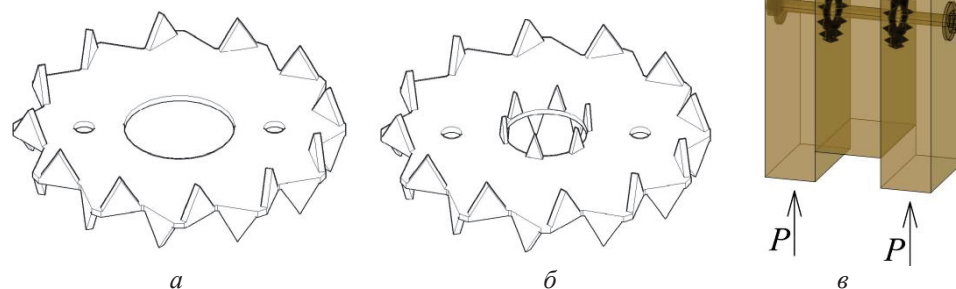


Рис. 1. Когтевые шайбы: *а* – диаметр до 95 мм; *б* – диаметр 95 мм и более; *в* – когтевая шайба в нагельном соединении (P – усилие, действующее на соединение)

Fig. 1. Claw washers: *a* – diameter less than 95 mm, *b* – diameter 95 mm and more, *v* – claw washer in dowel connection (P – force acting on the connection)

Соединения с когтевыми шайбами совмещают разновидности соединений нагельного и шпоночного типа. Изучением работы и расчетом нагельных соединений деревянных конструкций занимались П.А. Дмитриев, Г.Г. Никитин, Н.В. Шешукова и др. [5–7, 10, 15]. Исследования конструкций с когтевыми шайбами ведутся с начала прошлого века следующими учеными: в отечественной практике – В.Г. Леннов, Б.В. Лабудин, Е.В. Попов, В.В. Пуртов, А.В. Павлик и др. [8, 9, 11, 12]; в зарубежной – Н.Ж. Blass, М. Schlager, С.Н. Mettem, А.В. Page и др. [16–18, 22]. Результаты работы исследователей в разное время нашли отражение в таких нормативных документах, как DIN 1052, Eurocode 5, NEN 3852 [19, 21, 23]. В существующих методиках есть недостатки, которые приведены в табл. 1.

Цель исследования – устранение недостатков методик, рассмотренных в табл. 1, что позволит увеличить точность расчетов жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами. В нашей работе ставятся следующие задачи: разработать математическую модель соединения с

Таблица 1

Некоторые существующие методики расчета соединений с когтевыми шайбами

Авторы	Страна	Недостатки методики
В.Г. Леннов [9]	СССР	Не рассматривается влияние формы когтей на коэффициент постели
С.Н. Mettem, М. Schlager, G. Davis, J.H. Blass, A.V. Page, J. Eh-lbeck [16–18, 22]	Германия	Не позволяет адекватно учитывать влияние варьирования плотности используемых материалов и изменения толщины элементов
Y. Hirashima [20]	Япония	Используются нераспространенные породы древесины с физико-механическими характеристиками, отличными от древесины, используемой в России и Европе
Eurocode 5, DIN 1052, СТАДД-3.2–2011, NEN 3852 [14, 19, 21, 23]	Европейский союз, Россия	Выполняется прогноз деформативности соединений только для длительного периода времени (более 50 лет) и только для соединителей, ограниченных стандартом EN912

нагелями и когтевыми шайбами; теоретически определить жесткость соединений из LVL с когтевыми шайбами; сопоставить результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Объекты и методы исследования

В работе приняты следующие допущения: ось нагеля принимается прямолинейной до момента образования в нем пластического шарнира; деформации нагеля (когтя шайбы) и LVL совместны; при действии срезающих сил в соединении каждый крепежный элемент принимает равную долю усилия; все крепления в соединении имеют линейное смещение при изменении нагрузки; расстояние до крепежного элемента принимается из условия, что в течение приложения нагрузки не произойдет разрушения, раскалывания или смятия деревянных конструкций.

Изогнутая ось нагеля может описываться уравнением [13]:

$$EIy^{IV}(x,t) + Cy(x,t) + \int_0^t p(x,t)K(t,\tau)d\tau = q(x,t), \quad (1)$$

где EI – жесткость стержня нагеля; $y(x,t)$ – смещение в точке; C – коэффициент постели, $p(x,t)$ – реакция гнезда нагеля; $K(t,\tau)$ – наследственное ядро уравнения; $q(x,t)$ – внешняя нагрузка.

Ядро уравнения $K(t,\tau)$ принимается по результатам аппроксимации кривых ползучести LVL при действии цилиндрическим штампом [13]:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}},$$

где A , α , β – постоянные величины; t – время нагружения.

Граничные условия для каждого элемента соединения (на примере двухсрезного симметричного):

при $x = 0$:

$$\begin{aligned} EIy''(0,t) &= 0; \\ y'''(0,t) &= 0; \\ M_0 &= Q_0 = 0; \end{aligned}$$

при $x = l$:

$$\begin{aligned} EI y''(l, t) &= 0; \\ y'(l, t) &= 0; \\ M_l = Q_l &= 0, \end{aligned}$$

где M_0, M_l – изгибающий момент в начале и окончании стержня нагеля; Q_0, Q_l – поперечная сила в начале и окончании стержня нагеля; l – длина стержня нагеля.

Решение уравнения (1) производится разложением в ряд и с применением метода Бубнова–Галеркина. Затем определяются коэффициенты C_{ij} , и далее методом интегрирования собираются все составляющие уравнения:

$$y(x, t) = \sum C_{ij} z_{ij}, \quad (2)$$

где z_{ij} представляет собой балочную функцию.

Использование функций Хэвисайда позволяет записать полученные уравнения для всех элементов в одном выражении. Тогда (2) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} y(x, t) = C_{11} z_{11}(x, t)(H(x) - H(x - l_1)) + C_{12} z_{12}(x, t)(H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2)) + \\ + C_{13} z_{13}(x, t)(H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_1 - 2l_1)). \end{aligned} \quad (3)$$

При решении уравнения (3) необходимо, чтобы удовлетворялись условия:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{q_{\text{см}}}{d_{\text{см}}} = \frac{d^4 y}{dx^4} \frac{EI}{d_{\text{см}}} < R_{\text{см}}^{\text{дл}}; \quad y(x, t) \leq \delta_{\text{пред}},$$

где $\sigma_{\text{см}}$ – напряжения смятия; $q_{\text{см}}$ – внешнее силовое воздействие; $d_{\text{см}}$ – диаметр нагеля; $R_{\text{см}}^{\text{дл}}$ – величины временного и длительного сопротивления LVL смятию под соответствующим углом к волокнам при действии цилиндрическим штампом; $\delta_{\text{пред}}$ – предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм [5, 10].

Для когтя шайбы можно воспользоваться уравнением, предложенным Н.Ю. Работновым [13]. Записываются уравнения деформирования по осям Y и Z . Усилие N раскладывается на составляющие, прикладываемые параллельно и перпендикулярно когтю (расчетная схема когтя шайбы в упруго-вязком полупространстве представлена на рис. 2):

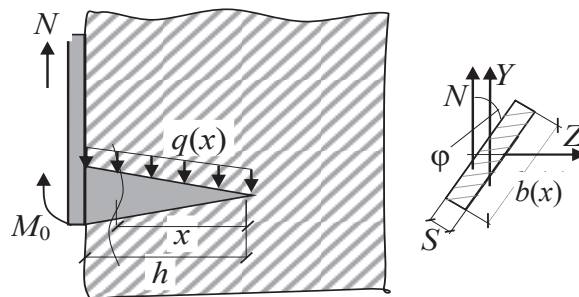


Рис. 2. Схема к расчету когтя шайбы под углом φ к направлению приложения усилия N

Fig. 2. Scheme for the calculation of a washer claw at an angle φ to the direction of application of force N

$$\begin{cases} EI(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\} + C_{\alpha}y(x,t) + \\ + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\}K_0(t-\tau)d\tau = 0; \\ C_{\alpha+90}z(x,t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x\} + \\ + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x\}K_0(t-\tau)d\tau = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где C_{α} , $C_{\alpha+90}$ – коэффициент постели при угле действия силы к волокнам α и $\alpha + 90^\circ$ соответственно; K_0 – ядро уравнения.

Ядро $K(t,\tau)$ в выражении (4) принимается в результате аппроксимации кривых ползучести LVL при действии треугольным штампом, определенных экспериментально. Учет образования пластического шарнира должен проводиться при граничных условиях из табл. 2.

Таблица 2

Граничные условия

Период	При $x = 0$	При $x = h$
До образования пластического шарнира	$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0$	$\frac{dy}{dx} = \varphi = 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}$
После образования пластического шарнира	$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0$	$\frac{dy}{dx} = \varphi \neq 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}$

Несущая способность когтевой шайбы может быть найдена как сумма несущих способностей всех когтей, а суммарная несущая способность одного соединителя на один срез определяется как сумма несущих способностей нагеля и когтевой шайбы.

При передаче нагрузки на узел внутри него могут возникать продольные усилия S_1 , поперечные усилия S_2 , изгибающий момент S_3 (рис. 3).

На каждый соединитель внутри одного среза узла будут передаваться эквивалентные продольные усилия $S_{\text{экр.1}}$, поперечные усилия $S_{\text{экр.2}}$, усилие действия момента $S_{\text{экр.3}}$. При выполнении расчета за перемещения Δ принимаются смещения соединителей относительно начального положения:

$$S_{\text{экр.1}} = \frac{S_1}{nn_{\text{ш}}}; S_{\text{экр.2}} = \frac{S_2}{nn_{\text{ш}}}; S_{\text{экр.3},i} = \frac{S_3 r_i}{n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2}; \Delta_i = \frac{r_i}{r_{\text{max}}} \Delta_{\text{max}},$$

где n – число соединителей; $n_{\text{ш}}$ – число условных срезов (швов); r_i – расстояние от центра вращения до i -го соединителя; r_{max} – расстояние от центра вращения до максимально удаленного соединителя.

Для определения перемещений в узле по осям x , y и поворота на угол Θ необходимо задаться тремя значениями жесткостей K_1 , K_2 , K_3 соответственно.

Жесткости $K_{\text{наг1}}$, $K_{\text{наг2}}$, $K_{\text{наг3}}$ для нагеля на один срез будут определяться:

$$K_{\text{наг1}} = \frac{N_{\text{наг}} \sin \alpha}{\Delta_{x,c}}; K_{\text{наг2}} = \frac{N_{\text{наг}} \cos \alpha}{\Delta_{y,c}}; K_{\text{наг3}} = \frac{N_{\text{наг}} r_i}{\Theta}.$$

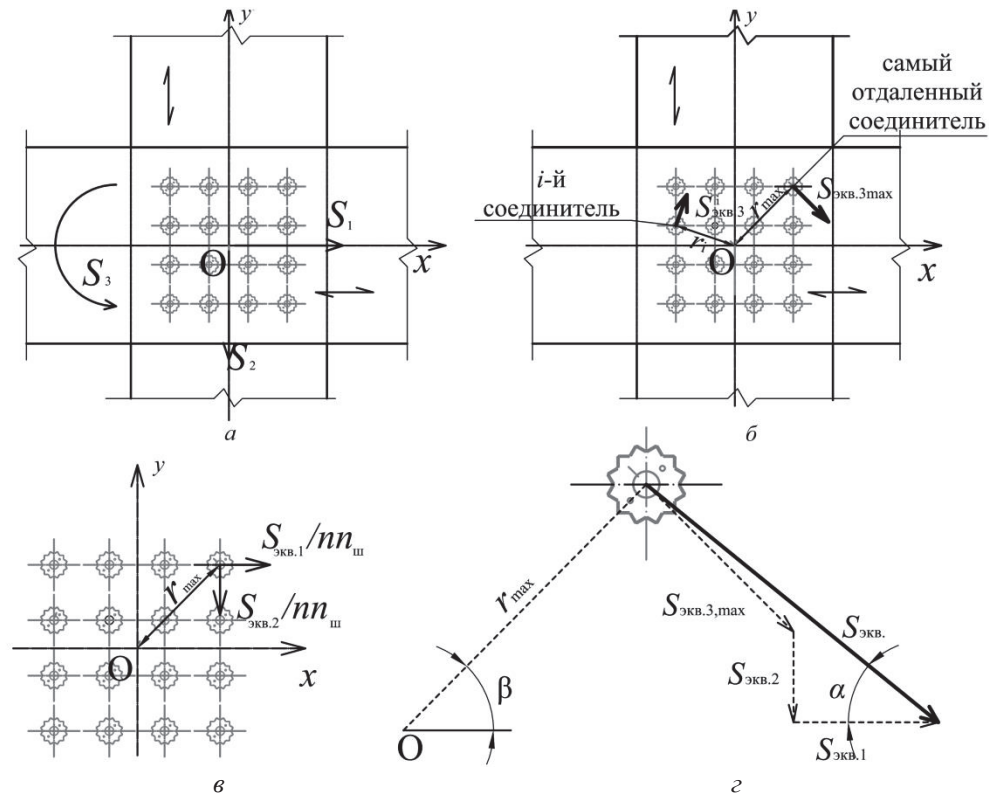


Рис. 3. Схема для расчета соединений: а – общий вид соединения; б – возникновение усилий в различных соединительных элементах от действия S_3 ; в – возникновение усилий от действия усилий S_1 и S_2 ; г – определение $S_{\text{экв}}$ и его составляющих

Fig. 3. Scheme for calculating the connections: а – general view of a connection; б – occurrence of forces in various connecting elements because of the bending moment (S_3); в – occurrence of forces because of the longitudinal (S_1) and lateral (S_2) forces; г – definition of the equivalent forces ($S_{\text{экв}}$) and their components

Жесткости $K_{\text{к.ш1}}$, $K_{\text{к.ш2}}$, $K_{\text{к.ш3}}$ для когтевой шайбы на один срез:

$$K_{\text{к.ш1}} = \frac{\sum N_{\text{к.ш}} \sin \alpha}{\sum \Delta_{x,c}}; \quad K_{\text{к.ш2}} = \frac{\sum N_{\text{к.ш}} \cos \alpha}{\sum \Delta_{y,c}}; \quad K_{\text{к.ш3}} = \frac{\sum N_{\text{к.ш}} r_i}{\sum \Theta};$$

$$\Theta = \arccos \left(\frac{2r_i^2 + \sqrt{\Delta_{y,c}^2 + \Delta_{x,c}^2}}{2r_i^2} \right).$$

Здесь $\Delta_{x,c}$ и $\Delta_{y,c}$ – смещения соединяемых элементов относительно начального положения по осям y и x соответственно, определяемые из выражений (3) для нагеля и (4) для каждого когтя шайбы.

Для любого узла жесткости K_1 , K_2 , K_3 могут быть найдены путем сложения всех жесткостей соединителей на каждом срезе:

$$K_1 = \sum K_{\text{наг1}} + \sum K_{\text{к.ш1}}; \quad K_2 = \sum K_{\text{наг2}} + \sum K_{\text{к.ш2}}; \quad K_3 = \sum K_{\text{наг3}} + \sum K_{\text{к.ш3}}.$$

При известных жесткостях соединения можно найти фактические смещения из следующих выражений:

$$\Delta_1 = \frac{S_1}{K_1}; \Delta_2 = \frac{S_2}{K_2}; \theta = \frac{S_3}{K_3}.$$

Для определения теоретической жесткости узлов нагельных соединений в LVL с когтевыми шайбами требуются только значения экспериментальных исследований параметров уравнений (3), (4), которые раскрыты в работах [1–4].

Результаты исследования и их обсуждение

По предлагаемой методике были рассчитаны коэффициенты линейной жесткости в зависимости от угла направления среднего элемента к направлению действия нагрузки (0°, 90°), диаметров когтевой шайбы (50, 95, 117 мм), диаметра нагеля (12, 16, 20 мм) при фиксированной толщине элементов LVL $t = 45$ мм.

Значения теоретических результатов на один срез для одного соединителя сопоставлялись с экспериментальными, приведенными в [1, 3]. Результаты расчета и испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

Результаты теоретических и экспериментальных исследований жесткости на один срез для двухсрезного соединения при действии кратковременной нагрузки

Угол приложения нагрузки к волокнам α , град	Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	Диаметр нагеля $d_{наг.}$, мм	Линейная жесткость на 1 условный срез K , кН/мм		Разница экспериментальных и теоретических значений, %
			Теория	Эксперимент	
0	50	12	9,93	10,05	0,60
		16	15,26	11,20	13,30
		20	17,91	12,32	15,61
	95	12	11,13	15,21	13,41
		16	16,67	16,45	0,66
		20	19,18	17,55	4,25
	117	12	17,91	17,90	0,03
		16	19,18	19,15	0,08
		20	20,14	20,67	1,28
90	50	12	1,86	1,88	0,53
		16	3,98	2,53	18,22
		20	4,69	2,89	19,19
	95	12	4,11	3,50	7,42
		16	2,85	4,01	14,46
		20	2,56	4,15	19,16
	117	12	3,50	4,21	8,43
		16	4,09	4,72	6,67
		20	4,41	4,88	4,82

На графиках (рис. 4) приведены значения линейной жесткости соединений с когтевыми шайбами на один срез при разных размерах когтевой шайбы и нагеля, при варьировании угла приложения силы к волокнам среднего элемента (с учетом того, что направление волокон крайних элементов двухсрезного соединения сонаправлено с действием нагрузки).

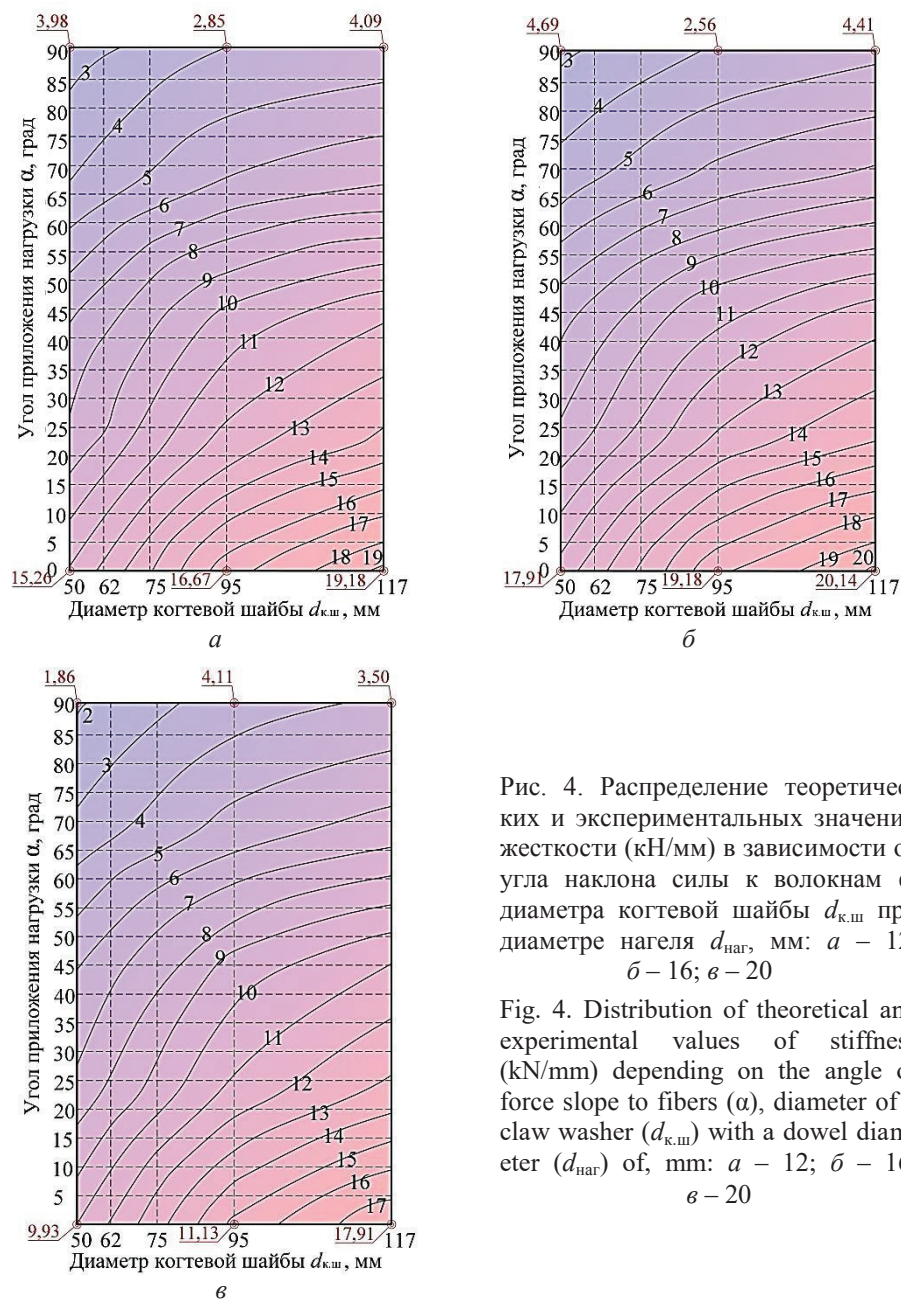


Рис. 4. Распределение теоретических и экспериментальных значений жесткости (кН/мм) в зависимости от угла наклона силы к волокнам α , диаметра когтевой шайбы $d_{к.ш}$ при диаметре нагеля $d_{наг}$, мм: *a* – 12; *b* – 16; *v* – 20

Fig. 4. Distribution of theoretical and experimental values of stiffness (kN/mm) depending on the angle of force slope to fibers (α), diameter of a claw washer ($d_{к.ш}$) with a dowel diameter ($d_{наг}$) of, mm: *a* – 12; *b* – 16; *v* – 20

Знания о линейной жесткости для конкретного расчетного случая позволяют определять теоретические смещения элементов соединения, используя уравнения (5).

Из табл. 3 и рис. 4 видно, что максимальная разница в данных теоретических и экспериментальных исследований достигает до 20 % при средней сходимости 91,77 %, что является хорошим показателем. На основании этого можно заключить, что приведенная модель нагельного соединения с когтевыми шайбами является адекватной.

Заключение

Предлагаемая методика определения жесткости нагельных соединений в LVL бруссе с когтевыми шайбами является адекватной и может быть использована для более точного расчета конструкций, что позволит снизить их материалоемкость и повысить эксплуатационную надежность. Дальнейшие исследования можно продолжить в направлении изучения влияния меняющихся срезовых условий. Также обосновано проведение экспериментальных исследований при промежуточных показателях диаметров нагелей и когтевых шайб, иных значениях толщин элементов LVL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Глухих В.Н., Черных А.Г., Данилов Е.В. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины. СПб.: СПбГАСУ, 2018. 284 с. [Glukhikh V.N., Chernykh A.G., Danilov E.V. *Wooden Structures Using Claw Washers and Taking Into Account the Initial Stresses of Wood*. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2018. 284 p.].
2. Данилов Е.В. Исследование длительной прочности LVL при смятии цилиндрическим штампом // Вестн. гражд. инж. 2014. № 4(45). С. 38–42. [Danilov E.V. Investigation of Long-Term LVL Strength in Compression by a Cylindric Stamp. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2014, no. 4(45), pp. 38–42].
3. Данилов Е.В. Исследование кратковременной прочности LVL при смятии треугольным штампом // Вестн. гражд. инж. 2014. № 1(42). С. 28–33. [Danilov E.V. Research of the Short-Term Strength of LVL in Compression by a Triangular Plate. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2014, no. 1(42), pp. 28–33].
4. Данилов Е.В. Определение линейной жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в бруссе LVL // Вестн. гражд. инж. 2017. № 2(61). С. 81–85. [Danilov E.V. Determination of Linear Stiffness of Dowel Joints with Claw Rings in the LVL Beam. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2017, no. 2(61), pp. 81–85]. DOI: [10.23968/1999-5571-2017-14-2-81-85](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-2-81-85)
5. Дмитриев П.А. Исследование длительной несущей способности соединений деревянных элементов на стальных цилиндрических нагелях // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1973. № 5. С. 28–35. [Dmitriyev P.A. Studying the Long-Term Bearing Capacity of Wooden Connections on Steel Cylindrical Dowel Pins. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1973, no. 5, pp. 28–35].
6. Дмитриев П.А., Стрижаков Ю.Д. Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях поперек волокон при действии кратковременной и длительной нагрузок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1967. № 7. С. 28–35. [Dmitriyev P.A., Strizhakov Yu.D. Studying the Bearing Strength of Wood in the Holes against the Grain under the Action of Temporary and Steady Loads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1967, no. 7, pp. 28–35].
7. Дмитриев П.А., Стрижаков Ю.Д. Исследование деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1969. № 8. С. 41–49. [Dmitriyev P.A., Strizhakov Yu.D. Studying the Wooden Elements of Dowels under the Action of Temporary Loads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1969, no. 8, pp. 41–49].
8. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой. Архангельск: АГТУ, 2007. 267 с. [Labudin

B.V. *Improving Laminated Wood Structures with a Spatially Regular Structure*. Arkhangel'sk, ASTU Publ., 2007. 267 p.].

9. Леннов В.Г. Индустриальные деревянные фермы на когтевых шайбах: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1941, 289 с. [Lennov V.G. *Industrial Timber Trusses Made with the Use of Claw Washers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Gorky, 1941. 289 p.].

10. Никитин Г.Г. Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1964. 192 с. [Nikitin G.G. *Calculation of Dowel Connections with Allowances Made for Deformations Developing in Time*: Cand. Eng. Sci. Diss. Leningrad, 1964. 192 p.].

11. Попов Е.В., Столыпин Д.А., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Напряженно-деформированное состояние панелей на деревянном каркасе с различными вариантами крепления обшивки // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4, № 5-2(25-2). С. 133–139. [Popov E.V., Stolypin D.A., Labudin B.V., Melekhov V.I. Stress-Strain State of Panels on a Wooden Frame with Different Variants Joints of Trim. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2016, vol. 4, no. 5-2(25-2), pp. 133–139].

12. Пуртов В.В., Павлик А.В. Расчет в программе ANSYS деревянных конструкций с крепежными элементами повышенной несущей способности // VII Междунар. симп. «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)» (Новосибирск, 1–8 июля 2018 г.). Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2018. С. 72. [Purtov V.V., Pavlik A.V. Calculation in the ANSYS Program of Wooden Structures with Fasteners of Increased Bearing Capacity. *Proceedings of the VII International Symposium "Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering (APCSCE 2018)"*, Novosibirsk, July 1–8, 2018. Novosibirsk, NSUACE (SIBSTRIN) Publ., 2018, p. 72].

13. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с. [Rabotnov Yu.N. *Creeping of Structural Elements*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 752 p.].

14. СтАДД-3.2–2011. Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб., 2012. 59 с. [Association Standard of Wooden House Construction StADD-3.2.–2011. *Wooden Structures. Joining Wooden Elements Using Connector Plates*. Saint Petersburg, 2012. 59 p.].

15. Шешукова Н.В. Несущая способность и деформативность нагельных соединений деревянных конструкций при циклическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2001, 152 с. [Sheshukova N.V. *Bearing Capacity and Deformability of the Dowel Connections of Wooden Structures when Subjected to Cyclic Loadings*: Cand. Eng. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2001. 152 p.].

16. Blass H.J., Aune P., Choo B.S., Grolacher R., Griffiths D.R., Hilson B.O. et al. *Timber Engineering STEP 1: Basis of Design, Material Properties, Structural Components and Joints*. Almere, Netherlands, Centrum Hout, 1995. 300 p.

17. Blass H.J., Schlager M. *Trial Calculations for Determination of the Load-Carrying Capacity of Joints with Bulldog Connectors*. CEN/TC 124/WG4 N23, 1993. 6 p.

18. Blaß J.H., Ehlbeck J., Schlager M. Characteristic Strength of Tooth-Plate Connector Joints. *Holz als Roh und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 1993, vol. 51, pp. 395–399. DOI: [10.1007/BF02628236](https://doi.org/10.1007/BF02628236)

19. Eurocode 5: *Design of Timber Structures. Part: General Rules and Rules for Buildings*. ENV 1995-1-1. Brussels, CEN, 1993. 133 p.

20. Hirashima Y. Lateral Resistance of Timber Connector Joints Parallel to Grain Direction. *Proceedings of the International Engineering Conference*. Tokyo, 1990, vol. 1, pp. 254–261.

21. Lißner K., Rug W., Steinmetz D. DIN 1052:2008-12 Neue Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Teil 5(2): Aussteifungen von Holztragwerken (Fortsetzung aus Heft 7/09 und Schluss). *Bautechnik*, 2009, vol. 86, iss. 8, 490–505. DOI: [10.1002/bate.200910051](https://doi.org/10.1002/bate.200910051)

22. Mettem C.J., Page A.V. Davis G. Validatory Tests and Proposed Design Formulae for the Load-Carrying Capacity of Toothed-Plate Connected Joints. *Papers of the 26th*

Meeting of the Working Commission W18 – Timber Structures, Athens, GA, USA, August, 1993. Germany, Universität Karlsruhe, 1994, CIB-W18 Paper 26-7-2. 25 p.

23. *Standard NEN 3852:1973 nl. Technische grondslagen voor de berekening van bouwconstructies – TGB 1972 – Hout – Houtconstructies* [Regulations for the Calculation of Building Structures – Timber Structures]. Netherlands, 1973. 131 p.

STIFFNESS ANALYSIS OF CONNECTIONS OF LVL STRUCTURES WITH CLAW WASHERS

A.G. Chernykh, Doctor of Engineering, Head of Department

E.V. Danilov, Senior Lecturer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8919-4600>

P.S. Koval, Senior Lecturer

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: chagrig@lan.spbgasu.ru, sleepme@mail.ru, pkoval@lan.spbgasu.ru

The use of claw washers in dowel connections allows to increase the bearing capacity and stiffness of joints. However, joint action of claw washers and dowels in the structures of advanced materials is studied insufficiently. The paper presents the key failures of existing methods for calculating such connections. Differential equations, that simulate the behavior of a dowel connection with claw washers taking into account the possible changes in the shape of claws, wood moisture content and the duration of loading, are presented. Washer dowel and claw are followed the equations for beams secured on a visco-elastic base, using the equation kernel $K(\tau, t)$, which reflects the nonlinearity of the factors affecting the deformation of a connection. The dowel deformation equations are given, which are proposed to be solved by the Bubnov-Galerkin method. The obtained expressions are united into a single equation using the Heaviside step functions. The deformation equations are presented as well. They are written taking into account the virtual displacement of a claw in two orthogonal directions. The expressions allow to pass from calculation of washer claws and a dowel to determination the total bearing capacity and joint stiffness. The possibility of plastification due to the changes in boundary conditions is considered for adequate simulation of connection components behavior upon reaching the plastic stage. The article provides a methodology for determining the theoretical displacements and linear stiffness of a connection. The equations are calculated using dependences available from experiments. In the course of solving the equations, it is possible to determine the values of linear stiffness. These values are compared with the experimental data received earlier to assess the adequacy of the obtained solutions. The distribution of theoretical and experimental data have an average convergence of 91 %, which confirms the validity of the presented methodology for determining the stiffness of dowel connections in LVL with claw washers. The proposed methodology can be recommended for more precise calculation of wooden structures in strength and stiffness, which will reduce their material consumption and enhance reliability.

For citation: Chernykh A.G., Danilov E.V., Koval P.S. Stiffness Analysis of Connections of LVL Structures with Claw Washers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 157–167. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167

Keywords: claw washers, LVL, wooden structures, stiffness, connections.

Поступила 30.08.19 / Received on August 30, 2019



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.16.022.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-168-177

**ПРИМЕНЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ЩЕЛОЧЕНИЯ
В ПРОЦЕССЕ ОТБЕЛКИ
ЛИСТВЕННОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ***Т.А. Королева^{1,2}, канд. техн. наук, доц.;**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-5864>**Л.А. Миловидова¹, канд. техн. наук, вед. инж.**Г.В. Комарова¹, канд. хим. наук, доц.;* *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-7374>**А.А. Дряхлицин¹, магистр**В.В. Медведев¹, магистрант**В.Г. Мосеев³, начальник производства целлюлозы*¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: t.koroleva@narfu.ru, l.milovidova@narfu.ru, g.v.komarova@narfu.ru²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: t.koroleva@narfu.ru³АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская область, Россия, 164900; e-mail: moseev.vadim@apbm.ru

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности для отбели целлюлозы используют диоксид хлора, кислород, пероксид водорода. Цель исследования – анализ влияния условий окислительного щелочения с добавками кислорода и пероксида водорода на процесс отбели лиственной сульфатной целлюлозы по технологии ЕСФ. Приведены результаты эксперимента по оценке эффективности воздействия кислорода и пероксида водорода на ступени окислительного щелочения применительно к условиям, действующим на российских целлюлозно-бумажных предприятиях в схеме отбели лиственной сульфатной целлюлозы: Д₀–Щ (ЩО, ЩП, ЩОП)–Д₁–Д₂ (Д – обработка диоксидом хлора; Щ – обработка щелочью (с кислородом, с пероксидом водорода, с кислородом и пероксидом водорода)). Оценка полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о недостаточной эффективности использования кислорода на ступени щелочения в процессе отбели целлюлозы при обработке массы под давлением 0,2 МПа. Максимальное снижение числа каппа лиственной сульфатной целлюлозы и сокращение расхода диоксида хлора в ходе доделки позволяет обеспечить ступень окислительного щелочения с добавкой пероксида водорода в количестве 3,0 кг/т. Для схемы Д₀–ЩП–Д₁–Д₂ добавление 1,0 кг/т пероксида водорода сокращает расход диоксида хлора на доделку до 2,7 кг/т.

Для цитирования: Королева Т.А., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Дряхлицин А.А., Медведев В.В., Мосеев В.Г. Применение окислительного щелочения в процессе отбели лиственной сульфатной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 168–177. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-168-177

Финансирование: При выполнении исследования было использовано оборудование Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова), созданного при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Ключевые слова: отбелка целлюлозы, технология ECF, лиственная сульфатная целлюлоза, окислительное щелочение, степень делигнификации целлюлозы, яркость целлюлозы.

Введение

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, начиная с 90-х гг., для отбелки целлюлозы используют диоксид хлора, кислород, пероксид водорода [12, 16]. Применение этих химикатов и современной технологии отбелки ECF позволяет получать беленую целлюлозу по укороченной 3–4-ступенчатой схеме.

Переход от классической 5–6-ступенчатой схемы отбелки целлюлозы к 3–4-ступенчатой схеме позволяет увеличить объем производства беленой целлюлозы, снизить потребление пара, электроэнергии, свежей воды и сброс сточных вод [7]. Кроме того, сокращение числа ступеней отбелки целлюлозы сопровождается ужесточением условий их проведения – повышением расхода белящих реагентов, температуры и продолжительности, что в итоге обеспечивает увеличение скоростей химических реакций.

Для повышения эффективности щелочения и снижения расхода диоксида хлора на добелку на ступени щелочения используют добавки окислителей (газообразного кислорода), раствора пероксида водорода [14, 16], которые требуют различных условий проведения процесса.

Первые попытки добавить окислители на ступень щелочного экстрагирования были сделаны более 20 лет назад. На начальном этапе было исследовано влияние расхода реагентов (диоксида хлора и гидроксида натрия) на ступенях D_0 – $Щ_1$, а также продолжительности обработки на ступени $Щ_1$ на эффективность делигнификации целлюлозы (рис. 1, а, б) [19]. Расход ClO_2 оценивали по величине фактора каппа (KF), под которым понимается отношение расхода ClO_2 в ед. акт. Cl_2 в процентах от абсолютно-сухой массы к числу каппа небеленой целлюлозы.

Результаты исследования показали, что pH на ступени щелочения должен быть более 10 и расход щелочи для различных значений должен составлять 50...60 % от расхода диоксида хлора на ступени D_0 , или 20...25 кг/т (рис. 1, а). Рекомендуемая продолжительность ступени щелочения в исследуемом интервале температур (20...80 °C) – 60...120 мин (рис. 1, б).

Далее на ступень щелочения при расходе щелочи 20...25 кг/т были добавлены кислород и пероксид водорода, которые обеспечили достижение следующих результатов [19]: добавка 5 кг/т кислорода позволяет сократить расход активного хлора на добелку целлюлозы до 3 кг/т, а добавка 1 кг/т пероксида водорода – до 2 кг/т.

Современные производственные и экспериментальные данные показали, что увеличение расхода щелочи на ступени щелочной экстракции более 10...15 кг/т не влияет на эффективность обработки, оптимальные значения температуры и продолжительности обработки составляют 70...80 °C и 80...120 мин соответственно. Как правило, на целлюлозно-бумажных предприятиях в схемах ECF и TCF используется вариант щелочения с добавкой кислорода и пероксида водорода (ЩОП).

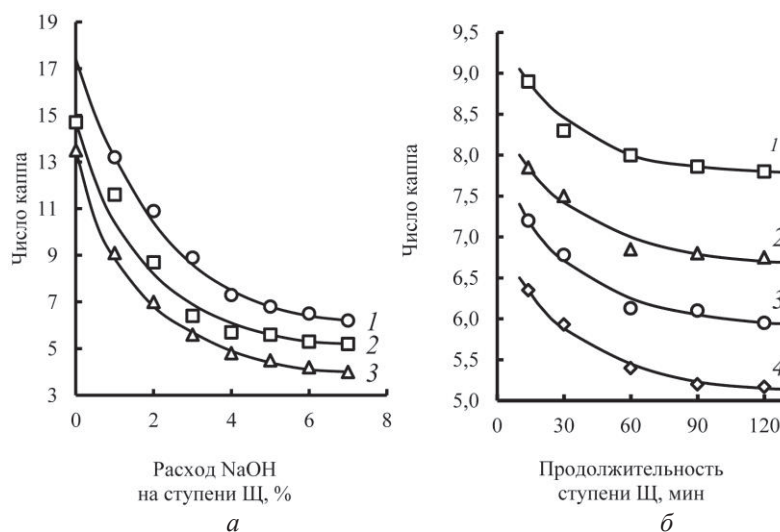


Рис. 1. Влияние расхода диоксида хлора и условий щелочения в схеме отбелки Д₀-Щ на эффективность делигнификации целлюлозы [19]: *a* – влияние расхода диоксида хлора на ступени Д₀ и гидроксида натрия на ступени Щ на снижение числа каппа (KF: 0,19 (1); 0,21 (2); 0,24 (3)); *б* – влияние продолжительности и температуры на ступени Щ на число каппа целлюлозы (температура обработки, °C: 20 (1); 40 (2); 60 (3); 80 (4))

Fig. 1. The effect of chlorine dioxide consumption and conditions of alkali treatment in the D₀-E bleaching scheme on the efficiency of pulp delignification [19]: *a* – the effect of chlorine dioxide consumption on the D₀ stage and sodium hydroxide consumption on the E stage on the Kappa number reduction (Kappa Factor: 0.19 (1), 0.21 (2), 0.24 (3)); *б* – the effect of the E-stage duration and temperature on the Kappa number of pulp (treatment temperature, °C: 20 (1); 40 (2); 60 (3); 80 (4))

Для обеспечения поглощения кислорода и оптимальных условий для реакций окисления лигнина в технологической линии требуются смеситель химикатов и отбельная башня, конструкция которой обеспечивает зону повышенного давления не менее 0,2 МПа. На российских заводах для этой цели используют башни с наружной или внутренней поглотительной колонкой, продолжительность пребывания массы в которых составляет 15...20 мин. Современным вариантом проведения окислительного щелочения является щелочение в башнях с движением массы снизу вверх, в которых продолжительность нахождения массы под давлением составляет 1 ч и более.

Информации в российских и зарубежных источниках о результатах сравнительного влияния использования кислорода и пероксида водорода на ступени окислительного щелочения в производственных условиях при различной продолжительности нахождения массы под давлением не обнаружено.

Цель исследования – анализ влияния условий окислительного щелочения с добавками кислорода и пероксида водорода на процесс отбелки лиственной сульфатной целлюлозы по технологии ECF.

Объекты и методы исследования

Для получения небеленой лиственной целлюлозы была проведена лабораторная варка производственной щепы, содержащей 70,0 % березы и 30,0 % [2] осины, с последующей кислородно-щелочной обработкой (КЩО). Включение КЩО позволяет осуществлять варку целлюлозы до более высокого значения числа каппа лиственной целлюлозы (19...20 ед.) [5, 6]. Кроме того, применение КЩО в технологическом потоке обеспечивает дополнительное удаление экстрактивных веществ [4, 10]. Использование отработанного щелока от ступени КЩО в цикле промывки небеленой целлюлозы и далее в процессе регенерации черного щелока приводит к существенному снижению сброса химического потребления кислорода (ХПК) со сточными водами варочно-отбельного участка производства беленой целлюлозы [3, 15, 18].

Варку древесины производили на установке CRS 420, имеющей 8 вращающихся автоклавов вместимостью 1200 мл. Установка имеет следующие системы: контроля и регулирования температуры с точностью ± 1 °C; регулирования давления с точностью $\pm 0,3$ МПа; расчета Н-фактора. По окончании варки автоклавы быстро охлаждали водой.

Условия варки: гидромодуль – 3; расход активной щелочи – 17,5 %. Температурный режим соответствовал условиям варки в котле Камюр. При общей продолжительности варки 48 мин, температура поддерживалась на уровне 154 °C в течение 15 мин и 160 °C в течение 33 мин, что соответствовало условиям варки в верхней и нижней варочных зонах котла.

Полученный образец небеленой лиственной целлюлозы имел следующие характеристики: выход сортированной целлюлозы – 52,0 %; число каппа – 19...20 ед. [20]; вязкость – 1180 мл/г [9].

Далее была проведена КЩО по условиям технологии Оху Трас на установке CRS 1030, оборудование которой позволяет выдерживать заданные значения температуры и давления с отклонениями ± 1 °C и $\pm 0,3$ МПа соответственно и автоматически осуществлять контроль продолжительности, температуры, давления. Реактор установки оснащен перемешивающим устройством, число оборотов которого варьируется в интервале 300...3000 об/мин, что позволяет моделировать условия смешения массы с газообразными реагентами в смесителях типа МС. Максимальная скорость нагрева массы в реакторе 2 °C в мин.

Условия проведения КЩО представлены в табл. 1, показатели лиственной сульфатной целлюлозы после КЩО – в табл. 2.

Таблица 1

Условия проведения кислородно-щелочной обработки

Показатель	Значение на ступени	
	1	2
Давление O ₂ , МПа	0,7	0,4
Температура, °C	80	95
Продолжительность, мин	30	60
Концентрация массы, %	10	10
pH _{кон}	–	12

Примечание. Общий расход NaOH на обе ступени составляет 20 кг/т.

Таблица 2

Показатели лиственной сульфатной целлюлозы после КЩО

Показатель	Значение
Число каппа	13,0
Выход, %	97,5
Химические потери, %	2,5
Вязкость, мл/г	1080
Эффективность делигнификации, %	37,2

Результаты исследования и их обсуждение

В дальнейшем использовали образцы целлюлозы после КЩО с числом каппа 13,0–15,0 ед. Образцы были отбелены по схеме с различными вариантами окислительного щелочения: Д₀–Щ (ЩО, ЩП, ЩОП) –Д₁–Д₂. На начальном этапе было определено оптимальное значение КФ на ступени Д₀, которое составило 0,30 (39...45 кг в ед. Cl₂/т).

Далее было проведено исследование влияния различных вариантов окислительного щелочения (ЩО/ЩП/ЩОП) на снижение числа каппа, яркость целлюлозы и расход белящих реагентов на установке CRS 1030 (табл. 3, 4).

Таблица 3

Условия окислительного щелочения Щ/ЩП/ЩОП лиственной сульфатной целлюлозы

Показатель	Значение
Расход щелочи, кг/т	15
Общая продолжительность обработки, мин	60
Концентрация массы, %	10
Температура, °С	70
pH _{кон}	11,0...11,5

Примечание. Продолжительность обработки под давлением 20 мин.

Таблица 4

Условия окислительного щелочения Щ/ЩП/ЩОП и показатели лиственной целлюлозы после щелочения

Показатель	Способ щелочения					
	Щ	ЩО	ЩП	ЩОП		
Расход H ₂ O ₂ , кг/т	–	–	3	1	3	5
Давление O ₂ , МПа	–	0,2	–	0,2	0,2	0,2
Остаточное содержание H ₂ O ₂ , кг/т	–	–	1,5	0,5	1,5	2,5
Число каппа, ед.:						
после Д ₀	3,9	4,7	4,2	4,1	4,2	4,7
после окислительного щелочения	3,0	3,5	2,8	3,1	2,8	3,4
Эффективность делигнификации на ступени щелочения, %	23,0	25,5	33,3	23,4	33,3	27,7
Вязкость, мл/г	1000	990	950	1080	950	940
Яркость, %	75,6	78,0	87,0	78,0	87,0	86,0

Как видно из табл. 4, добавка кислорода на щелочение практически не влияет на снижение числа каппа целлюлозы. Положительное влияние добавки кислорода оказало только на повышение яркости целлюлозы, определенной по методу [8]. По сравнению с обычным щелочением яркость увеличилась на 2,4 % (табл. 4).

Добавка пероксида водорода на щелочение (ЩП) в количестве 3 кг/т обеспечила незначительное повышение эффективности делигнификации целлюлозы (на 10,3 %) и существенно увеличила ее яркость (на 11,4 %). Такой же результат был получен для варианта ЩОП при расходе пероксида водорода 3 кг/т, т. е. в этом варианте присутствие кислорода не повлияло на результат.

Влияние количества добавленного пероксида водорода было изучено при следующих расходах: 1 и 5 кг/т. Добавка пероксида водорода в количестве 1 кг/т для варианта ЩОП по сравнению с контрольной щелочной обработкой не повлияла на снижение числа каппа целлюлозы, но, как и в случае с обработкой ЩО, она привела к увеличению яркости целлюлозы на 2,4 %. Добавка пероксида водорода 5 кг/т по сравнению с 3 кг/т не обеспечила дополнительного прироста яркости целлюлозы и снижения числа каппа, что, по-видимому, обусловлено достаточно глубоким процессом окисления компонентов целлюлозы уже при расходе пероксида водорода 3 кг/т.

Для всех вариантов окислительного щелочения значение числа каппа полученных образцов целлюлозы было близким к 3 ед. Такое значение числа каппа целлюлозы после ступеней делигнификации (D_0 –Щ) в схеме отбелки обеспечивает достаточный уровень вязкости и, соответственно, механической прочности блененной целлюлозы.

На заключительном этапе эксперимента все образцы целлюлозы были добелены диоксидом хлора в две ступени D_1 – D_2 до конечной яркости целлюлозы 89...90 %. Условия проведения ступеней отбелки целлюлозы по схеме D_0 –Щ (ЩО, ЩП, ЩОП)– D_1 – D_2 представлены в табл. 5, показатели блененной целлюлозы – в табл. 6.

Таблица 5

Условия ступеней отбелки лиственной сульфатной целлюлозы по схеме D_0 –Щ (ЩО, ЩП, ЩОП)– D_1 – D_2

Показатель	Степень отбелки			
	D_0	Щ	D_1	D_2
Температура, °С	70	70	70	70
Продолжительность, мин	60	80	160	160
Концентрация, %	8	10	8	8
$pH_{\text{кон}}$	2,5	11,5	4,5	4,5

Таблица 6

Условия щелочения и показатели блененной лиственной сульфатной целлюлозы

Показатель	Способ щелочения					
	Щ	ЩО	ЩП	ЩОП		
Расход:						
H_2O_2 , кг/т	–	–	3	1	3	5
ClO_2 , кг в ед. акт. Cl_2 / ед. каппа	4,9	3,9	3,6	3,4	3,5	3,5
Давление O_2 , МПа	–	0,2	–	0,2	0,2	0,2
Яркость [8], %	89,7	89,9	89,5	89,0	90,0	89,0
Вязкость, мл/г	1000	960	1000	1000	930	950

Как следует из представленных в табл. 5, 6 данных, добавки окислителя на ступени щелочения положительно влияют на сокращение расхода диоксида хлора. Расход диоксида хлора в контрольной отбелке (вариант Щ) составил 4,9 кг на ед. каппа. При обработке ЩО суммарный расход диоксида хлора в ед. акт. Cl_2 сократился на 1 кг/ед. каппа, или (в данном случае) на 13 кг/т. Для обработок ЩП и ЩОП получен более высокий результат: расход диоксида хлора в ед. акт. Cl_2 сократился на 1,3 кг/ед. каппа, или на 17 кг/т.

При отбелке образца целлюлозы по варианту ЩОП и расходе пероксида водорода 3 кг/т достигнут практически такой же уровень яркости целлюлозы – 90,0 %. Обработка целлюлозы на ступени ЩП при таком же расходе пероксида водорода (3 кг/т) обеспечила конечную яркость целлюлозы 89,5 %. Одинаковая эффективность обработок по снижению числа каппа целлюлозы и сокращению расхода ClO_2 при обработках ЩП и ЩОП и расходе 3 кг/т показывает, что добавка кислорода на ступени ЩОП может быть исключена.

Все образцы беленой целлюлозы имели высокие значения вязкости и, соответственно, высокие показатели механической прочности [1, 11, 17]. Кроме того, высокий уровень вязкости целлюлозы свидетельствует о хорошей степени избирательности воздействия кислорода и пероксида водорода на ступени окислительного щелочения.

Было сделано предположение, что недостаточный эффект воздействия кислорода обусловлен коротким временем нахождения массы под давлением (20 мин). Поэтому дополнительно был проведен эксперимент по влиянию увеличения продолжительности нахождения массы под давлением 0,2 МПа до 60 мин.

Для эксперимента был использован образец небеленой целлюлозы с числом каппа 17,5, который также был отбелен по схеме КЩО–Д₀–ЩОП. После КЩО число каппа составляло 11,4 ед.; на ступени Д₀ – $\text{KF} = 0,24$ (расход диоксида хлора в ед. акт. Cl_2 – 2,74 %, или 27,4 кг/т) (табл. 7).

Таблица 7

**Условия окислительного щелочения
и показатели лиственной сульфатной целлюлозы**

Показатель	Вариант	
	1	2
Общая продолжительность обработки, мин	60	60
Продолжительность нахождения массы под давлением 0,2 МПа, мин	20	60
Расход, кг/т:		
H_2O_2	3	3
NaOH	15	15
Число каппа, ед.:		
после Д ₀	5,00	5,14
после окислительного щелочения	3,60	3,66
Эффективность делигнификации на ступени щелочения, %	27,4	28,8
Яркость [8], %	79,1	79,3

Как видно из табл. 7, увеличение продолжительности обработки массы под давлением до 60 мин на ступени ЩОП не приводит к повышению эффек-

тивности делигнификации и яркости целлюлозы, так как давление кислорода 0,2 МПа не обеспечивает требуемую концентрацию кислорода в системе.

Заключение

Таким образом, при оценке полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о недостаточной эффективности использования кислорода на ступени щелочения в процессе отбелки целлюлозы при обработке массы под давлением 0,2 МПа. Максимальное снижение числа каппа лиственной сульфатной целлюлозы и сокращение расхода ClO_2 при добелке позволяют обеспечить ступень окислительного щелочения с добавкой пероксида водорода в количестве 3 кг/т. Для схем отбелки Д₀–ЩП–Д₁–Д₂ пероксид водорода в количестве 1 кг/т дает возможность сократить расход ClO_2 на добелку до 2,7 кг в ед. акт. Cl_2 /т. Кроме того, обработка ЩП не требует установки дополнительного смесителя и может проводиться практически во всех башнях, предназначенных для отбелки целлюлозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карманова Т.Е., Миловидова Л.А., Комаров В.И. Взаимосвязь вязкости с прочностными и деформационными свойствами лиственной и хвойной целлюлозы. Ч. 1. Взаимосвязь вязкости сульфатной лиственной целлюлозы с прочностными характеристиками // Целлюлоза, бумага, картон. 2015. № 1. С. 174–182. [Karmanova T.E., Milovidova L.A., Komarov V.I. Correlation between Viscosity and Stress-Strain Behavior of Hardwood and Softwood Pulp. Part 1. Correlation between Viscosity of Sulfate Hardwood Pulp and Strength Performance. *Tsellyuloza, bumaga, karton*, 2015, no. 1, pp. 174–182].
2. Миловидова Л.А., Королева Т.А., Романов М.Е., Окулова Е.О. Особенности производства беленой лиственной сульфатной целлюлозы при использовании в качестве древесного сырья березы и осины в соотношении 70:30 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 5. С. 174–182. [Milovidova L.A., Koroleva T.A., Romanov M.E., Okulova E.O. Features of the Bleached Sulfate Hardwood Pulp Production When Using the Birch and Aspen Wood Resources in the Ratio of Seventy-to-Thirty. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 5, pp. 174–182]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.5.174](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.5.174), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/083/milovidova.pdf>
3. Ali M., Sreekrishnan T.R. Aquatic Toxicity from Pulp and Paper Mill Effluents: A Review. *Advances in Environmental Research*, 2001, vol. 5, iss. 2, pp. 175–196. DOI: [10.1016/S1093-0191\(00\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00055-1)
4. Allen L., Schofield M., Faubert M., Bouchard J. Improved Deresination during Oxygen Delignification. Part II: Effects of Blended Surfactant Addition. *Pulp & Paper Canada*, 2005, vol. 106(2), pp. 41–43.
5. Fossum G., Lindqvist B., Persson L.E., Final Bleaching of Kraft Pulps Delignified to Low Kappa Number by Oxygen Bleaching. *TAPPI Journal*, 1983, vol. 66, no. 12, pp. 60–62.
6. Hart P.W., Colson G.W., Antonsson S., Hjort A. Impact of Impregnation on High Kappa Number Hardwood Pulps. *BioResources*, 2011, vol. 6, iss. 4, pp. 5139–5150.
7. Hart P.W., Santos R.B. Kraft ECF Pulp Bleaching: A Review of the Development and Use of Techno-Economic Models to Optimize Cost, Performance, and Justify Capital Expenditures. *TAPPI Journal*, 2013, vol. 12, no. 10, pp. 19–29.
8. ISO 2470:1999. *Paper, Board and Pulps – Measurement of Diffuse Blue Reflectance Factor (ISO Brightness)*. ISO/TC 6 Paper, Board and Pulps, 1999. 9 p.
9. ISO 5351:2010. *Pulps – Determination of Limiting Viscosity Number in Cupri-Ethylenediamine (CED) Solution*. ISO/TC 6 Paper, Board and Pulp, 2010. 19 p.

10. Jansson M.B., Wormald P., Dahlman O., Reactions of Wood Extractives during ECF and TCF Bleaching of Kraft Pulp. *Pulp & Paper Canada*, 1995, vol. 96, iss. 4, pp. 42–45.
11. Lapierre L., Bouchard J., Berry R. The Relationship Found between Fibre Length and Viscosity of Three Different Commercial Kraft Pulps. *Holzforschung*, 2009, vol. 63, iss. 4, pp. 402–407. DOI: [10.1515/HF.2009.072](https://doi.org/10.1515/HF.2009.072)
12. Lee C.-L., Hunt K., Murray R.W. Activated Oxygen, a Selective Bleaching Agent for Chemical Pulps. Part I: Laboratory Bleaching with Isolated and In-Situ-Generated Activated Oxygen. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1994, vol. 20, no. 5, pp. J125–J130.
13. Lin B., He B., Liu Y., Ma L. Correlation Analysis for Fiber Characteristics and Strength Properties of Softwood Kraft Pulps from Different Stages of a Bleaching Fiber Line. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 5024–5033.
14. Lindholm C.-A. Alkaline Extraction of Ozone Bleached Pulp. IV: Comparison of E, (EB), (EO), (EP) and (EOP) Treatment. *Journal Pulp and Paper Science*, 1993, vol. 19, no. 3, pp. J108–J113.
15. Lindstrom L.A., Norden S. Efficient Postoxygen Washing – Crucial for Low Bleach-Plant Emissions. *Appita Journal*, 1990, vol. 43, no. 5, pp. 373–376.
16. Liskovic N., Kules M. Cellulose Peroxide Bleaching with a New Activator. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1992, vol. 26, iss. 4, pp. 437–441.
17. Oglesby R.J., Moynihan H.J., Santos R.B., Ghosh A., Hart P.W. Does Kraft Hardwood and Softwood Pulp Viscosity Correlate to Paper Properties? *TAPPI Journal*, 2016, vol. 15, no. 10, pp. 643–651. DOI: [10.32964/TJ15.10.643](https://doi.org/10.32964/TJ15.10.643)
18. Parthasarathy V.R. Entrained Black Liquor Solids and Viscosity Selectivity in Oxygen Delignification Reinforced Hydrogen Peroxide. *TAPPI Journal*, 1990, vol. 73, iss. 9, pp. 243–247.
19. *Pulp and Paper Manufacture. Vol. 5. Alkaline Pulping*. Ed. by T.M. Grace, E.W. Malcolm, M.J. Kocurek. Atlanta, GA, TAPPI Press, 1989. 637 p.
20. *T 236 om-99. Kappa Number of Pulp*. Approved by the Pulp Properties Committee of the Process and Product Quality Division. TAPPI, 1999. 4 p. Available at: <https://research.cnr.ncsu.edu/wpsanalytical/documents/T236.PDF> (accessed 25.03.20).

THE USE OF OXIDATIVE ALKALI TREATMENT FOR SULPHATE HARDWOOD PULP BLEACHING

T.A. Koroleva^{1,2}, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-5864>

L.A. Milovidova¹, Candidate of Engineering, Leading Engineer

G.V. Komarova¹, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-7374>

A.A. Dryakhlitsyn¹, Master

V.V. Medvedev¹, Master

V.G. Moseev³, Head of Pulp Production

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: t.koroleva@narfu.ru, l.milovidova@narfu.ru, g.v.komarova@narfu.ru

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: t.koroleva@narfu.ru

³Arkhangelsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk Region, 164900, Russian Federation; e-mail: moseev.vadim@apppm.ru

Pulp and paper plants use chlorine dioxide, oxygen, and hydrogen peroxide for pulp bleaching. The paper aims at analyzing the effect of oxidative alkali treatment with the addition of oxygen and hydrogen peroxide on hardwood sulphate pulp bleaching using ECF technology.

The results of an experiment in assessing the performance of oxygen and hydrogen peroxide in alkali treatment are presented in relation to the conditions prevailing at the Russian plants. The scheme of hardwood pulp bleaching was as follows: D_0 –E (EO, EP, EOP)– D_1 – D_2 ; where D – chlorine dioxide treatment, E – alkali treatment (with oxygen, with hydrogen peroxide, and with oxygen and hydrogen peroxide). Evaluation of the experimental findings allows to conclude that the oxygen utilization at the alkali stage is insufficient in pulp bleaching under a pressure of 0.2 MPa. The maximum reduction in the amount of kappa sulfate pulp and a decrease in the consumption of chlorine dioxide at the final bleaching is provided by oxidative alkaline treatment with the addition of hydrogen peroxide with a flow rate of 3.0 kg/t. For the D_0 –EOP– D_1 – D_2 scheme, the addition of 1.0 kg/t of hydrogen peroxide reduces the consumption of chlorine dioxide at the stages of the final bleaching of pulp to 2.7 kg/t.

For citation: Koroleva T.A., Milovidova L.A., Komarova G.V., Dryakhlitsyn A.A., Medvedev V.V., Moseev V.G. The Use of Oxidative Alkali Treatment for Sulphate Hardwood Pulp Bleaching. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 168–177. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-168-177

Funding: The equipment of the Innovative Facilities Engineering and Innovation Center “Advanced Northern Bioresources Processing Technologies (Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov) was used during the research. The center was founded with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Keywords: pulp bleaching, ECF technology, sulphate hardwood pulp, oxidative alkali treatment, pulping degree, pulp brightness.

Поступила 25.09.19 / Received on September 25, 2019



UDC 624.011.2+674.028.3/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189

**CONTACT INTERACTION OF A CLAW WASHER WITH WOOD
AT LIMITING SHEAR****E.V. Popov¹, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8950-7558>****A.V. Ruslanova¹, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>****V.V. Sopilov¹, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1236-5950>****N. Zdravovic², Chief Engineer, Coordinator of Projects;****ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-5130>****S.M. Mamedov³, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;****ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-1085>****B.V. Labudin¹, Doctor of Engineering, Prof.;****ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2547-3096>**¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: EPV1989@yandex.ru, sopilov.v@edu.narfu.ru, kalipso64@gmail.com, sevned@mail.ru²Fylkesmannen i Troms og Finnmark, Statens hus, Vadsø, Troms og Finnmark County, 9811, Norway; e-mail: fmfinzd@fylkesmannen.no³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: mamedov_am@bk.ru

When designing, manufacturing and maintaining of woodworks and elements of wooden structures it is necessary to solve the problem of providing the calculation of strength, stiffness and their bearing capacity. This problem becomes particularly relevant while reconstructing and new wooden house building, as the correct choice of connection type influences the technical possibility to use wood in the elements of structures. Such types of special connectors as claw washers, gang nails, dowel connections, etc. are used for these purposes. The existing range of claw washers implies different diameters, thicknesses, and claw configurations depending on the required bearing capacity and cross-sectional dimensions of sawn timber. The accepted physical model of wood is a transtropic body. The forces transmitted in the joints of the elements of wooden structures are perceived by the total contact surface of the mating elements. However, the work of individual teeth of claw washers has been poorly studied: research on influence of geometrical characteristics of the tooth on the bearing capacity of the connector is absent; variation in thickness of the connector is not assessed. A double-sided claw washer of the Bulldog type (prototype) with the diameter of 50 mm was adopted as the object of study. Various schemes of cutting of the claw washer with predetermined dimensions (width and height) of a triangular tooth are considered. The influence of dimensions on the bearing capacity of the thickness of claw washers is estimated within 1–1.5 mm. The main criterion for the selected cutting patterns is the ability to produce the washers by single-impact stamping without additional trimming. Double-sided claw washers of 5 different types with the number of cog-teeth from 8 to 12 items on each side were studied. A differential equation of the 4th order is accepted as a mathematical model of cog-tooth action. The equation describes the behavior of a dowel on an elastic base with a fixed value of bending stiffness EI . The transition to which was carried out from the variable value $EI = f(x)$ by searching for the equivalent width of the cross-section from the bending conditions of the element of the triangular section of a variable directed normal to the frontal surface and a constant directed normal to the lateral surface.

For citation: Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdravlovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V. Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 178–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189

Keywords: wood, wooden structures, anisotropy of wood, strength, deformability, claw washers, gang nails.

Introduction

Wood is a self-renewing natural resource with special strength, technological and anisotropic properties, which must be taken into account when designing and calculating of the connectors. The most responsible issue is the interaction of wood and the connectors in the contact zone. V.M. Vdovin [6], M.S. Galakhov [7], D.S. Ishmaeva [10], A. Karelskiy [11], B.V. Labudin [14, 16, 17], Xu Yun [21], E.V. Danilov and A.G. Chernykh [8], A.O. Orlov [27, 28], J.N. Karadelis and P. Brown [24], E.-M. Meghlat, M. Oudjene and H. Ait-Aider [25], H.J. Blaß and P. Schädle [22], Čechavičius R. [23] and others were engaged in designing and calculation of the connections of wooden structures with the help of metal connector plates and washers.

Various types of connections on dowels, Lennov's claw washers, glued steel corrugated gang nails, Bulldog claw washers, and others have been developed from the whole variety of joints used in wooden structures [1–3]. Such connections are used in manufacturing roof trusses, compound beams, columns and flat ribbed panels, in the amplification of wooden structures of different purposes, and also in fitting connections.

A wide variety of connectors [15] was presented and metal connector plates were considered (Fig. 1) in our research [18].

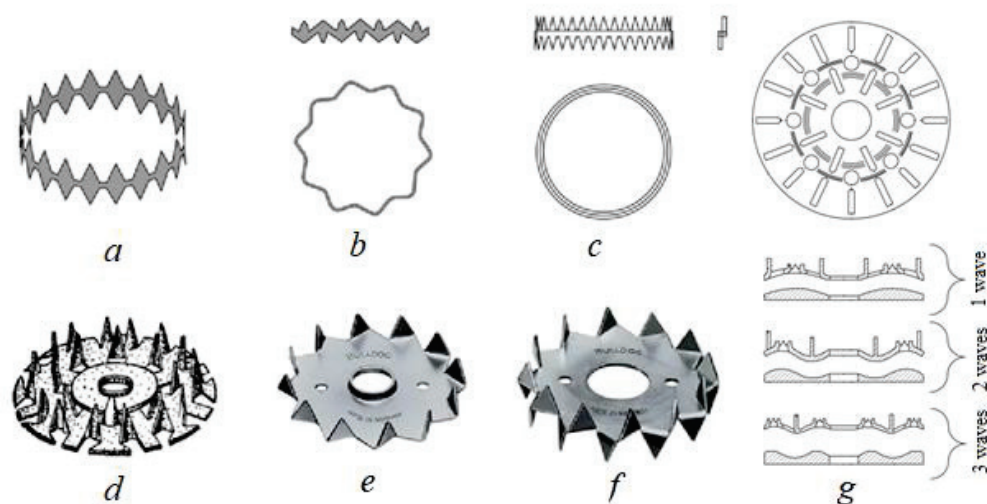


Fig. 1. Varieties of gang nails and claw washers: *a* – Alligator gang nail; *b* – Engineer Khorkov's gang nail; *c* – Kabakov's gang nail; *d* – Lennov's claw washer; *e*, *f* – Bulldog claw washers; *g* – glued steel corrugated gang nails

Bulldog claw washers consist of low-carbon steel with or without cold-rolled covering. Types of steels from DC01+C390 to EN 10139, or cold-rolled high-strength cold stamped steel from N320M to EN 10268 are used as a body material. Claw washers are round plates made of thin (from 1 to 1.2 mm) steel with triangular shaped claws bent perpendicular to the plate plane. They are made with one-sided (Fig. 1, *e*) and two-sided (Fig. 1, *f*) bending of teeth. The advantages of these claw washers include the simplicity of pressing the connection, the lack of necessity of preliminary drilling of holes, and the high bearing capacity of the connection. Bilateral Bulldog washers can be used not only in nodal connections, but also for improvement of shear stiffness of dowel connections of wooden structures [16]. The calculation of connections with these claw washers is performed according to [20].

Research objects and methods

The range of washers of the Bulldog type manufactured by the Bova-Nail company [26] is shown in Table 1.

Table 1

The range of the Bulldog claw washers

Diameter of a claw washer, mm	50	75	95
Diameter of a bolt, mm	17	23	36
Minimum pitch of washers, mm	70	110	140

A double-sided Bulldog claw washer with a diameter of 50 mm is taken as a research object. It was made of a steel plate of 50 mm diameter, 1 mm thick, in which 12 notches were cut in advance. The number of notches is equal to the number of teeth on each side of the washer; the angle between the notches is denoted by α .

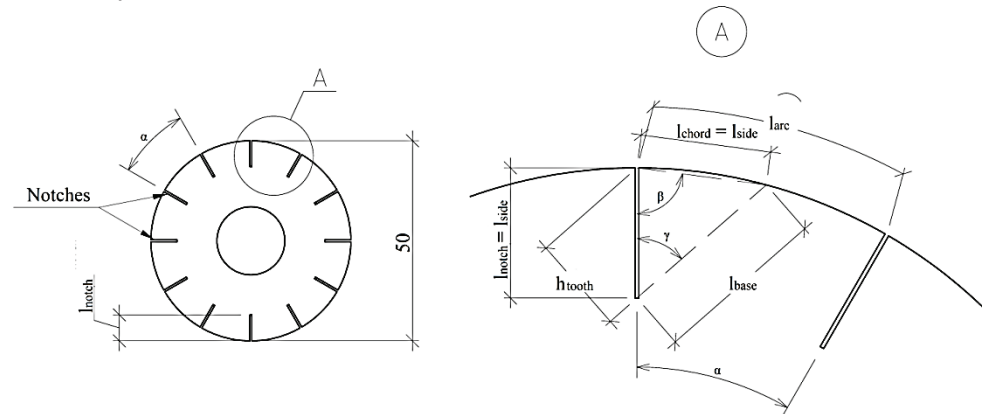


Fig. 2. Scheme of a workpiece for stamping out the Bulldog claw washer with a diameter of 50 mm and the values that determine the tooth dimensions

The notch length l_{notch} determines the value of the side of the washer tooth. The tooth height h_{tooth} equal to the product of the length of side l_{side} of a triangle to the cosine of half the angle β between the inner side of the tooth and the chord of the arc outer side of the tooth. The length of the tooth base l_{base} is equal to twice the product of the length of the side l_{side} by the cosine of the angle between the side and the base of the tooth γ .

The production efficiency of claw washers is based on the possibility of their manufacturing by single-impact stamping from a round steel workpiece, and the tooth dimensions should determine the possibility of making the washer without the need for additional undercutting, which is important for the purposes of rational material consumption.

It is necessary to consider several options of washers with different number and sizes of teeth should in order to select the rational shape of the claw washer.

While the washer is operating in the connection, it is reasonable to evenly distribute the forces along the tooth width, so that the tooth sides forming the angle β (Fig. 2) are equal to each other. Therefore, the reference length of the notch for subsequent stamping should be determined by the following:

$$l_{chord} = 2R \sin\left(\frac{\alpha}{4}\right), \quad (1)$$

where l_{chord} – chord length, mm; R – radius of the round plate of which the washer is stamped, mm; α – angle between the notches, determined by the expression:

$$\alpha = \frac{360}{n},$$

where n – number of notches (teeth).

We obtain an expression that determines the required length of the notch for a given number of teeth taking into account the necessity of equality of the tooth sides, and therefore the equality of the length of the notch and the chord of the half of the arc:

$$l_{notch} = 2R \sin\left(\frac{360}{4n}\right). \quad (2)$$

The small size of teeth, when wood shrinks, leads to their extraction from the contact zone, which greatly reduces the connection strength in moist timber [13]; this is a significant drawback of claw washers. Therefore, it is advisable to consider options of washer design with increased dimensions of teeth, which implies the need to reduce their total number.

The notch depth at a predetermined number of teeth is determined by the equation (2):

$$n = 8: \quad l_{notch} = 9.8 \text{ mm}; \quad h_{tooth} = 7.5 \text{ mm}; \quad b_{base} = 12.4 \text{ mm};$$

$$n = 9: \quad l_{notch} = 8.7 \text{ mm}; \quad h_{tooth} = 6.7 \text{ mm}; \quad b_{base} = 11.2 \text{ mm};$$

$$n = 10: \quad l_{notch} = 7.8 \text{ mm}; \quad h_{tooth} = 6.0 \text{ mm}; \quad b_{base} = 10.1 \text{ mm};$$

$$n = 11: \quad l_{notch} = 7.1 \text{ mm}; \quad h_{tooth} = 5.4 \text{ mm}; \quad b_{base} = 9.3 \text{ mm};$$

$$n = 12: \quad l_{notch} = 6.5 \text{ mm}; \quad h_{tooth} = 4.9 \text{ mm}; \quad b_{base} = 8.6 \text{ mm}.$$

Claw washer options are shown in Fig. 3.

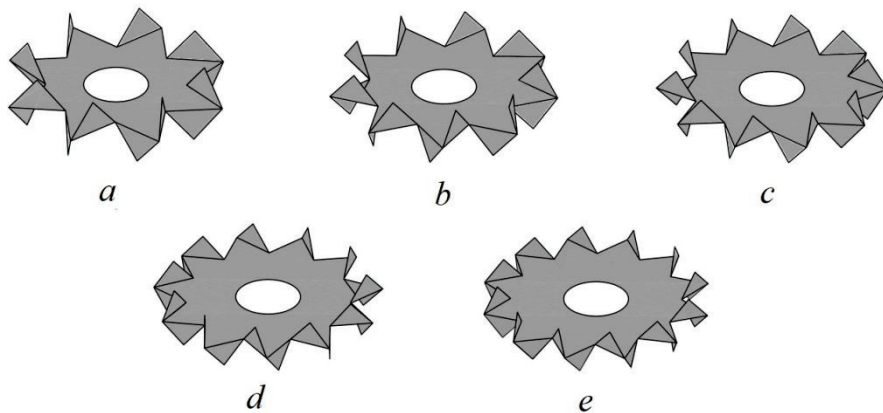


Fig. 3. Options of claw washers with a different number of teeth n , pcs: $a - 8$; $b - 9$; $c - 10$; $d - 11$; $e - 12$ (standard washer)

Calculation of a tooth is performed as for a cantilever beam on an elastically deformable base. This assumption is valid under the action of short-term loading and small deformations, when the maximum allowable value for the connections is limited by the requirements of the Code of Practice [19]. Considering the claw material to be elastic and neglecting the influence of lateral forces on deformation and torsion, adopting the hypothesis of flat sections, we accept the Bernoulli's assumption and write the differential equation of the tooth elastic axis as a fixed beam lying on an elastically deformable base [8]:

$$EI(x)y(x)^{IV} + Cy(x) = 0, \quad (3)$$

where C – short-term bedding value of the base length at an angle to the fibers γ .

To solve equation (3), with a cross-sectional moment of inertia variable in height, we introduce the constant equivalent value $EI(x) = \text{const}$ from the condition that the tip moves under the lateral load on the claw. When bending a claw from a plane under the action of a variable load $q(x)$, an equivalent width $b_{eq} = 0.8b$ is obtained, where b_{base} – width of the tooth base. Since the task of calculating the equivalent width when bending the claw with load $q = \text{const}$ in its plane does not have an analytical solution, the values of the equivalent width were selected numerically by approximating the moment of inertia by a replacement function for each option. They are: $b_{eq} = 0.011; 0.009; 0.008; 0.0074; 0.0068$ with the number of claws $n = 8, 9, 10, 11, 12$ on one side, respectively.

Equivalent bending stiffness of a tooth EI is determined by the equations (4) when bending from a plane and in a plane, respectively:

$$\begin{aligned} EI &= E_{st} \left(\frac{S^3 b_{eq}}{12} \right); \\ EI &= E_{st} \left(\frac{b_{eq}^3 S}{12} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

where E_{st} – modulus of elasticity of steel, $E_{st} = 2 \cdot 10^8$ kPa; S – thickness of a tooth, determined by the thickness of the steel plate (workpiece); b_{eq} – equivalent width.

According to [4] the solution of equation (4) $EI(x) = \text{const}$ is the following:

$$y(x) = e^{\frac{Px}{\sqrt{2}}} \left(C_1 \cos \frac{Px}{\sqrt{2}} + C_2 \sin \frac{Px}{\sqrt{2}} \right) + e^{-\frac{Px}{\sqrt{2}}} \left(C_3 \cos \frac{Px}{\sqrt{2}} + C_4 \sin \frac{Px}{\sqrt{2}} \right), \quad (5)$$

where C_1, C_2, C_3, C_4 – integration constants determined from the boundary conditions; P – expression replacement for convenience of calculation, $P = \sqrt[4]{C/EI}$.

When a claw is operating in the elastic stage (before the formation of a plastic hinge), the boundary conditions can be written as:

$$\begin{cases} x = 0 \rightarrow \frac{dy}{dx} = 0 \text{ и } \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{N}{EI}; \\ x = h_{tooth} \rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} = 0 \text{ и } \frac{d^3y}{dx^3} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

where h_{tooth} – tooth height, mm.

With the following subscription $P/\sqrt{2} = A$, arbitrary integration constants can be found as follows:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{N}{8EI \cdot A^3}; \\ C_2 &= \frac{Ne^{Ah} \sin Ah - 2Ne^{-Ah} \cos Ah + Ne^{-Ah} \sin Ah}{8A^3 EI e^{Ah} \cos Ah (e^{Ah} + e^{-Ah})}; \\ C_3 &= -C_1; \\ C_4 &= -\frac{Ne^{Ah} \cos Ah + Ne^{-Ah} \sin Ah + Ne^{-Ah} \sin Ah}{8A^3 EI e^{Ah} \cos Ah (e^{Ah} + e^{-Ah})}, \end{aligned} \quad (7)$$

where N – load applied to the washer tooth, kN.

In order to describe the process of wood deformation in a dowel socket of the contact zone, we use the well-known expression:

$$y(x) = \frac{q(x)}{c}. \quad (8)$$

The total deformation of the socket wood Δ_t in the tooth base ($x = 0$) is determined by the expression:

$$\Delta_t = \int_0^h \frac{q(x)}{c} = \frac{-Q(0)}{c} = \frac{N}{c}. \quad (9)$$

When a claw is located at an angle to the vector of the applied load N ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$), proper allowance must be made for the stress components of N applied through the length and breadth of the claw plane.

We used generally accepted formula [5, 9, 19] in this study, taking into account the wood anisotropy in order to express the bedding values when bearing stress at any angle to the wood fibers γ :

$$C_\gamma^{temp} = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{C_0}{C_{90}} - 1\right) \sin^3 \gamma}, \quad (10)$$

where C_γ^{temp} – short-term coefficient of wood thickness when crushed at the γ angle to the fibers; C_0 , C_{90} – bedding values when wood bearing at an angle of $\gamma = 0^\circ$ and $\gamma = 90^\circ$ respectively, determined depending on the following dependences [12]:

$$\begin{aligned} C_0^{temp} &= (-0.14b_{cr} + 2.289)R_c; \\ C_{90}^{temp} &= (-0.094b_{cr} + 0.826)R_c, \end{aligned} \quad (11)$$

where C_0^{temp} and C_{90}^{temp} – short-term bed coefficients of wood when crushed at angles of 0° and 90° , kN/m^3 ; b_{cr} – width of the creasing side of the tooth, m; R_c – calculated resistance of wood to compression along the fibers, kPa.

The calculation is made for each washer tooth of all presented options. The criterion of strength of each tooth is the force causing the ultimate deformation of a tooth $\Delta_{ult} = 2 \text{ mm}$.

Results and discussion

Consider a single-section connection operating at longitudinal shear (Fig. 4). Conditionally, we believe that the resulting spreader impacts on a bolt, the work of which on shear along with the claw washer is not conditionally taken into account.

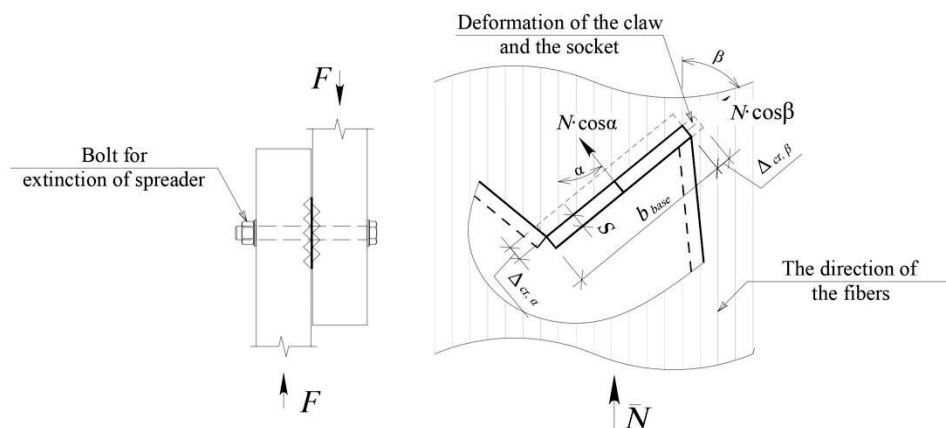


Fig. 4. Scheme of a single-section connection at longitudinal shear (on the left) and the structural design of a washer claw (on the right)

The bearing capacity of the washer is determined in the following sequence:

1. It is assumed that a single force $\bar{N} = 1$ acts on each washer claw parallel to the direction of the wood fibers.

2. The force is decomposed into components normal to the frontal and lateral surfaces of the claw, which form the angles α and β with the direction of the force $\bar{N}$ and the direction of the fibers.

3. While solving the equations (4) and (9), determine the moving direction of the claw according to the force component vector $\bar{N}$ ($\Delta_{cr,\alpha}$ and $\Delta_{cr,\beta}$ in the normal direction of the front and lateral surfaces of the claw, respectively).

4. Determine the ultimate force, taken by the claw, according to the equation:

$$N_{ult,c} = (\Delta_{ult}/\Delta_{cr,\alpha}) \cos \alpha + (\Delta_{ult}/\Delta_{cr,\beta}) \cos \beta, \quad (12)$$

where Δ_{ult} – maximum allowable displacement, $\Delta_{ult} = 2$ mm.

5. Bearing capacity of a double-sided claw washer $N_{c,w}$ is determined as the sum of the supporting abilities of all claws based on the maximum strain of the joint:

$$N_{ult,w} = 0.5 \sum N_{ult,c}, \quad (13)$$

where 0.5 – coefficient that takes into account the bearing of wood on both sides of the washer.

The calculation results are summarized in Table 2. The dependence of the bearing capacity of the washers on the thickness is shown in Fig. 5.

Table 2

The bearing capacity of the claw washers depending on the cutting pattern and the workpiece thickness

Washer cutting pattern (by the number of teeth on one side, pcs)	Bearing capacity of the washer $N_{ult,w}$, kN, depending on the thickness of a workpiece, mm					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$n = 8$	3.06	3.33	3.54	3.73	3.88	4.01
$n = 9$	3.45	3.67	3.86	4.02	4.16	4.27
$n = 10$	3.72	3.93	4.10	4.24	4.36	4.47
$n = 11$	3.81	3.99	4.16	4.31	4.43	4.54
$n = 12$	4.22	4.38	4.52	4.64	4.74	4.83

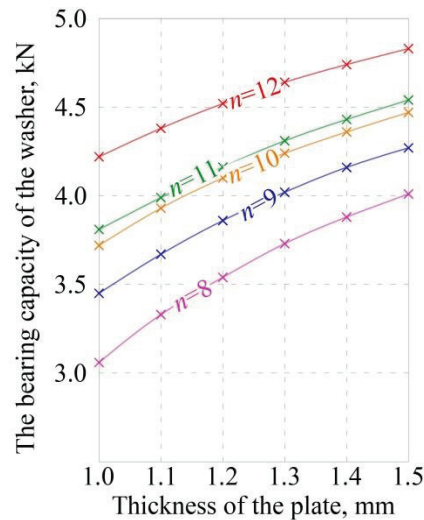


Fig. 5. Dependence of bearing capacity ($N_{ult,w}$) on thickness of the plate (t)

The bearing capacity of a claw washer $N_{ult,w}$ stamped from a plate of the same diameter can vary significantly (up to 54 %). When varying the thickness of the plate-workpiece within 1–1.5 mm, an increase of $N_{ult,w}$ varies within the limits of 15–31 %; with an increase in the total number of teeth the influence of thickness decreases.

With a total number of teeth in the range of 8–12 pcs, the increase in bearing capacity is 20–38 %, the largest difference is common for the washers stamped out of a plate 1 mm thickness.

Cutting pattern of a double-sided claw washer with 12 teeth on each side was found to be the most effective option. Considering small height of teeth ($h_{tooth} = 4.9$ mm) of the washers of this configuration, they can be recommended for use only with pre-dried timber, since the extraction of teeth from the sockets when shrinkage will adversely affect the operation of the claw connection. In wet timber, the most rational option is the claw washer with 9 tooth and 6.7 mm height.

Conclusions

1. The presented calculation procedure allows theoretical determining the bearing capacity of the connections of elements of wooden structures on the claw washers under the short-term loading, as well as determining the rational cutting parameters for one-sided and two-sided washers of arbitrary diameter.

2. The most effective cutting parameters for a double-sided claw washer made of 1–1.5 mm thick steel plate are determined according to the condition of ultimate deformation in the connection of wood elements during longitudinal shearing.

3. The effect of the diameter of a steel workpiece, the loading duration, and the species composition of the core elements of wooden structures on the bearing capacity of the washers requires additional studies.

REFERENCES

1. А. с. 26424, МПК E04B 1/49. Приспособление для соединения деревянных частей в конструкциях: заявл. 18.03.1931; опубл. 31.05.1932 / Кабаков Н.П. [Kabakov N.P. *A Device for Connecting Wooden Parts in Structures*. Certificate of Authorship USSR no. SU 26424 A1, 1932].

2. А. с. 29009, МПК E04B 1/49. Шпонка из листового металла для деревянных конструкций: заявл. 05.05.1931; опубл. 31.01.1933 / Хорьков М.М. [Khor'kov M.M. *Sheet Metal Dowel for Wooden Structures*. Certificate of Authorship USSR no. SU 29009 A1, 1933].

3. А. с. 1807185, МКИ E04B 1/38. Узловое соединение стержней деревянных несущих конструкций: № 4930924/33: заявл. 23.04.91; опубл. 07.04.93 / Б.В. Лабудин, В.Д. Попов, В.В. Яковлев, А.В. Вешняков. [Labudin B.V., Popov V.D., Yakovlev V.V., Veshnyakov A.V. *Nodal Connection of the Rods of Wooden Supporting Structures*. Certificate of Authorship USSR no. SU 1807185 A1, 1993].

4. Агафонов С.А., Герман А.Д., Муратова Т.В. Дифференциальные уравнения / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 3-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 352 с. [Agafonov S.A., German A.D., Muratova T.V. *Differential Equations*. Ed. by V.S. Zarubina, A.P. Krishchenko. Moscow, MSTU Publ., 2004. 352 p.].

5. Ашкенazi Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: справ. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с. [Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anisotropy of Structural Materials: Handbook*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 247 p.].

6. Вдовин В.М., Мухаев А.И., Арискин М.В. К оценке напряженно-деформированного состояния деревянных элементов, соединенных центровыми клееными шпонками // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 2. С. 81–90. [Vdovin V.M., Muhaev A.I., Ariskin M.V. To the Estimation of Stress-Strain State of Wooden Elements Connected by Pivot Glued Dowels. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Engineering], 2013, no. 2, pp. 81–90].
7. Галахов М.С. Соединения деревянных конструкций на клеенных кольцевых шпонках: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2002. 176 с. [Galakhov M.S. *Connections of Wooden Structures on Glued Shearing Rings*: Cand. Eng. Sci. Diss. Penza, 2002. 176 p.].
8. Данилов Е.В., Черных А.Г. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Науч. обозрение. Техн. науки. 2014. № 1. С. 133–134. [Danilov E.V., Chernykh A.G. Methods of Joinery Timber Construction with the Claw Dowels. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki* [Scientific Review. Technical science], 2014, no. 1, pp. 133–134].
9. Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1975. 529 с. [Dmitriyev P.A. *Experimental Studies of Connections of Elements of Wooden Structures on Metal and Plastic Dowels and the Theory of Their Calculation Allowing for Visco-Elastic and Plastic Deformations*: Dr. Eng. Sci. Diss. Novosibirsk, 1975. 529 p.].
10. Ишмаева Д.С. Жесткие узловые соединения на клеенных стальных шайбах в балочных структурах из клееных деревянных элементов: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 171 с. [Ishmayeva D.S. *Rigid Joint Connections on Glued Steel Washers in Beam Structures of Glued Wooden Elements*: Cand. Eng. Sci. Diss. Penza, 2014. 171 p.].
11. Карельский А.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных металлическими зубчатыми пластинами // Строительство и реконструкция. 2015. № 1(57). С. 11–16. [Karelskiy A., Labudin B., Melekhov V. Shear Test Elements of Wooden Structures, United Punched Metal Plate Fasteners. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and reconstruction], 2015, no. 1(57), pp. 11–16].
12. Крицин А.В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2004. 180 с. [Kritsin A.V. *Calculation of Open Wooden Structures on Metal Connector Plates Allowing for Visco-Elastic and Plastic Deformations*: Cand. Eng. Sci. Nizhny Novgorod, 2004. 180 p.].
13. Кузнецов Г.Ф. Деревянные конструкции. Справочник проектировщика промышленных сооружений. М.; Л.: Гл. редакция строит. лит., 1937. 955 с. [Kuznetsov G.F. *Wooden Structures. Handbook for the Designers of Industrial Facilities*. Moscow, Glavnaya redaktsiya stroitel'noy literatury Publ., 1937. 955 p.].
14. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой. Архангельск: АГТУ, 2007. 267 с. [Labudin B.V. *Improving Laminated Wood Structures with a Spatially Regular Structure*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 267 p.].
15. Леннов В.Г. Штампованные когтевые шайбы, как новый тип связей элементов деревянных конструкций // Тр. Горьк. инж.-строит. ин-та. Горький, 1949. Вып. 1. С. 169–181. [Lennov V.G. Stamped Claw Washers as a New Type of Connection of Wooden Structures Elements. *Proceedings of the Gorkovkiy Engineering and Construction Institute*. Gorky, 1949, iss. 1, pp. 169–181].
16. Попов Е.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы

Междунар. акад. чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2015. С. 189–198. [Popov E.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Shear Test of Elements of Wooden Structures Connected with the Use of Toothed Bulldog Washers. *Safety of the Building Fund of Russia. Problems and Solutions: Proceedings of the International Academic Readings*. Kursk, Kursk State University Publ., 2015, pp. 189–198].

17. Попов Е.В., Филиппов В.В., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Тюрикова Т.В. Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 4. С. 123–134. [Popov E.V., Filippov V.A., Melekhov V.I., Labudin B.V., Tyurikova T.V. Effect of Shear Connections Rigidity in Calculating the Ribbed Panels. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 4, pp. 123–134]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.4.136](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.136), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/101/popov_ispr_.pdf

18. Римишин В.И., Лабудин Б.В., Мелехов В.И., Попов Е.В., Рощина С.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестн. МГСУ. 2016. № 9. С. 35–50. [Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Popov E.V., Roshchina S.I. Dowel and Washer Connections for Elements of Wooden Structures. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 9, pp. 35–50]. DOI: [10.22227/1997-0935.2016.9.35-50](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2016.9.35-50)

19. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80 (с Изменениями № 1, 2). Введ. 28–08–2017 // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения: 15.11.19). [Code of Practice SP 64.13330.2017. *Timber Structures*. Tekhekspert: Electronic Fund of Legal and Regulatory Technical Documentation, 2017].

20. СтАДД–3.2–2011. Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб.: НП «Ассоциация деревянного домостроения», 2012. 40 с. [Association Standard of Wooden House Construction StADD–3.2–2011. *Wooden Structures. Joining Wooden Elements Using Connector Plates*. Saint Petersburg, Assotsiatsiya derevyannogo domostroyeniya Publ., 2012. 40 p.].

21. Сюй Юнь, Черных А.Г., Глухих В.Н. Моделирование и расчет несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с использованием металлической зубчатой пластины // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 4(261). С. 17–23. [Xu Yun, Chernykh A.G., Glukhikh V.N. Modeling and Calculation of the Shear Bearing Capacity of Screw on the Metal Plate with Nail Plate. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2015, no. 4(261), pp. 17–23].

22. Blaß H.J., Schädle P. Ductility Aspects of Reinforced and Non-Reinforced Timber Joints. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, iss. 11, pp. 3018–3026. DOI: [10.1016/j.engstruct.2011.02.001](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.001)

23. Čechavičius R. Slip of “Bulldog”-Type Toothed-Plate Connectors in Steel-Timber Joints of Open-Web Girders. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, vol. X, suppl. 1, pp. 23–29.

24. Karadelis J.N., Brown P. Punched Metal Plate Timber Fasteners under Fatigue Loading. *Construction and Building Materials*, 2000, vol. 14, iss. 2, pp. 99–108. DOI: [10.1016/S0950-0618\(00\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00015-5)

25. Meghlat E.-M., Oudjene M., Ait-Aider H. Load-Slip Behaviour of Timber-to-Concrete Connections Reinforced with Punched Metal Plate. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014), Quebec City, Canada, August 10–14, 2014*. Quebec, Canada, Curran Associates, Inc., 2014, pp. 813–821.

26. *Product Catalog of the Company Bova Březnice spol. s r.o.* Available at: <http://bova-nail.cz/kategorie-produktu/kovani-drevene-konstrukce/hmozdinky/> (accessed 15.11.19).

27. Rimshin V., Labudin B., Morozov V., Orlov A., Kazarian A., Kazaryan V. Calculation of Shear Stability of Conjugation of the Main Pillars with the Foundation in Wooden Frame Buildings. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*. Cham, Switzerland, Springer, 2019, vol. 2, pp. 867–876. DOI: [10.1007/978-3-030-19868-8_85](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_85)

28. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A.O., Kurbatov V.L. Improvement of Strength and Stiffness of Components of Main Struts with Foundation in Wooden Frame Buildings. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 11, pp. 3851–3856.

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОГТЕВОЙ ШАЙБЫ С ДРЕВЕСИНОЙ ОТ ПРЕДЕЛЬНОГО СДВИГА

Е.В. Попов¹, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8950-7558>

А.В. Русланова¹, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>

В.В. Сопилов¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1236-5950>

Н. Ждралович², гл. инж., координатор проектов;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-5130>

Ш.М. Мамедов³, канд. экон. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-1085>

Б.В. Лабудин¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2547-3096>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 22, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: EPV1989@yandex.ru, kalipso64@gmail.com, sopilov.v@edu.narfu.ru, sevned@mail.ru

²Правление губернии Финмарк, Государственный дом, г. Вадсё, Округ Тромс и Финмарк, Норвегия, 9811; e-mail: fmfinzd@fylkesmannen.no

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: mamedov_am@bk.ru

При проектировании, изготовлении и эксплуатации изделий из древесины и элементов деревянных конструкций необходимо решение проблемы обеспечения расчетной прочности, жесткости и их несущей способности, что актуально при реконструкции и в новом деревянном домостроении, так как от правильного выбора вида соединения зависит техническая возможность использования древесины в элементах конструкций. Для этого применяют различные типы специальных соединителей в виде когтевых шайб, кольцевых шпонок, нагельных групп и др. Существующий сортамент когтевых шайб подразумевает различные диаметры, толщины и конфигурацию когтей в зависимости от требуемой несущей способности и размеров сечений пиломатериалов. Принятая модель древесины – транстропное тело. Усилия, передающиеся в соединениях элементов деревянных конструкций, воспринимаются суммарной контактной поверхностью сопряженных элементов. Однако работа отдельных зубьев когтевых шайб изучена недостаточно: отсутствуют исследования влияния геометрических характеристик зуба на несущую способность коннектора, не оценивается изменение толщины соединителя и др. В качестве объекта исследования принят прототип – двухсторонняя когтевая шайба типа «Bulldog» диаметром 50 мм. Рассмотрены различные схемы раскроя шайбы, в которой предопределены размеры (ширина и высота) зуба треугольной формы. Оценивается влияние на несущую способность толщины шайбы (заготовки) в пределах 1,0...1,5 мм. Основным критерием выбранных схем раскроя является возможность изготовления шайб одноударной штамповкой без дополнительной подрезки. Исследовано 5 вариантов двухсторонних когтевых шайб с количеством зубьев 8–12 шт. с каждой стороны. В качестве математической модели работы зуба принято

дифференциальное уравнение 4-го порядка, описывающее поведение нагеля на упругом основании с постоянным значением изгибной жесткости EI , переход к которому осуществлялся от переменного значения $EI = f(x)$ путем поиска эквивалентной ширины сечения из условия изгиба элемента треугольного сечения при помощи переменной, направленной нормально к фронтальной поверхности, и постоянной, направленной нормально к боковой поверхности.

Для цитирования: Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdrlovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V. Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 178–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189

Ключевые слова: древесина, деревянные конструкции, анизотропия древесины, прочность, деформативность, когтевые шайбы, зубчатые шпонки.

Поступила 15.11.19 / Received on November 15, 2019

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА СЕМЕНОВИЧА СМОЛИНА



Высшее техническое образование России, Северный (Арктический) федеральный университет, химико-лесной комплекс страны понесли тяжелую утрату. 7 июня 2020 г. на 81-м году жизни скоропостижно скончался блестящий ученый, уважаемый специалист, талантливый педагог Александр Семенович Смолин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бумаги и картона Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

В 1961 г. А.С. Смолин закончил химико-технологический факультет Ленинградской лесотехнической академии и был распределен во Всесоюзный научно-исследовательский институт целлюлозно-бумажной промышленности, где прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего

лабораторией и в 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию.

С 1961 г. и до последних дней его жизнь была неразрывно связана с отечественной целлюлозно-бумажной промышленностью. А.С. Смолина знали на целлюлозно-бумажных комбинатах и бумажных фабриках не только России, но и за ее пределами.

В 1995 г. Александр Семенович перешел в Санкт-Петербургский государственный университет растительных полимеров, в 1999 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук и получил ученое звание профессора. С 2005 г. он заведовал кафедрой технологии бумаги и картона этого университета.

Научные работы, учебники, монографии Александра Семеновича Смолина широко известны и в нашей стране, и за рубежом. Он часто выступал с пленарными докладами на международных и российских конференциях, работал в организационном комитете Международной научно-технической конференции «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», проходившей в Архангельске с 2011 г.

Александр Семенович уделял огромное внимание подготовке научных кадров, являлся научным руководителем диссертаций своих многочисленных учеников. Как официальный оппонент он выступал на защитах огромного числа докторских и кандидатских диссертаций, где ему не было равных в России.

Профессор А.С. Смолин в качестве активного члена диссертационных советов по научной специальности 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева. Химия древесины» Д 212.008.02 в Северном (Арктическом) федеральном университете имени М.В. Ломоносова в Архангельске и Д 212.236.08 в Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна внес неоценимый вклад в развитие подготовки квалифицированных кадров в области химии и химической технологии переработки растительного сырья, целлюлозно-бумажной промышленности. Его любили и уважали как высокопрофессионального и эрудированного ученого, энергичного и ответственного человека. До конца своих дней он не слагал полномочий заведующего кафедрой технологии бумаги и картона.

Александр Семенович прожил долгую, яркую жизнь. Светлая память о прекрасном педагоге, большом ученом, добром друге, замечательном и заботливом наставнике, отзывчивом человеке будет всегда жить в сердцах коллег и многочисленных учеников.

Редакционная коллегия «Лесного журнала», коллеги, ученики