

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный журнал

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

1/349

2016

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)
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)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., академик РАН (Россия, Москва)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Малыгин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Северодвинск)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Романов Е.М., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёренсен У.Я., проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Тараканов А.М., д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Черная Н.В., д-р техн. наук, проф. (Белоруссия, Минск)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Ширнин Ю.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Штукин С.С., д-р с.-х. наук, проф. (Белоруссия, Минск)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

Бабич Н.А. – председатель, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Билей П.В., д-р техн. наук, проф., акад. ЛАН Украины (Украина, Львов)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

BULLETIN
OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Lesnoy Zhurnal

(Forestry journal)

Scientific journal

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

1/349

2016

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

EDITORIAL STAFF:

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)
KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

MEMBERS OF THE EDITORIAL STAFF:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I. Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Malygin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Severodvinsk)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zürich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Romanov E.M., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Tarakanov A.M., Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Chernaya N.V., Doctor of Engineering, Prof. (Belarus, Minsk)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shirnin Yu.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shtukin S.S., Doctor of Agriculture, Prof. (Belarus, Minsk)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Babich N.A. – Chairman, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Biley P.V., Doctor of Engineering, Prof., Member of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Lviv)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Б.В. Бабиков, К.И. Кобак.</i> Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболачивания.....	9
<i>С.Н. Тарханов.</i> Влияние аэротехногенного загрязнения на покрытие стволов деревьев эпифитными лишайниками в лесных насаждениях Северо-Двинского бассейна и Беломорско-Кулойского плато.....	37
<i>Л.Н. Гутий, А.Л. Федорков.</i> Экспериментальные культуры сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми.....	48
<i>О.Н. Тюкавина, В.Н. Евдокимов.</i> Корневая система сосны обыкновенной в условиях северотаежной зоны.....	55
<i>В.П. Макаров.</i> Посевные качества семян лиственницы в Забайкальском крае.....	66
<i>А.П. Богданов, Р.А. Алешко, К.В. Шошина, С.А. Демиденко.</i> Использование материалов детальной спутниковой съемки для таксации лиственницы сибирской в Архангельской области.....	74
<i>С.В. Кириллов, А.А. Теплых, В.В. Бочкова, В.А. Мартынов.</i> Географические культуры дуба черешчатого (<i>Quercus robur</i> L.) в Республике Марий Эл.....	83
<i>А.Н. Пеккоев.</i> Качество древесины культур ели при ускоренном лесовыращивании.....	89
<i>Л.В. Зарубина, В.Н. Коновалов.</i> Влияние прореживания и азота на сезонную динамику дыхания корней сосны и ели.....	100

*МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ*

<i>В.В. Стоянов, Ш. Жгалли.</i> Повышение несущей способности деревянных изгибаемых элементов.....	115
<i>В.И. Мелехов, В.А. Шульгин.</i> Контроль процесса сушки пиломатериалов в СВЧ-лесосушильной камере резонаторного типа.....	122
<i>Г.Ф. Прокофьев, Н.Ю. Микловцик, А.М. Тюрин.</i> Новые лесопильные модули для использования в гибких автоматизированных лесопильных линиях.....	131
<i>А.И. Агапов.</i> Определение оптимальных размеров брусьев и досок при раскросе пиловочника брусово-сегментным способом с учетом ширины пропила...	138

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<i>Е.И. Иванова, С.М. Герасюта, В.И. Иванов-Омский.</i> Сравнение систем водородных связей в древесине и бумаге.....	147
--	-----

<i>Е.Ю. Ларина, Я.В. Казаков.</i> Измерение жесткости гофрированного картона при изгибе.....	155
<i>П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, В.К. Любов.</i> Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива Северо-Западного региона Российской Федерации.....	167

КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

<i>Н.А. Бабич.</i> Современный взгляд на актуальные вопросы лесной селекции.....	183
--	-----

ЮБИЛЕИ

<i>С.В. Залесов.</i> Юбилей знатока северной тайги.....	185
---	-----



CONTENTS

FORESTRY

<i>B.V. Babikov, K.I. Kobak.</i> Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by the Wetland Ecosystems of Russia in Holocene. The Problems of Paludification.....	9
<i>S.N. Tarkhanov.</i> Influence of Aerotechnogenic Pollution on the Tree Trunks Coverage by Epiphytic Lichens in the Forest Plantations of the Northern Dvina Basin and the White Sea-Kuloi Plateau.....	37
<i>L.N. Gutiy, A.L. Fedorkov.</i> Experimental Plantations of Lodgepole Pine in the Syktyvkar Forestry in the Komi Republic.....	48
<i>O.N. Tyukavina, V.N. Evdokimov.</i> <i>Pinus Silvestris</i> Root System in the North Taiga Zone.....	55
<i>V.P. Makarov.</i> Larch Seeds Qualities in Zabaikalsky Krai.....	66
<i>A.P. Bogdanov, R.A. Aleshko, K.V. Shoshina, S.A. Demidenko.</i> Use of the Materials of Close Mapping Satellite Acquisition for the Siberian Larch Assessment in the Arkhangelsk Region.....	74
<i>S.V. Kirillov, A.A. Teplykh, V.V. Bochkova, V.A. Martynov.</i> Provenance Trials of English Oak (<i>Quercus robur</i> L.) in the Mari El Republic.....	83
<i>A.N. Pekkoev.</i> Wood Quality of Spruce Crops under Intensive Growing.....	89
<i>L.V. Zarubina, V.N. Konovalov.</i> Impact of Thinning and Nitrogen on Seasonal Dynamics of Pine and Spruce Root Respiration.....	100

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>V.V. Stoyanov, Sh. Zhgalli.</i> Load Bearing Capacity of Wooden Bending Elements.....	115
<i>V.I. Melekhov, V.A. Shul'gin.</i> Control of Lumber Drying Process in the Microwave Cavity-Type Wood-Drying Kiln.....	122
<i>G.F. Prokof'ev, N.Yu. Miklovtsik, A.M. Tyurin.</i> New Sawmill Modules for the Flexible Automated Sawmill Lines.....	131
<i>A.I. Agapov.</i> Setting of Optimal Sizes of the Square-Sawn Beams and Boards at Sawlog Cutting by Beam-Segment Method Considering the Cut Width.....	138

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

<i>E.I. Ivanova, S.M. Gerasyuta, V.I. Ivanov-Omskiy.</i> Comparison of the Hydrogen Bonding Systems in Wood and Paper.....	147
<i>E.Yu. Larina, Ya.V. Kazakov.</i> Measurement of Bending Stiffness of Corrugated Board.....	155
<i>P.A. Mar'yandyshev, A.A. Chernov, V.K. Lyubov.</i> Thermogravimetric and Kinetic Data Analysis of Wood Biofuels in the North-Western Region of the Russian Federation.....	167

CRITIQUE AND BIBLIOGRAPHY

N.A. Babich. The Current Concepts at the Topical Issues of Forest Breeding..... 183

JUBILEES

S.V. Zalesov. The Anniversary of an Expert of the Northern Taiga..... 185



УДК 631.4.43

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9

ПОГЛОЩЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА БОЛОТНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ГОЛОЦЕНЕ. ПРОБЛЕМЫ ЗАБОЛАЧИВАНИЯ

© *Б.В. Бабиков¹, д-р с.-х. наук, проф.*

К.И. Кобак², д-р географ. наук

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: lidun80@mail.ru

²Государственный гидрологический институт, 2-я Линия, 23, Васильевский остров, Санкт-Петербург, Россия, 199053; e-mail: lidun80@mail.ru

Болотные экосистемы являются для атмосферы нетто-стоком углерода (атмосферного углекислого газа). Дан анализ скорости заболачивания и интенсивности аккумуляции углерода в торфе на территории России за время голоцена. Именно в этот период образовалась большая часть болот России, накопивших торф. По современным оценкам, площадь торфяных болот составляет 1,68 млн км², с заболоченными землями – 3,69 млн км². Все эти земли содержат более 100 млрд т углерода (100,93 Гт). Россия занимает первое место в мире по запасам аккумулярованного торфа. Ежегодно в мире заболачивается 66 тыс. га. На территории России средняя скорость заболачивания в голоцене составляла 15...18 тыс. га/год. Она варьировала под влиянием изменяющихся климатических, гидрологических, геологических, морфологических и других факторов, а также значительно отличалась в различных природных зонах и регионах России. Например, в Карелии (северо-западная часть России) средняя скорость заболачивания в голоцене составляла 400 га/год, при этом она варьировала от 150 до 755 га/год. Наиболее интенсивное заболачивание и накопление торфа установлено в атлантическое время голоцена, когда менялись не только типы болотных экосистем, но и их соотношение. Сходные черты заболачивания имеют и другие районы Северо-Запада Российской Федерации и Западной Сибири. К настоящему времени в России накоплены многочисленные данные о скорости аккумуляции торфа и углерода в болотных экосистемах разных типов в среднем за голоцен. Эти результаты далеко не полные и, к сожалению, не дают возможности определить современную скорость накопления органики в болотах и точнее определить характер функционирования экосистемы (является болото нетто-стоком или нетто-источником углекислого газа для атмосферы). Осушение болот может увеличить эмиссию углекислого газа в атмосферу. Для определения современной (за сезоны, десятилетия) скорости нетто-аккумуляции углерода используют следующие методы: балансовый и математического моделирования болотной экосистемы. Расчеты современной скорости нетто-аккумуляции углерода болотами по модели Р. Клаймэ (в модификации И.Е. Турчинович) показали, что она составляет 37,6 млн т углерода/год. В настоящее время процессы заболачивания

в России активизировались вследствие глобального изменения климата и значительных разрушений дренажных систем.

Ключевые слова: болотные экосистемы, голоцен, углерод, аккумуляция, торф, моделирование.

Введение

Наличие углекислого газа (CO_2) в атмосфере – это результат функционирования естественного углеродного цикла, обмена углеродом (С) между атмосферой, океанами, литосферой и биотой. Характерные временные масштабы взаимодействия между резервуарами С различны, как и изменения значений потоков между ними. Эти взаимодействия характерны для всей истории Земли, в ходе которой содержание CO_2 в атмосфере значительно колебалось под влиянием различных естественных факторов (изменений солнечной постоянной, движения материков, скорости спрединга океанического дна, горообразования и др.). Так, в позднем мелу мезозойской эры количество углерода в атмосфере составляло 3700 млрд т (Гт), его концентрация – 1800 ppmv (миллионных долей по объему). Наряду с общим трендом уменьшения CO_2 , которое происходило не плавно, а скорее скачкообразно, углеродный пул атмосферы содержал в олигоцене только 700 Гт С (с концентрацией 320 ppmv), в плиоцене – 950 Гт С (450 ppmv), в начале четвертичного периода – 400...600 Гт С (200...300 ppmv) [6].

Начиная с верхнего плейстоцена, для которого концентрация CO_2 в атмосфере известна на основании результатов анализов пузырьков воздуха из антарктических и гренландских ледяных кернов (200 ppmv), содержание CO_2 увеличивалось. За последние 17...18 тыс. лет атмосфера аккумулировала не менее 170 млрд т С, средняя скорость аккумуляции составляла 20...30 млн т С/год.

Роль континентальной биоты во флуктуациях концентрации атмосферного CO_2 (C_{CO_2}) до сих пор окончательно не ясна, но большинство специалистов считает, что биомасса и почвы служили нетто-стоком атмосферного углекислого газа. Пул органического углерода почв увеличился с 625 млрд т С (18 тыс. лет назад (В.Р.)) до 2100 Гт С в настоящее время [20, 21, 30, 40]. В увеличении размеров почвенного пула С несомненно велика роль развития болот и накопления в них торфа.

По современным оценкам, мировые запасы аккумулированного в болотах С (на площади 6,41 млн км²) составляют 329,0...528,0 Гт С [19]. В России общая площадь оторфованных и заболоченных земель – 3,691 млн км², или 21% территории страны [18]. Согласно другим оценкам, только болота (в границах нулевой залежи) занимают площадь 1,68 млн км² [30]. Содержание углерода в них – 100,9 Гт [10]. По запасам торфа Россия занимает первое место в мире.

Органическое вещество, созданное в процессе фотосинтеза болотными растениями, минерализуясь и частично метаморфизуясь, в анаэробных переувлажненных условиях трансформируется в торф, который накапливается в разных природных зонах в течение многих лет.

Ежегодно в мире заболачивается около 66 тыс. га земли [18]. Как ни парадоксально, но о скорости накопления торфа и углерода и темпах заболачивания в раннем голоцене (разные временные интервалы) имеется более полное представление, чем об уровне болотообразовательного процесса за последние 100 лет. Результаты анализа имеющихся данных свидетельствуют о том, что существуют диаметрально противоположные точки зрения на проблему современной трансгрессии болот и интенсивности аккумуляции в них торфа и углерода [24].

Торфяные болотные экосистемы, как известно, представляют собой нетто-сток атмосферного CO₂, в них углерод аккумулируется на десятки, сотни и тысячи лет. Эти экосистемы можно рассматривать как своеобразные «биологические тупики».

В целях предотвращения негативных последствий современного и предстоящего изменения климата на конференции в Рио-де-Жанейро в 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН, направленная в основном на разработку стратегий сохранения биоразнообразия и уменьшения эмиссии в атмосферу парниковых газов [1]. Суть ее – количественные обязательства по ограничению (либо сокращению) их выбросов. В 1997 г. в Киото был выработан протокол (Киотский протокол) к этой конвенции, согласно которому к 2012 г. все страны, имея определенные квоты, должны сократить размеры эмиссий парниковых газов (в первую очередь CO₂).

Президиум РАН принял решение об организации Совета-семинара «Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий» под председательством акад. Ю.А. Израэля (2004 г.). Совет-семинар и до настоящего времени продолжает свою работу [17].

В данной статье не обсуждается возможная эффективность и научная обоснованность Киотского протокола. В свете его подписания и ратификации многими странами (Россия присоединилась к нему 26 февраля 2005 г.) вопрос учета современной скорости аккумуляции углерода и его нетто-поступления в атмосферу приобрел не только общебиологический, но и политический характер. Это подтверждается огромным вниманием к проблеме современного изменения климата (в частности, проведением Всемирного саммита ООН в декабре 2009 г., (Копенгаген, Дания), собравшего более 15 тыс. участников). Совершенно очевидно, что уже в настоящее время необходимы надежные оценки как антропогенных, так и естественных нетто-стоков и нетто-источников углерода для атмосферы. К 19 февраля 2012 г. 192 страны ратифицировали Киотский протокол (США и Австралия до сих пор его не подписали), но суммарная доля выбросов этих 192 стран составляет 63,7 % общей эмиссии. Действие Киотского протокола в современном его виде в декабре 2012 г. закончилось. На 18-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Доха, Катар) завершилось (несмотря на существенные разногласия) подписанием договора о втором периоде – 2013–2017 (до 2020) гг. Эксперты сходятся во мнении, что реализация проекта без участия в нем промышленных гигантов

(США, Китай, Россия, страны ЕС, Индия) теряет смысл. Новый протокол «Киото-2» должен содержать четкую цель на 2050 г. для глобальных (например, на 50 %) снижений выбросов парниковых газов. Детально страны-участники планируют вернуться к обсуждению будущего «Киото-2» в 2015 г. Вероятно, возникнут новые обязательства, новая ратификация.

Совершенно очевидно, что прежде всего необходимо уточнение всех составляющих глобального углеродного цикла, надежные оценки как антропогенных, так и естественных источников и стоков углерода для атмосферы. Также явно нужны уточненные и новые сведения об интенсивности взаимодействия атмосферы и океана, поскольку именно океан определяет инерционность многих процессов в атмосфере [6, 16, 36, 43, 47, 53].

Трансгрессия болот и накопление в них торфа в голоцене

Послеледниковый период характеризовался значительными климатическими изменениями и, как следствие, изменениями в растительности и почвенном покрове не только в отдельных регионах, но и во всем северном полушарии. Необратимое активное заболачивание является неотъемлемой чертой голоцена. Климатические, гидрологические и геолого-морфологические факторы оказывают наибольшее влияние на линейный прирост торфа. Климатом обусловлена интенсивность аккумуляции углерода и, следовательно, величина прироста торфа, а гидрологический режим определяет условия деградации органики.

По современным оценкам [41, 51] средняя скорость заболачивания за весь голоцен на территории России составляла 150...180 тыс. га/год. Совершенно очевидно, что скорость трансгрессии болот, как и их вертикальный рост, не были одинаковыми в разных районах и в разные временные отрезки голоцена. Так, в Карелии на основе большого фактического материала удалось реконструировать основные этапы развития болот в голоцене, изменения типов этих болот и их растительности [14, 15] (табл. 1).

Начавшийся в бореале болотообразовательный процесс заметно активизировался в атлантическое время. Позднее, в суббореале, сильное похолодание с одновременным снижением количества осадков привело к уменьшению горизонтального роста болот и прироста торфа. Средняя скорость заболачивания за голоцен оценивается авторами как 400 га/год (колебания – 150...755 га/год). Наиболее интенсивное болотообразование отмечено 7,0...5,0 тыс. лет В.Р., когда сформировалось более 40 % болотных массивов современной территории Карелии (3,63 млн га), скорость заболачивания составляла 670...755 га/год. В суббореальное время (4,9...4,0 тыс. лет В.Р.) число и площади вновь образующихся болот были минимальными (150 га/год) и близкими к интенсивности болотообразования в последнем тысячелетии (130 га/год). После суббореального минимума (4,0...3,0 тыс. лет В.Р.) произошел некоторый подъем и последовал новый спад. После 2,0 тыс. лет В.Р. процесс болотообразования вновь активизировался.

Таблица 1

Типы болот в Карелии в голоцене

Период	Типы болот	Соотношение типов, %
Бореальный, BO2	Травяные и травяно-моховые (евтрофные, мезотрофные)	82
	Лесные (мезотрофные)	18
Атлантический, AT2	Травяные (евтрофные)	64
	Травяно-моховые (мезотрофные)	26
	Лесные (мезотрофные)	10
Суббореальный, SB	Травяные (евтрофные)	27
	Травяно-моховые (мезотрофные)	25
	Лесные (мезотрофные)	34
	Сфагновые (олиготрофные)	14
Субатлантический: SA1	Травяно-моховые (евтрофные)	21
	Травяно-моховые (мезотрофные)	41
	Лесные (мезотрофные)	6
	Сфагновые (олиготрофные)	32
SA2	Травяно-моховые (мезотрофные)	22
	Аапа (евтрофно-мезотрофные)	32
	Лесные (мезотрофные)	2
	Сфагновые (олиготрофные)	14
	Грядово-мочажинные (олиготрофные)	30

В бореальное и атлантическое время господствовали травяные и травяно-моховые евтрофные и евтрофно-мезотрофные болота. Позднее, в суббореале, наряду с травяными, лесными и травяно-моховыми появлялись сфагновые олиготрофные типы болот, доля которых возрастала, и в середине субатлантического периода составляла более 30 % (от общего числа типов). С субатлантического времени существенное значение также приобрели грядово-мочажинные олиготрофные болота и евтрофно-мезотрофные болота типа аапа (табл. 1). Общая заболоченность территории Карелии увеличивалась от 4 % в бореальное время до 19 % в атлантическое, достигая в суббореале и субатлантике соответственно 27 и 30 %.

Скорость нетто-аккумуляция углерода в болотах Карелии, по нашим расчетам [41], в течение голоцена уменьшалась от 34,5 (бореальное время) до 9,0...10,0 г С/(м²·год) (субатлантическое). В атлантическое время она составляла 27,0 г С/м² год, в суббореальное – 17,0 г С/(м²·год) [41, 50].

В болотах, благодаря анаэробным условиям среды, особенностям термического режима, а также консервирующим свойствам торфа, пыльца, споры и другие частицы растений сохраняются лучше, чем в минеральных отложениях, поэтому болота (торфяная залежь) являются хранителями информации об истории растительности голоцена. Исследование залежи обычно проводится методом профилей, пересекающих болото от окраинных частей к центру.

В разных частях профиля путем бурения отбираются образцы для палинологического (спорово-пыльцевого) анализа, определяется мощность залежи и возраст по радиоуглеродным данным. Базальный возраст (время образования залежи) и глубина торфа являются основой для определения средней многолетней скорости накопления торфа в болотах разных природных зон (табл. 2).

Таблица 2

**Вертикальный прирост торфа и накопление углерода в голоцене
(средние значения) в некоторых болотных массивах России**

Район исследования	Вертикальный прирост торфа, мм/год	Накопление углерода, г С/(м ² ·год)	Автор
Западная Сибирь, среднее для лесной зоны	0,62	36,5	Лапшина, 2004 [25]
Южная тайга и подтайга	0,74...0,80	41,0 (24,9...56,7)	Лапшина, 2004 [25]
Лесные болота (согры)	0,36	–	Гидрология..., 2009 [12]
Выпуклые верховые болота	1,13 0,24	– –	Лапшина, 2004 [25] Новиков, Батуев, 2010 [28]
Средняя тайга	0,56	24,8 (15,4...43,9)	Лапшина, 2004 [25]
Центры крупных верховых болот	0,35...0,40	–	Гидрология..., 2009 [12]
Большое Васюганское болото (верховые болота)	0,60...2,62	30,0...40,0	Пологова, Лапшина, 2002 [32]
Северная тайга	0,39 (0,10...0,78)	11,4 (7,1...15,4)	Лапшина, 2004 [25]
Плоскобугристые	0,20	–	Лапшина, 2004 [25]
Микроландшафты	0,22	–	Гидрология..., 2009 [12]
Крупнобугристые	0,39	–	Гидрология..., 2009 [12]
Тундра	0,15...0,24	–	Новиков и др., 1999
Полигональные	0,05	–	[28, 29] Новиков, Батуев, 2010 [30]
Европейская территория России (Карелия)	0,85	–	Вомперский и др. 1999 [10]
Южная тайга Европейской территории России	0,55	–	Вомперский и др., 2000 [9]
Северо-Запад (среднее за 9500 лет)	0,59	–	Кузьмин, 1993 [24]
Никольско-Лютинская болотная система (среднее), генетические центры		11,8...35,8 (13,4...40,9) 10,0...24,6	Кузьмин, 1993 [24]
Полосы слияния Ширинская болотная система, генетические центры		9,0...29,0	Кузьмин, 1993 [24]

Изучение содержания и интенсивности накопления углерода в торфяных залежах разного типа, которое обычно производится в лабораторных условиях, показало, что залежи верхового (сфагнового) типа характеризуются наименьшими запасами углерода [42]. Содержание углерода в слоях гипново-травяной низинной залежи заметно выше, максимальных значений накопление (до 70...80 г С/(м²·год)) достигает в низинных торфах, залегающих в озерах и долинах малых рек богатого грунтового питания [25, 42].

Такой же, как в Карелии, характер процесса заболачивания и торфонакопления отмечен и в других районах Северо-Запада европейской части России. Изучение трансгрессии верховых болот свидетельствует о том, что с XIII в. скорость наступления болот на суходолы возрастала, достигая к началу 90-х гг. XX в. примерно 44,6 см/год, на некоторых болотных массивах – 166,3 см/год [24]. Нетто-аккумуляция углерода олиготрофными болотами северо-запада, по нашей оценке, в бореале и атлантике составляла 45,0 г С/(м²·год), в суббореале – 43,0 г С/(м²·год), в субатлантическое время – 18,0 г С/(м²·год) [20, 42]. Исследования на территории Западной Сибири показывают, что начало активного болотообразовательного процесса относится к предбореальному времени. Оно было обусловлено окончанием Сартанского оледенения и потеплением климата, но протекало на незначительных территориях и лишь в хорошо выраженных микропонижениях. В бореале процесс торфообразования активизировался, а в атлантике (особенно во второй половине атлантического периода) наступление болот на суходолы шло со скоростью 40,0...60,0 см/год [11]. За 4,0...5,5 тыс. лет (от бореала до суббореала) сформировалась большая часть болотных массивов Западной Сибири. В северной тайге, тундре и лесотундре скорость торфонакопления в бореале была максимальной за весь голоцен, достигая 1,40...1,60 мм/год, что в 2 раза выше интенсивности торфонакопления в северных экосистемах европейской части России [7].

В суббореальное время в связи с похолоданием и увеличением сухости климата темпы трансгрессии болот на суходолы снизились до 5,0...10,0 см/год, скорость торфонакопления уменьшилась до 0,40 мм/год. Происходила консервация погребенных под слоем торфа подзолов во вновь развивающейся мерзлоте. Последние 2,5 тыс. лет характеризуются самыми низкими темпами роста болот (4,0 см/год), интенсивность торфонакопления в северной тайге не превышает 0,20 мм/год [7, 11]. Сходные результаты были получены и при исследованиях болотных массивов таежной зоны Западно-Сибирской низменности (междуречье Оби и Васюгана, 59°23' с.ш. – 76°54' в.д.). По мере роста торфяной залежи, начиная с предбореального времени (около 9,5 тыс. лет В.Р.), скорость ее нарастания постоянно уменьшалась. Наиболее интенсивным накопление торфа было на границе предбореала и бореала, когда средний прирост составлял 2,04 (предбореал) ... 0,86 мм/год (бореал). Аккумуляция углерода в торфе была максимальной (137,0 г С/(м²·год) в предбореале) и достаточно высокой (45,5 г С/(м²·год)) в бореальное время [13]. Современный (субатлантика) прирост торфа этих болот – 0,30 мм/год, аккумуляция углерода – 11,2 г С/(м²·год). Исследователи

приходят к выводу о явном замедлении процесса торфонакопления и, основываясь на результатах моделирования, даже о его возможном прекращении через 1,0 тыс. лет (или ранее), когда уменьшающаяся скорость прироста составит 0,15 мм/год, что ниже минимального прироста, отмеченного в суббореальное время (0,21 мм/год).

Анализ скорости торфонакопления в Северной Евразии в зональном аспекте за голоцен свидетельствует о том, что, несмотря на различия, в историях болотообразовательного процесса Европы и Западной Сибири прослеживается и ряд общих черт. Прежде всего то, что для северных торфяников как Европы, так и Западной Сибири, начало голоцена (предбореальное и бореальное время) характеризуется высокими темпами торфонакопления: до 1,40...1,60 мм/год – в Западной Сибири, 0,80 мм/год – на Европейском Севере. В Западной Сибири заболачиванием в основном была охвачена северная часть, а на юге существовали лишь немногочисленные торфяники [26]. Новосанчуговское похолодание и после короткого потепления последовавший ряд новых похолоданий привели к тому, что в период 7,0...6,0 тыс. лет В.Р. на Севере наблюдался локальный минимум торфонакопления. В это же время в южных районах (в южнотаежной подзоне и лесостепи) установлены локальные максимумы торфообразования как в Европе, так и в Западной Сибири.

Климатический оптимум голоцена на Севере характеризовался максимальным потеплением и увеличением влажности климата, обусловившими возрастание интенсивности торфонакопления в болотах лесотундры и северной тайги. В этот период отмечена вероятность полной деградации мерзлоты на Севере. Есть основания полагать, что именно тогда сформировалась основная площадь современных болотных массивов Севера [7]. Похолодание, начавшееся 4,5 тыс. лет назад, обусловило уменьшение скорости торфонакопления в северных регионах европейской части и Западной Сибири. В Западной Сибири 3,5 тыс. лет назад эта скорость снизилась до 0,10...0,20 мм/год и далее слабо варьировала до наших дней. В это время происходило промерзание торфяников и, несмотря на последовавшие потепления климата, мерзлота, находившаяся в термоизолирующем слое торфа, не протаивала. Лишайниковые сообщества тундрового типа, сформировавшиеся на поверхности торфяников, распространились до 61° с.ш. Небольшие потепления обуславливали протаивание мочажин и формирование бугристых комплексов в центральных частях болотных массивов, а также трансгрессии торфяников на прилегающие суходолы. По периферии болотных массивов возникали грядово-мочажинные болота, которые в течение последних 3,0 тыс. лет остаются частично промерзшими. В целом в северных регионах наблюдалась в голоцене сходная тенденция снижения скорости торфонакопления от бореала до субатлантика. Интенсивность торфонакопления в Западной Сибири была значительно выше, чем на Европейском Севере, особенно в ранние временные отрезки голоцена (9,0...7,0 тыс. лет В.Р.). В лесотундре и тундре Европы был также всплеск торфонакопления (3,0...1,5 тыс. лет В.Р.), когда его скорость достигала 0,40 мм/год.

В среднетаежной зоне Европы и Западной Сибири вариации скорости торфонакопления находились в противофазе [7]. Максимальные скорости (до 1,10 мм/год – в Западной Сибири, 1,40 мм/год – в Европе) зафиксированы в бореальное время, но на более поздних временных этапах максимумы и минимумы скорости чаще всего не совпадают. Абсолютные значения скорости, как правило, заметно выше в болотах европейской части. Однако изучение процессов накопления углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота (торфяная колонка «Водораздел», расположенная в средней тайге центральной части Обь-Иртышского междуречья) показало, что средняя многолетняя аккумуляция углерода составляла 30,0...40,0 г С/(м²·год) [32]. Вертикальный прирост в залежах верхового типа колебался от 0,60 до 2,62 мм/год (табл. 2), что выше средних значений для Западной Сибири и значительно выше обычно приводимых для европейской средней и южной тайги значений (9,10 мм/год). В бореальный период (9,0...8,0 тыс. лет В.Р.) в условиях постепенного потепления климата на исследованной территории Большого Васюганского болота установлен пик аккумуляции углерода (70,0 г С/(м²·год)) при величине прироста 1,79 мм/год. Большие различия в уровне аккумуляции углерода в болотах средней тайги Европы и Азии могут быть объяснены особенностями сибирского климата (высокие летние температуры, обеспечивающие довольно высокую продуктивность болотных растений и вертикальный прирост торфа и, вместе с тем, замедлением процессов разложения торфа в зимнее время из-за глубокого промерзания почв на фоне короткого вегетационного периода [25, 32].

В лесостепной зоне и подзоне южной тайги Западной Сибири климатический оптимум голоцена сопровождался аридизацией климата [39], что привело к снижению скорости торфонакопления. В торфяниках Европы это не зафиксировано, но, начиная с 4,0 тыс. лет В.Р. в лесостепной зоне скорость торфонакопления синхронно возрастала в торфяных болотах Европы и Азии. 3,7...3,5 тыс. лет В.Р. в этой зоне фиксируется развитие олиготрофных торфяников, чему могло способствовать только увеличение влажности климата. Избыток атмосферной влаги создавал олиготрофные условия прежде всего в центральной части, оттесняя к краю болотного массива грунтовые воды.

Торфонакопление в южной тайге и лесостепи очень четко реагировало на серию похолоданий субатлантического периода (2,0...1,7; 1,5...1,4; 0,7...0,6 тыс. лет В.Р.), увеличиваясь в отдельных торфяниках до 1,50...2,00 мм/год [7]. Накопленные данные позволяют сделать вывод, что в течение голоцена скорость торфообразования в южных районах Сибири и Европы возрастала. Изменения скорости торфонакопления на Севере и Юге находились в противофазе.

В суббореальное и субатлантическое время во всех районах заболачивание продолжалось в основном за счет разрастания ранее образовавшихся болот. Сухое похолодание суббореала (2,8 тыс. лет В.Р.) и начала атлантики привело к снижению темпов торфонакопления в средней тайге Западной Сибири [25],

в ее северных районах за последние 2,5 тыс. лет интенсивность торфонакопления не превышала 0,20...0,30 мм/год. Скорость радиального роста, как уже отмечалось, составляла 4,0 см/год [11], аккумуляция углерода – 11,2 г С/(м²·год) [7, 13].

Результаты изучения вертикального прироста торфа в болотах России в голоцене, по данным радиоуглеродных датировок [9], свидетельствуют о том, что в субатлантический период голоцена этот прирост явно увеличился на болотах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской территории России (по сравнению со средним приростом за голоцен). На аналогичных болотах Западной Сибири (вне области распространения многолетней мерзлоты) установлено некоторое снижение прироста в это время (по сравнению со средним за голоцен). Полученные результаты прекрасно согласуются с данными о снижении уровня торфонакопления в субатлантическое время в Западной Сибири.

Анализ данных о скорости торфонакопления в болотах, которые расположены на многолетне-мерзлых грунтах, снабженных радиоуглеродными датировками (базальный возраст 7,68...10,61 тыс. лет), также показал, что эта скорость во второй половине голоцена (в суббореале и субатлантике) часто на порядок ниже (0,08 мм/год), чем в первой (0,55 мм/год), когда она соответствовала приросту немерзлых торфяников [9].

Влажное потепление за последние 100 лет привело к увеличению прироста торфа и накоплению углерода в болотах средней тайги Западной Сибири [32]. Сведения о современной скорости заболачивания и интенсивности накопления торфа и углерода в болотных экосистемах России далеко не полны и носят фрагментарный характер.

Заболачиваемость Западной Сибири в субатлантике, по оценке М.И. Нейштадта [31], составляла 8000 га/год. За последние 2,5 тыс. лет средняя скорость наступления болот на суходолы равнялась 15,0 см/год. На основании результатов радиоуглеродного датирования было установлено, что она не была одинаковой: 2,5...125 тыс. лет В.Р. – 16,8 см/год; 1,25...0,82 тыс. лет В.Р. – 20,9 см/год; с 820 г. и по настоящее время – 9,1 см/год. Современное Большое Васюганское болото 500 лет назад состояло из 19 отдельных болот площадью около 4,5 млн га, при этом 900 тыс. га было представлено мелкозалежными участками с мощностью торфа менее 0,7 м. В настоящее время вследствие разрастания этих участков образовался единый массив, где 25 % занимаемой территории имеет возраст не более 500 лет [31, 41].

По мнению специалистов, возникновение новых очагов устойчивого заболачивания в настоящее время в естественных условиях маловероятно [24, 34, 35]. Процесс заболачивания лесов носит прерывистый характер и большого значения не имеет [34]. Но в лесах могут возникать новые очаги заболачивания при строительстве дорог (при отсутствии водосливных сооружений), запруживании и захламлении небольших речек и ручьев, в зонах создания новых водохранилищ и т.д. Аэровизуальные наблюдения в Карелии, проведенные в 1978 г. в Калевальском и Кемском районах, свидетельствуют об инте-

сивном наступлении болот на леса. Незаболоченная лесная площадь составляет там не более 20...30 % [34]. Подобная тенденция отмечена и в других районах, например в Вепском лесу (по сообщению Федорчука, 1999 г.).

Статистические данные Земельного кадастра России свидетельствуют о том, что за последние 30 лет увеличение заболоченности отмечается во всех административных районах европейской территории России (кроме некоторых южных) [22].

Очевидно, что современное заболачивание в большой степени обусловлено разрушением ранее созданных лесосушительных (и других мелиоративных) систем. В России с 1775 г. по 1991 г. было осушено 4,96 млн га, причем за период с 1925 г. по 1991 г. лесосушительные системы были построены на территории России (без Прибалтики, Белоруссии и Украины) на площади более 4 млн га. С 1991 г. гидролесомелиоративные работы, как известно, существенно сокращались, что явилось причиной вторичного заболачивания ранее осушенных земель. Есть основания полагать, что к настоящему времени вторично заболотилось не менее 1 млн га [23]. Такие же тенденции наблюдаются и в восточных областях России. Наглядным примером вторичного заболачивания является болото Бакчар в Западной Сибири [19].

В последние годы на Северо-Западе России отмечается четкая тенденция усиления трансгрессии болот на леса. Линейный рост болот, их наступление на окружающие суходолы в настоящее время составляет 30,0...50,0 см/год, вертикальный прирост торфа в среднем – 3,00 мм/год (табл. 2 [24]). Вариации значений вертикального прироста находятся в интервале от 0,40...0,60 (для древесной и древесно-травяной групп) до 10,00...12,00 мм/год (олиготрофные сфагновые торфа). В болотах Ленинградской области установлены максимальные значения вертикального прироста как в генетических центрах (12,82 мм/год), так и на окраинах (10,26 мм/год) (Никольско-Лютинская болотная система Ленинградской области и др.). Средние значения вертикального прироста торфа для некоторых сфагновых болот Северо-Запада (Никольско-Лютинская система, болото Ламмин-Суо, Ширинский Мох и др.) за последние 100 лет составляли 7,14 мм/год.

Повышение активности процесса торфонакопления в последние годы может быть объяснено климатическими причинами и, прежде всего, увеличением количества осадков [24]. Анализ метеорологических данных, полученных на станциях Северо-Западного региона, свидетельствует о росте среднегодовой (а также зимне-весенней) температуры и количества осадков за последние десятилетия [6, 21].

На основании обширных материалов были установлены связи интенсивности накопления торфа с некоторыми климатическими параметрами. Для северных торфяников отмечена положительная реакция на потепление и увлажнение климата с запаздыванием на 600 (на повышение температуры) и 1120 лет (для количества осадков). Коэффициенты корреляции равны 0,77 и 0,64 соответственно.

Для южных торфяников (при отрицательной реакции на увеличение температуры и количества осадков) коэффициенты корреляции составляют $-0,45$ и $-0,26$ при запаздывании реакций на 320 и 720 лет. Выявленное запаздывание означает, что интенсивность торфонакопления на изменение климата, ускоряясь или замедляясь в соответствующие периоды потеплений или похолоданий, достигает максимума или минимума интенсивности только спустя указанное время после климатических экстремумов [4, 7].

Методы определения современной скорости аккумуляции углерода

Для определения современной скорости аккумуляции углерода в болотах сегодня используют два метода: балансый, когда в полевых условиях определяются все потоки в экосистему (поступление углерода и его потери), и моделирование.

Модель вертикального роста болот была разработана Р. Клаймэ [43] для исследования верховых болот еще в 1984 г. В последние годы она широко применяется (в модификации И. Турчинович) [33, 38] для расчетов и других типов болотных экосистем. Согласно этой модели, болото можно представить в виде двух слоев: акротелма – верхнего деятельного слоя, и катотелма – нижнего, в котором все процессы протекают значительно медленнее («деятельный» и «инерционный» слой). Обоснование разделения торфяной залежи на два разнородных слоя впервые было сделано в работах К.Е. Иванова (1948 г.) и В.Д. Лопатина (1949 г.) [4, 27]. За верхнюю границу акротелма принимают условную поверхность, проходящую на высоте средних отметок выпуклых и вогнутых форм микрорельефа. Граница между акротелмом и катотелмом в болотах совпадает со средним многолетним минимальным (как правило, летним) положением уровня болотных вод.

В акротелме происходит отмирание массы живого органического вещества, и в аэробных условиях активно протекают биохимические процессы разложения. Интенсивность гидрологических процессов в деятельном слое зависит от глубины залегания болотных вод и ограничена наличием особой (меняющейся) по глубине структуры (скелет корневой части тела растения).

Процесс накопления органического вещества в акротелме может быть представлен следующим образом:

$$dM_a/dt = P_a - A_a M_a - P_c, \quad (1)$$

где $M_a = P_a H_a$ – масса органического вещества на единице площади в акротелме;

P_a – ежегодное поступление живого органического вещества на поверхность болота;

H_a – глубина акротелма;

A_a – коэффициент пропорциональности;

P_c – поток органического вещества, ежегодно поступающего из деятельного слоя в нижний инертный слой – катотелм.

Доля поступающего в катотелм вещества, определяемая соотношением M_a/P_a , зависит от многих факторов: продуктивности болотных растений, кли-

матических условий и т.д. Это соотношение имеет разные значения для болот разных типов.

Скорость деструкции органического вещества в акротелме также зависит от многих факторов. По мнению многих специалистов, она пропорциональна массе органического вещества, остающегося после разложения в изучаемом слое, поэтому коэффициент пропорциональности A_a обычно принимают постоянной величиной для данного типа болота и растительности.

В нижнем инертном слое болота происходят аналогичные процессы, но интенсивность разложения органического вещества в анаэробных условиях катотелма на один-два порядка меньше, чем в акротелме. Накопление органического вещества в катотелме можно представить как

$$dM_c/dt = P_c - A_c M_c, \quad (2)$$

где M_c – масса органического вещества торфа на единице площади, накопившегося к моменту времени t ;

P_c – аналог ежегодной продукции для акротелма;

A_c – параметр, который обычно принимают постоянной величиной для длительного интервала времени, в течение которого можно считать условия окружающей среды неизменными.

Накопление органического вещества в верхнем слое болотной экосистемы происходит до тех пор, пока не установится постоянная толщина акротелма, которая сохраняется в течение длительного времени при отсутствии существенных изменений в окружающей среде. В этот период развития болотной экосистемы потоком органического вещества в катотелм можно пренебречь. Формирование акротелма занимает от нескольких десятилетий до сотен лет для разных типов болот. По нашим оценкам, наиболее быстро стационарный деятельный слой устанавливается в аапа и грядово-мочажинных комплексах, где время его формирования составляет 50...60 лет. Наиболее длительно этот процесс протекает в низинных болотах (400...600 лет). Зная толщину акротелма и плотность органического вещества в нем, а также нетто-продуктивность растительного сообщества для данного типа болота, можно оценить значение постоянной распада A_a .

В стационарном состоянии с момента времени становления акротелма (T_a) поступление органического вещества в этот слой компенсируется его потерями в акротелме и стоком в нижний – катотелм.

Это позволяет представить уравнение (1) как $dM_a/dt = 0$ и оценить поток органического вещества из акротелма в катотелм (P_c).

Значение P_c характеризует среднюю многолетнюю скорость торфонакопления в начальной стадии развития болота, когда формирование торфяной залежи только началось и скорость потерь органического вещества в катотелме пренебрежимо мала. В начальный период болотообразования скорость торфонакопления определяется интенсивностью нетто-продуктивности болотных экосистем именно в тот период времени, а также процессами, происходящими в акротелме, параметры которого, как и скорости различных процессов в нем, отличаются от современных.

Обсуждение результатов

Оценка современного потока органического вещества из деятельного слоя в катотелм является основой для определения современной скорости аккумуляции и линейного прироста торфа некоторых типов болот России (табл. 3). В расчетах использованы значения нетто-продуктивности, толщины акротелма, плотности абс. сухого вещества в акротелме по литературным данным [4, 5, 14, 15, 24, 37]. Приведенные в табл. 3 значения параметра A_a для исследуемых типов болот оценены нами с помощью модели вертикального роста болот [38, 41].

Таблица 3

Поток органического вещества из акротелма в катотелм и максимально возможный линейный прирост торфа в некоторых типах болот России в современную эпоху

Тип болот	Продуктивность фитомассы*, г/(м ² ·год)	Плотность торфа в акротелме*, кг/м ³	Толщина акротелма, м	Константа разложения A_a , в год	Поток органического вещества в катотелм P_c *, кг/(м ² ·год)	Линейный прирост торфа, мм/год
Аапа	0,14...0,54	65...90	0,10...0,30	0,02...0,06	0,058	0,46...0,53
Грядово-мочажинные верховые	0,43...0,52	30...50	0,38...0,44** 0,42...0,49***	0,01...0,05	0,070	0,88...0,93
Верховые облесенные: европейская часть РФ	0,30...0,63	30...50	0,49...0,54**	0,01...0,04	0,063	0,79...0,84
Западная Сибирь	0,21...0,63		0,47...0,58***		0,079	1,00...1,10
Низинные Лесные и травяно лесные	0,78	140	0,85	0,06	0,02	0,10...0,20
	0,72	100 110	0,49	0,01	0,10	0,70...0,90

* Абс. сухое органическое вещество. ** Данные полевых наблюдений. *** Расчетные данные.

Современная скорость аккумуляции углерода (при среднем его содержании в абс. сухом веществе 51,7 %) колеблется от 10,3 в полигональных болотах до 51,7 г С/(м²·год) в низинных травяных болотах. Оценки выполнены без учета потерь органического вещества в толще торфяной залежи, образованной за время существования болота, но мы полагаем, что они несколько завышены. В дальнейшем планируется уточнить параметры модели, характеризующие процессы в катотелме.

Для расчетов использованы результаты определения площадей, полученные в Государственном гидрологическом институте (на площади 168 млн га) [30], и данные по распределению площадей, занимаемых разными типами болот [4, 42].

Суммарная аккумуляция углерода болотами России в настоящее время составляет 37,6 млн т/год. По нашим оценкам, максимальный вклад (46,8 %) в эту аккумуляцию вносят грядово-мочажинные болота, занимающие более 40 % площади современных болот [42].

Результаты определения современной скорости аккумуляции углерода в болотах балансовым методом весьма ограничены. Это объясняется тем, что используются сложные приборы для учета отдельных составляющих углеродного баланса болотной экосистемы, требуются высококвалифицированный персонал для их обслуживания, тщательный выбор места и времени наблюдений и т. д.

Удачным примером могут служить исследования в Западной Сибири на отрогах Большого Васюганского болота (болото Бакчар) в 1991–2001 гг. [19]. Изучение в течение ряда лет первичной продуктивности (NPP), эмиссии газов (CO_2 и CH_4) с поверхности почв и выноса углерода болотными водами показало, что общий расход углерода в изученных болотных экосистемах (77,4 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) значительно уступает уровню фотосинтетической нетто-аккумуляции (125 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) – среднему значению за весь длительный период наблюдений. Большая часть потерь углерода обусловлена эмиссией углекислого газа (в среднем 69,0 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, или 55,2 % от NPP) и метана, доля которого значительно меньше (0,3...6,5 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, или 2,7 % NPP). Вынос углерода болотными водами, содержащими растворенные органические вещества, составляет 6,9 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, или 5,5 % NPP.

Авторы пришли к выводу о преобладании процесса аккумуляции углерода в торфяной залежи и прогрессировании торфообразования в настоящее время. По нашим оценкам, сделанным на основании результатов проведенных полевых исследований, средняя аккумуляция составляет 48,0 г $\text{C}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [20].

Подобные исследования, проведенные в Ленинградской области на верховом болоте Ламмин-Суо (без учета эмиссии метана) показали, что современная нетто-аккумуляция углерода составляет 12,0 % NPP (31,4 г $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$), вынос углерода болотными водами – 5,0 % NPP. Следствием минерализации органического вещества на поверхности почв и в акротелме является эмиссия газов, равная 83,0 % NPP. Эти исследования продолжаются в настоящее время с учетом интенсивности выделения метана с поверхности почв. Полученные результаты свидетельствуют о положительном балансе (нетто-накоплении углерода) в разные по погодным условиям годы, но полученных результатов явно недостаточно для окончательных выводов [20].

Высокие значения вертикального прироста торфа (2,28 мм/год – в центре, до 3,29 мм/год – на некоторых окраинах [24]), установленные на этом болоте, безусловно подтверждают тот факт, что процесс торфообразования в настоящее время интенсивно продолжается.

Одна из составляющих углеродного баланса – эмиссия CO_2 с поверхности экосистемы – широко используется как показатель «биологическая продуктивность почв» (биологическая активность почв), а также как свидетельство изменений, происходящих в почвенном профиле под влиянием естественных причин или антропогенного вмешательства. Результаты изучения трансформации торфяных земель, где было проведено осушение, свидетельствуют об изменениях в наземной растительности и почвенном покрове. Так, при длительных наблюдениях (1958 – 2009 гг.) на осушенном в разной степени мезотрофном болоте Ленинградской области (Тосненский район) было установлено, что после осушения сформировалось новое высокобонитетное сосновое насаждение, уменьшилась толщина торфяной залежи, увеличилась зольность торфа. Показано, что биологическая активность торфяных почв тесно связана с гидротермическими условиями. Исследования установили [3], что продуцирование CO_2 зависит прежде всего от положения уровня грунтовых вод, влажности почв и температуры.

Осушение болот способствует активизации в них биологической активности и ведет к увеличению в торфе концентрации CO_2 . Эмиссия CO_2 почвами России в период вегетации (по Г.А. Заварзину) варьирует в пределах 0,33...6,13 т/га. Осушение болот изменяет продуцирование CO_2 . В процессе осушения снижение уровней грунтовых вод способствует прогреванию почвы, увеличивает в них биологическую активность, содержание и продуцирование CO_2 [2, 3]. Однако при интенсивном осушении и значительном снижении уровня грунтовых вод продуцирование CO_2 снижается, уменьшается и его эмиссия. Скорость эмиссии CO_2 определяли по росту концентрации CO_2 внутри камеры в полевых условиях. Полевые исследования на мезотрофных торфяниках показали, что при понижении уровня грунтовых вод до 15...20 см эмиссия органического углерода за период вегетации составляет 1,4 т/га, при положении уровня грунтовых вод 40...45 см – 3,2 т/га, при понижении до 60...70 см – 0,6 т/га.

При несомненных достоинствах и широком использовании показателя биологической активности почв следует отметить, что при изучении современной скорости аккумуляции атмосферного углекислого газа болотными экосистемами этот показатель необходим, но его явно недостаточно для решения проблемы.

Заключение

Анализ палеоклиматических данных свидетельствует о том, что потепление климата на границе послеледниковья – голоцена, с геологической точки зрения было быстрым. Скорость изменения температуры воздуха летом в северных и средних широтах Северного полушария составляла не менее 2,6 °C за 100 лет, при этом ранний голоцен, как известно, характеризовался активным болотообразованием и торфонакоплением.

Эмпирические данные о климате последней четверти XX в. показывают, что этот период был самым теплым не только за время инструментальных наблюдений, но и за последнюю тысячу лет. Средняя глобальная температура в рекордно теплые годы (1995, 1998, 2001 гг.) была на 0,4...0,6 °С выше, чем в конце XIX в. В высоких широтах Северного полушария (на Аляске, в Канаде и Северной Евразии) температура воздуха превышала средние многолетние значения более чем на 1,5...2,0 °С. В высоких широтах одновременно отмечены увеличение количества осадков и изменения в циркуляционном режим, характерные для теплых эпох прошлого. Изменения температуры в начале XXI в. под влиянием усиления парникового эффекта сопоставимы с ее изменениями на границе позднеледникового (голоцена), и быстрое потепление климата на этой границе может быть представлено как возможный аналог флуктуаций климата и окружающей среды [2]. Учитывая это, можно предположить, что процесс образования болот интенсифицируется в предстоящие десятилетия в северных регионах России, интенсивность торфонакопления может достичь бореально-позднеатлантического уровня.

По прогнозу современная северная граница между полигональными и бугристыми болотами в Западной Сибири при глобальном потеплении на 1,4 °С сместится к северу примерно на 100 км, на 2,2 °С – более, чем на 400 км, между бугристыми и олиготрофными болотами – соответственно на 400 км и более, чем на 500 км. Очевидно, что для изменения растительного покрова и типа болот потребуется значительное время, возможно сотни лет, в связи с малой скоростью торфообразования и аккумуляции в них углерода [12].

Торфонакопление в болотных экосистемах России, по нашим оценкам, составляет 37,6 млн т С/год. Вероятно, что эти оценки занижены (по меньшей мере в 1,5 – 2 раза) из-за неполноты или полного отсутствия сведений о некоторых болотных системах России [5, 42].

Прогнозируемое увеличение площадей болот, вероятно, повысит нетто-аккумуляцию CO₂ из атмосферы, поскольку углерод захоранивается в торфах на тысячи лет. Большинство отечественных и зарубежных специалистов рассматривают в настоящее время арктические и бореальные экосистемы как нетто-сток углерода из атмосферы [7, 8, 10, 12, 13, 34, 35, 45, 46, 50 и др.], но существует и противоположное утверждение, где болота представляются как постоянные нетто-источники парниковых газов в атмосферу [52]. В настоящее время во многих странах разрабатываются программы, направленные на охрану болотных экосистем в целях сохранения биологического разнообразия планеты. Даже наблюдается восстановление ранее осушенных торфяных болот (например, в Шотландии) или превращение в болота территорий, занятых ранее сельскохозяйственными культурами (например, рисовые поля в Японии). В результате подобных мероприятий и возможного увеличения площадей болот в некоторых странах должна возрасти нетто-аккумуляция углекислого газа из атмосферы.

По данным анализа ледяных кернов, полученных на антарктической станции Восток, расположенной на высоте 3,5 км над уровнем моря, диапазон колебаний концентрации CO_2 в атмосфере за последние 165 тыс. лет составлял 200...280 ppmv. Концентрация CO_2 и температура изменялись почти синхронно за этот период под влиянием колебаний инсоляции в высоких широтах северного полушария [33, 43].

Анализ керна, взятого в Антарктиде на станции Сипл [33, 47, 48], позволил восстановить историю изменения CO_2 в атмосфере за период от середины XVIII до середины XX вв. На основании этих данных, которые хорошо согласуются с современными, можно установить, что в XVIII в. концентрация CO_2 составляла около 278 ppmv.

Как уже упоминалось, во время последнего гляциального максимума (около 18 тыс. лет В.Р.), концентрация CO_2 в атмосфере составляла 190...200 ppmv, в голоцене (последние 10 тыс. лет) она увеличилась до 270...280 ppmv [33, 46]. Подобная особенность имела место и в изменении концентрации метана, которая увеличилась от 0,35 ppmv в конце гляциальной эпохи до 0,65 ppmv в голоцене.

Измерения концентрации CO_2 в атмосфере начались в конце XVIII в., однако, как показал Дж. Каллендер [44], первые надежные результаты были получены только во второй половине XIX в. Обобщая имеющиеся результаты, он пришел к заключению, что в конце XIX – начале XX вв., до того, как начались значительные выбросы CO_2 от сжигания ископаемого топлива, концентрация CO_2 в атмосфере составляла в среднем 290 ppmv (в 1880 г.). Это значение, с тех пор неоднократно уточненное, широко использовалось в качестве оценки «доиндустриальной» атмосферы, т. е. до того момента, когда антропогенное воздействие стало играть существенную роль. Отклик климатической системы Земля – гидросфера – атмосфера на возмущение, вносимое в атмосферу дополнительным поступлением «антропогенного» (от использования ископаемого топлива) CO_2 , осуществляется, как известно, на фоне долгопериодных изменений, происходящих за счет естественных факторов. Этим проблемам посвящено множество исследований [6, 20, 33, 43, 47, 49, 53], но с непрерывным увеличением концентрации CO_2 в атмосфере, обусловленным деятельностью человека, по мнению специалистов, начался новый «грандиозный геофизический эксперимент» [53].

В 50-х гг. XX в. проблема повышения содержания парниковых газов в атмосфере вновь вышла на первый план. Установленный эффект изотопной дискриминации (эффект Зюсса) и использование радиоактивного углерода (^{14}C) в годичных кольцах древесины (и в других биологических объектах) дали возможность оценить изменение вклада CO_2 антропогенного происхождения в общее содержание CO_2 в течение последних 100 лет.

В 1954 г. на Конференции по атмосферной химии (Швеция) было принято решение об организации CO_2 -мониторинга и создана сеть из 15 станций в Скандинавии, где производился отбор проб в газовые пипетки и последующий анализ

содержания CO₂. Полученные в 1955–1959 гг. данные подтвердили рост концентрации CO₂ в атмосфере (примерно на 10 % с начала века). В это же время был создан инфракрасный газовый анализатор, что дало толчок к расширению дальнейших исследований по мониторингу и значительно повысило точность измерений (1 ppmv) по сравнению с методами, применявшимися ранее.

В течение Международного геофизического года (1956-1958 гг.) под руководством Ч. Киллинга [48] были организованы наблюдения в обсерватории Мауна Лоа на Гавайях, которые продолжаются до сих пор. Постепенно была создана целая сеть мониторинговых станций в разных районах Земли (на Южном полюсе, мысе Барроу на Аляске, мысе Мататула в Западном Самоа и др.) для того, чтобы получить представление о пространственном распределении содержания CO₂ в атмосфере.

Было установлено, что станция Мауна Лоа оказалась чрезвычайно удачным местом наблюдений, так как полученные на ней данные соответствуют средним глобальным значениям концентрации CO₂ и их изменениям.

С 1959 по 1988 гг. средняя годовая концентрация на Мауна Лоа увеличилась с 316 до 351 ppmv. Такой рост концентрации (на 11 %) соответствовал увеличению содержания CO₂ в атмосфере на 75 Гт С. Это повышение обусловлено антропогенными факторами, главным из которых является эмиссия CO₂ при сжигании ископаемого топлива, и (в значительно меньшей степени) изменением характера землепользования (например, вырубка лесов и интенсификация сельского хозяйства). Анализ истории энергетики свидетельствует о том, что с 1700 по 1985 гг. в результате использования ископаемого топлива в атмосферу поступило около 170 Гт С, эмиссия в конце 80-х гг. XX в. составляла (5,6±0,5) Гт С/год. Экспоненциальный рост концентрации CO₂, наблюдаемый на станции Мауна Лоа, полностью соответствует ходу нарастания эмиссии от использования ископаемого топлива (Ff – так называемый промышленный, или топливный поток). На CO₂-кривой можно установить даже периоды двух мировых войн и нефтяного кризиса 1970–1980-х гг., когда рост концентрации в атмосфере явно замедлялся.

В настоящее время содержание парниковых газов в атмосфере продолжает увеличиваться. По данным наблюдений в обсерватории Мауна Лоа, среднегодовая концентрация CO₂ в 2011 г. составляла около 392 ppmv, в 2013 г. – 397 ppmv. Это означает, что за истекшее столетие (1912–2012 гг.) концентрация CO₂ в атмосфере возросла более, чем на 90 ppmv, с начала XXI в. (2000–2013 гг.) – на 37 ppmv (с 360 ppmv). Скорость увеличения CO₂ также нарастала. Если в начале наблюдений на станциях мониторинга (1958 г.) она составляла 0,7...1,0 ppmv/год, то в 1992–2001 гг. уже увеличилась до 1,55 ppmv/год, а в последние годы – до 2,0...2,07 ppmv/год. Современная атмосфера содержит более 832 Гт С в форме CO₂.

Есть все основания утверждать, что основной причиной увеличения концентрации CO₂ в современной атмосфере является эмиссия CO₂ от сжигания ископаемого топлива (антропогенный поток, Ff). Поток от антропогенного

воздействия суши на биоту (F_{bio}), обусловленный вырубкой лесов в тропической и внетропической зонах, изменениями в характере землепользования и др., оценивается менее достоверно, чем F_f . На основании глобальных оценок интенсивности вырубки лесов и лесовосстановления, оценки изменения относительного содержания изотопов углерода $^{13}C/^{12}C$ в атмосферном CO_2 , а также исследования широтного перепада значений концентраций CO_2 в атмосфере было сделано заключение, что существующий F_{bio} имеет порядок 1 Гт С/год [20, 48, 49].

Промышленная эмиссия (F_f) возрастает. По результатам исследований НАСА эмиссия CO_2 в 2010 г. составляла 9,1 Гт С в год, что на 5,9 % выше, чем в 2009 г. Причем следует отметить, что вклад развивающихся стран в суммарный поток больше, чем развитых стран [36] (больше вклада США). Современная ситуация (сумма антропогенной эмиссии ($F_f + F_{bio}$) и концентрация CO_2 в атмосфере) соответствует прогнозируемой для 2010 г. (суммарная эмиссия составляла около 10 Гт С/год, концентрация CO_2 – 395..398 ppmv). На базе нескольких сценариев развития энергетики (сценарий Межправительственного совета экспертов по изменению климата, IPCC, 1990, Prospects for Future Climate 1991) [33], включенных в существующие модели глобального углеродного цикла, были сделаны прогнозы изменений концентрации CO_2 в атмосфере до 2050–2060 гг. [33]. Интервал неопределенностей прогнозируемых значений обусловлен прежде всего различными представлениями о будущем антропогенных источников F_f и F_{bio} . Существующие оценки свидетельствуют о том, что значительная доля антропогенного CO_2 будет оставаться в атмосфере в течение длительного времени, поскольку инерционность в системе океан–атмосфера приводит к запаздыванию возмущений в атмосфере на многие годы (15..20 лет и более). В середине или в конце текущего столетия можно ожидать увеличения содержания CO_2 в атмосфере в 2 раза по сравнению с его доиндустриальным значением, т.е. около 560 ppmv.

Углекислый газ, поступивший при сжигании ископаемого топлива, будет перераспределяться постепенно между другими резервуарами углерода. Однако, если будет сожжена значительная часть углеродного топлива, то и через 10 тыс. лет концентрация CO_2 в атмосфере будет в 2 раза выше современной. Для очищения атмосферы от антропогенного CO_2 за счет связывания его в карбонатных породах (главным образом океанов) потребуется значительно больше времени – от 1 до 10 млн лет.

За короткий интервал времени количество остающегося в атмосфере антропогенного CO_2 зависит от скорости его поступления и поглощения другими резервуарами. Океаны (в основном, их глубинные слои) содержат приблизительно в 50 раз больше углерода, чем атмосфера, и служат самым важным стоком для антропогенного CO_2 (по современным оценкам, около 50..59 %). В настоящее время океан недонасыщен CO_2 [33]. Скорость поглощения его океаном определяется интенсивностью трех процессов: скоростью обмена CO_2 между воздухом и водой и переноса его через границу раздела; интенсив-

ностью перераспределения углерода в воде между его соединениями (гидрокарбонатным и карбонатным ионами и растворенным CO₂); диффузией и циркуляцией в океане, за счет которых происходит обмен вод углеродом и перенос его в глубокие слои океана, лишенные контакта с атмосферой. Учитывая инерционность этих процессов и всей системы океан–атмосфера, о чем уже было сказано ранее, нельзя ожидать снижения концентрации углекислого газа в современной атмосфере (даже при успешном осуществлении программы Киотского протокола).

Интенсивность нетто-стока в болотные экосистемы Российской Федерации (37,6 млн т С/год) безусловно мала. Если предположить, что все современные болота планеты (641 млн га) аккумулируют углерод с такой же интенсивностью, как болота России (на площади 168 млн га), нетто-поглощение атмосферного CO₂ (143,5 млн т С/год) не может компенсировать его антропогенного поступления.

Полученные результаты будут полезны при уточнении составляющих глобального углеродного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.А., Зимницкий П.В. Статистические данные о биоразнообразии древесных ресурсов России на начало XXI в. СПб.: Хромис, 2006. 160 с.
2. Бабиков Б.В. Состав воздуха торфяных почв и его влияние на рост культур сосны // Лесн. журн. 1963. № 6. С. 14–19. (Изв. высших учебных заведений).
3. Бабиков Б.В. Экология сосновых лесов на осушенных болотах. СПб.: Наука, 2004. 166 с.
4. Болота Западной Сибири/Под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова Л.: Гидрометеониздат, 1976. 448 с.
5. Боч М.С., Кобак К.И., Кольчугина Т.П., Винсон Т.С. Содержание и скорость аккумуляции углерода в болотах бывшего СССР // Бюллетень МОИП, отд. Биол. 1994. Т. 99, вып. 4. С. 59–70.
6. Будыко М.И., Ронов А.Б., Янишин А.Л. История атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 207 с.
7. Васильев С.В. Скорость торфонакопления в Западной Сибири//Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 56–59.
8. Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода // XI Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева «Биогеоценотические особенности болот и их использование». М.: РАН, 1994. С. 5–37.
9. Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Глухова Т.В., Валяева Н.А. Вертикальный прирост торфа на болотах России в голоцене по данным радиоуглеродных датировок // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 53–55.
10. Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Валяева Н.А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // Глобальные изменения природной среды и климата. М.: РАН, 1999. С. 124–145.
11. Гаджиев И.М., Смоленцев Б.А. Роль торфообразования в формировании почвенного покрова Сибирских Увалов в голоцене // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 63–65.

12. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / Под ред. С.М. Новикова. СПб.: Изд-во ВВМ, 2009. 520 с.
13. Глебов Ф.З., Толейко Л.С., Климанов В.А., Карпенко Л.В., Дашковская И.С. Динамика палеорастительности, палеоклимата, накопления торфа и углерода в междуречье Оби и Васюгана (Западно-Сибирская низменность) // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 16–19.
14. Елина Г.А. Динамика болотообразования на северо-западе России в голоцене // XI чтения памяти акад. В.Н. Сукачева «Биоценоотические особенности болот и их рациональное использование». М.: РАН, 1994. С. 61–84.
15. Елина Г.А., Кузнецов О.Л., Максимов А.И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.
16. Ефимова Н.А., Жильцова Е.Л., Лемешко Н.А., Строкينا Л.А. О сопоставлении изменений климата в 1981–2000 гг. с палеоаналогами глобального потепления // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 18–23.
17. Зайцева Н.А. О работе Совета-семинара РАН «Возможности предотвращения изменений климата и его негативных последствий», проблема Киотского Протокола // Материалы Всерос. конф. «Нерешенные проблемы глобальной климатологии». СПб., 10-11 июня 2010 г. СПб.: РАН. С. 25–28.
18. Инишева Л.И. Болота и биосфера. Введение // Материалы VII Всерос. науч. шк., 13–15 сентября 2010 г. Томск, Изд-во Томск. гос. ун-та, 2010. С. 3–4.
19. Инишева Л.И., Головацкая Е.А. Сток и эмиссия углерода в Васюганском болоте // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 123–133.
20. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 267 с.
21. Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Лугина К.М., Торопова А.А., Турчинович И.Е. Анализ многолетних метеорологических наблюдений в Северо-Западном регионе России // Метеорология и гидрология. 1999. № 1. С. 30–38.
22. Кобак К.И., Сперанская Н.А. Заболачивание и аккумуляция углерода в болотных экосистемах России // Структурно-функциональные исследования растений в приложении к актуальным проблемам экологии и эволюции биосферы: Тез. докл. СПб.: БИН, 2009. С. 26.
23. Константинов В.К. Гидролесомелиоративная энциклопедия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 367 с.
24. Кузьмин Г.Ф. Болота и их использование // Тр. НИИ торфяной промышленности. СПб.: Изд-во «Петербург», 1993. 140 с.
25. Лапицина Е.Д. Болота Западной Сибири: автореф. ... д-ра биол. наук. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2004. 37 с.
26. Лисс О.Л., Березина Н.А. Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1981. 208 с.
27. Лопатин В.Г. О гидравлическом значении верховых болот // Вестн. ЛГУ. 1949. № 2. С. 37–49.
28. Новиков С.М., Батуев И.В. О реликтовых болотах севера Западной Сибири // Изв. РГО, 2010. Т. 142, вып. 3. С. 37–43.
29. Новиков С.М., Усова Л.И., Малясова Е.С. Возраст и динамика болот Западной Сибири // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. М.: ГЭОС, 1999. С. 72–76.

30. Новиков С.М., Усова Л.И. Новые данные о площади болот и запасах торфа на территории России // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 49–52.
31. Нейштадт М.И., Малик М.И. Прошлое, настоящее и будущее западно-сибирских болот // Природа. 1980. № 11. С. 11–20.
32. Пологова Н.Н., Латишина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 174–179.
33. Предстоящие изменения климата. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля, М.С. Маккракена, А.Д. Хекта. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 269 с.
34. Пьявченко Н.И. Болотообразовательный процесс в лесной зоне // Значение болот в биосфере. М.: Наука, 1980. С. 7–16.
35. Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природа и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 152 с.
36. Режим доступа: <http://www.climatechange.ru/node/1023>
37. Туплянова А.А., Базилевич Н.И., Снытков В.А. Биологическая продуктивность травянистых экосистем. Новосибирск: Наука, 1988. 134 с.
38. Турчинович И.Е., Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Торопова А.А. Моделирование многолетних скоростей торфонакопления разными типами болот северо-запада России // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 60–62.
39. Хотинский Н.А. Голоцен северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.
40. Adams J. Carbon pools and its changes // Proc. of the 14.th INQA-Congress, August, 1985, Berlin. P. 17–23.
41. Atmospheric CO₂ and the global carbon cycle. USA Department of Energy, Report (DOE/ER 0239. Washington, D.C.).
42. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon. pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Global Biogeochem Cycles. 1995. Vol. 9, N 1. P. 37–46.
43. Broecker W.S., Peng T.H. Carbon cycle-1985. Glacial to interglacial changes in the operation of the global carbon cycle // Radiocarbon. 1986. Vol. 28. P. 309–327.
44. Callendar G.S. On the amount of carbon dioxide in the atmosphere // Tellus. 1958. N 10. P. 243–251.
45. Clymo R.S. Limits to peat bog growth // Phil. Trans. Royal Soc. 1984. Vol. 303b. P. 605–654.
46. Clymo R.S. Assessing the accumulation of carbon in peatlands // Northern peatlands in global climate change. Helsinki, FDITA, Publ. of Academy of Finland, 1996. N 1. P. 207–212.
47. Hansen J. Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three dimensional model // J. Geoph. Res. 1988. Vol. 93. P. 9341–9364.
48. Hansen J., Keeling Ch., Harmon M. Targent atmosphere carbon dioxide // NASA Publ. Report, 2008. 124 pp.
49. Hoffert M.I. Global distribution of atmospheric carbon dioxide. A projection // Atm. Env. Vol. 8. P. 1225–1240.
50. Jenny H., Gessel S.P., Bingham F.T. Comparative study of decomposition rate of organic matter in temperate and tropical regions // Soil Sci. Vol. 68. P. 419–432.
51. Vitt D.H., Beilman D.V., Halsey L.A. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene // Canadian Journ. of Earth Science. 2000. N 37. P. 283–287.

52. Volk T., Hoffert M.I. Ocean carbon pump. Analysis of relative strength and efficiencies of in ocean-driven atmospheric CO₂-changes//The carbon cycle and atmospheric CO₂ natural variations Archean to Present: Geoph. Monogr. 1985. Vol. 32. P. 91–110. (American Geophysical Union. Washington, D.C.).

53. Zoltai S.C., Taylor S., Jeglum J.K., Mills G.F., Johnson J.D. Wetlands of boreal Canada//Wetlands of Canada. Polyscience Publication, Montreal, Quebec: 1988. P. 97–154.

Поступила 18.03.15

UDC 631.4.43

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9

Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by the Wetland Ecosystems of Russia in Holocene. The Problems of Paludification

B.V. Babikov¹, Doctor of Agricultural Sciences

K.I. Kobak², Doctor of Geographic Sciences

¹Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: lidun80@mail.ru

²State Hydrological Institute, 2nd Line, 23, Vasilyevsky Island, Saint Petersburg, 199053, Russian Federation; e-mail: lidun80@mail.ru

Wetland ecosystems are the net carbon (atmospheric carbon dioxide) sink for the atmosphere. The analysis of paludification speed and intensity of carbon accumulation in the peat in Russia during the Holocene is presented. During that period most of the peat bogs were formed in Russia. According to the current estimates, the area of peat bogs is 1.68 million km², with wetlands – 3.69 million km². All these lands contain more than 100 billion tons of carbon (Gt 100.93). Russia ranks first in the world in terms of accumulated peat. Annually 66 thousand Ha are swamped in the world. The average speed of paludification in Russia in Holocene was 15 ... 18 thousand Ha per year. It varied under the influence of changing climatic, hydrological, geological, morphological and other factors, and it was significantly different in some natural zones and regions of Russia. For example, the average rate of paludification in Karelia (north-western part of Russia) in Holocene was 400 ha per year, while it ranged from 150 to 755 ha per year. The most intensive logging and peat accumulation was found during the Atlantic period of Holocene, when the types of wetland ecosystems and their balance were changed. The other areas of North-Western and Western Siberia of the Russian Federation have similarities of waterlogging. To date, the numerous data on the rate of carbon and peat accumulation in bog ecosystems of different types an average during the Holocene are gathered in Russia. These results are not complete and, unfortunately, make it impossible to determine the current rate of accumulation of organic matter in the marshes and the nature of the ecosystem functioning (whether a marsh is a net sink or a net source of carbon dioxide for the atmosphere). Marsh drainage may increase the emissions of carbon dioxide into the atmosphere. To determine the current (over the seasons, decades) rate of net carbon accumulation the balance method and the method of mathematical modeling of the marsh ecosystem are used. The calculations of the present rate of net carbon accumulation by the swamps according to the R. Clymo model (as modified by I.E. Turchinovich) showed that it was 37.6 million tons of carbon per year. Currently, the process of paludification in Russia have

been intensified as a result of the global climate changes and extensive damage of the drainage systems.

Keywords: wetland ecosystems, Holocene, carbon, accumulation, peat, modeling.

REFERENCES

1. Alekseev V.A., Zimnitskiy P.V. *Statisticheskie dannye o bioraznoobrazii drevesnykh resursov Rossii na nachalo XXI veka* [Statistical Data on the Biodiversity of Wood Resources in Russia at the Beginning of the XXI Century]. Saint Petersburg, 2006. 160 p.
2. Babikov B.V. Sostav vozdukha torfyanykh pochv i ego vliyanie na rost kul'tur sosny [The Air-Composition of Peat Soils and Its Impact on Growth of Pine]. *Lesnoy zhurnal*, 1963, no. 6, pp. 14–19.
3. Babikov B.V. *Ekologiya sosnovykh lesov na osushennykh bolotakh* [Ecology of Pine Forests on Drained Swamps]. Saint Petersburg, 2004. 166 p.
4. *Bolota Zapadnoy Sibiri* [Marshes of Western Siberia]. Ed. by K.E. Ivanov, S.M. Novikov. Leningrad, 1976. 448 p.
5. Boch M.S., Kobak K.I., Kol'chugina T.P., Vinson T.S. Soderzhanie i skorost' akumul'yatsii ugleroda v bolotakh byvshego SSSR [Carbon Pools and Accumulation in Peatlands of the Former Soviet Union]. *Byulleten' MOIP* [Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series], 1994, vol. 99, iss. 4, pp. 59–70.
6. Budyko M.I., Ronov A.B., Yanshin A.L. *Istoriya atmosfery* [The History of the Atmosphere]. Leningrad, 1985. 207 p.
7. Vasil'ev S.V. Skorost' torfonakopleniya v Zapadnoy Sibiri [The Rate of Peat Accumulation in Western Siberia]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 56–59.
8. Vomperskiy S.E. Rol' bolot v krugovorote ugleroda [The Role of Peatlands in Carbon Cycle]. *XI Chteniya pamyati akad. V.N. Sukacheva "Biogeotsenoticheskie osobennosti bolot i ikh ispol'zovanie"* [The XI Readings to the Memory of a Member of the Academy of Sciences V.N. Sukachev "Biogeocenotic Features of Wetlands and their Use"]. Moscow, 1994, pp. 5–37.
9. Vomperskiy S.E., Tsyganova O.P., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. Vertikal'nyy prirost torfa na bolotakh Rossii v golotsene po dannym radiouglerodnykh datirovok [Vertical Growth of Peat in the Bogs of Russia in Holocene According to the Radiocarbon Dating]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 53–55.
10. Vomperskiy S.E., Tsyganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. Zabolochennost' territorii Rossii kak faktor svyazyvaniya atmosfernogo ugleroda [Paludification of the territory of Russia as an Atmospheric Carbon Sequestration Factor]. *Global'nye izmeneniya prirodnoy sredy i klimata* [Global Changes of Environment and Climate]. Moscow, 1999, pp. 124–145.
11. Gadzhiev I.M., Smolentsev B.A. Rol' torfoobrazovaniya v formirovaniy pochvennogo pokrova Sibirskikh Uvalov v golotsene [The Role of Peat Formation in the Soil Forming in the Siberian Ridges in Holocene]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 63–65.

12. *Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of Peat Lands of the Permafrost Zone of Western Siberia]. Ed. by S.M. Novikov. Saint Petersburg, 2009. 520 p.
13. Glebov F.Z., Toleyko L.S., Klimanov V.A., Karpenko L.V., Dashkovskaya I.S. Dinamika paleorastitel'nosti, paleoklimata, nakopleniya torfa i ugleroda v mezhdurech'e Obi i Vasyugana (Zapadno-Sibirskaya nizmennost') [Dynamics of Palaeovegetation, Paleoclimate, Peat and Carbon Accumulation in the Interfluvial Area of the Ob and Vasyugan Rivers (West Siberian Lowland)]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 16–19.
14. Elina G.A. Dinamika bolotoobrazovaniya na severo-zapade Rossii v golotsene [Dynamics of Paludification in North-West of Russia in Holocene]. *XI Chteniya pamyati akad. V.N. Sukacheva "Biogeotsenoticheskie osobennosti bolot i ikh ispol'zovanie"* [The XI Readings to the Memory of a Member of the Academy of Sciences V.N. Sukachev "Biogeocenotic Features of Wetlands and their Use"]. Moscow, 1994, pp. 61–84.
15. Elina G.A., Kuznetsov O.L., Maksimov A.I. *Strukturno-funktional'naya organizatsiya i dinamika bolotnykh ekosistem Karelii* [Structural and Functional Organization and Dynamics of Wetland Ecosystems of Karelia]. Leningrad, 1984. 128 p.
16. Efimova N.A., Zhil'tsova E.L., Lemeshko N.A., Strokina L.A. O sopostavlenii izmeneniy klimata v 1981–2000 gg. s paleoanalogami global'nogo potepeniya [On the Comparison of Climate Change in 1981–2000 with the Paleoanalogs of Global Warming]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology], 2004, no. 8, pp. 18–23
17. Zaytseva N.A. O rabote Soveta-seminara RAN "Vozmozhnosti predotvrashcheniya izmeneniy klimata i ego negativnykh posledstviy", problema Kiotskogo Protokola [On the Work of the Council-Seminar of the Russian Academy of Sciences "Opportunities of Climate Change Preventing and Its Adverse Effects", the Problem of the Kyoto Protocol]. *Materialy Vseros. konf. "Nereshennyye problemy global'noy klimatologii"*. Sankt-Peterburg, 10–11 iyunya, 2010 g. [Proc. All-Russian Conf. "Unresolved Problems of Global Climate". St. Petersburg, June 10–11, 2010]. Saint Petersburg, 2010, pp. 25–28.
18. Inisheva L.I. Bolota i biosfera. Vvedenie [Bogs and Biosphere. Introduction]. *Materialy VII Vseros. nauch. shk., 13–15 sentyabrya 2010 g.* [Proc. VII All-Russian Sci. School, 13–15 September, 2010]. Tomsk, 2010, pp. 3–4.
19. Inisheva L.I., Golovatskaya E.A. Stok i emissiya ugleroda v Vasyuganskom bolote [Carbon Stock and Emission in the Vasyugan Bog]. *Bol'shoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Bog. Current Status and Development Processes]. Tomsk, 2002, pp. 123–133.
20. Kobak K.I. *Bioticheskie komponenty uglerodnogo tsikla* [Biotic Components of the Carbon Cycle]. Leningrad, 1988. 267 p.
21. Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Lugina K.M., Toropova A.A., Turchinovich I.E. Analiz mnogoletnykh meteorologicheskikh nablyudeniy v Severo-Zapadnom regione Rossii [Analysis of Long-Term Meteorological Observations in the North-West Region of Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology], 1999, no. 1, pp. 30–38.
22. Kobak K.I., Speranskaya N.A. Zabolachivanie i akkumulyatsiya ugleroda v bolotnykh ekosistemakh Rossii [Paludification and Carbon Accumulation in the Bog Ecosystems of Russia]. *Strukturno-funktional'nye issledovaniya rasteniy v prilozhenii k aktual'nym problemam ekologii i evolyutsii biosfery: Tez. dokl.* [Structural and Functional Studies of Plants in the Annex to the Topical Issues of Ecology and Evolution of the Biosphere: Abs.]. Saint Petersburg, 2009, p. 26.

23. Konstantinov V.K. *Gidrolesomeliativnaya entsiklopediya* [The Forest Reclamation Encyclopedia]. Saint Petersburg, 2000. 367 p.
24. Kuz'min G.F. *Bolota i ikh ispol'zovanie* [Bogs and Their Use]. *Tr. NII torfyanoy promyshlennosti* [Proc. Research Institute of Peat Industry]. Saint Petersburg, 1993. 140 p.
25. Lapshina E.D. *Bolota Zapadnoy Sibiri*: dis... dok. biol. nauk [Bogs of Western Siberia: Dr. Biol. Sci. Abs.]. Tomsk, 2004. 37 p.
26. Liss O.L., Berezina N.A. *Bolota Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Marshes of the West Siberian Plain]. Moscow, 1981. 208 p.
27. Lopatin V.G. O gidravlicheskom znachenii verkhovykh bolot [On the Hydraulic Value of Raised Bogs]. *Vestnik LGU* [Vestnik of Pushkin Leningrad State University], 1949, no. 2, pp. 37–49.
28. Novikov S.M., Batuev I.V. O reliktovykh bolotakh severa Zapadnoy Sibiri [About the Relict Marshes of the North of Western Siberia]. *Izvestia RGO*, 2010, vol. 142, iss. 3, pp. 72–76.
29. Novikov S.M., Usova L.I., Malyasova E.S. Vozrast i dinamika bolot Zapadnoy Sibiri [Age Dynamics of Wetlands of West Siberia]. *Bolota i zabolochennye lesa v svete zadach ustoychivogo prirodopol'zovaniya* [Marshes and Swamp Forests in the Challenges of Sustainable Environmental Management]. Moscow, 1999, pp. 72–76.
30. Novikov S.M., Usova L.I. Novye dannye o ploshchadi bolot i zapasakh torfa na territorii Rossii [New Data on the Area of Swamps and Peat Reserves in Russia]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 49–52.
31. Neyshtadt M.I., Malik M.I. Proshloe, nastoyashchee i budushchee zapadno-sibirskikh bolot [The Past, Present and the Future of the West-Siberian Swamps]. *Priroda*, 1980, no. 11, pp. 11–20.
32. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bol'shogo Vasyuganskogo bolota [Carbon Accumulation in the Peat Deposits of the Great Vasyugan Swamp]. *Bol'shoye Vasyuganskoye boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [The Great Vasyugan Swamp. Current Status and Processes of Development]. Tomsk, 2002, pp. 174–179.
33. *Predstoyashchie izmeneniya klimata. Sovmestnyy sovetsko-amerikanskiy otchet o klimate i ego izmeneniyakh* [The Upcoming Climate Change. The Joint Soviet-American Report on Climate and Climate Change]. Ed. by M.I. Budyko, Yu.A. Izrael, M.S. McCracken, A.D. Khekt. Leningrad, 1991. 269 p.
34. P'yavchenko N.I. Bolotoobrazovatel'nyy protsess v lesnoy zone [The Mire Creation Process in the Forest Zone]. *Znachenie bolot v biosfere* [The Significance of Swamps in Biosphere]. Moscow, 1980, pp. 7–16.
35. P'yavchenko N.I. *Torfyanye bolota, ikh priroda i khozyaystvennoe znachenie* [Peat Bogs, Their Nature and Economic Importance]. Moscow, 1985, 152 p.
36. *Kiotskiy protokol: pervye itogi* [The Kyoto Protocol: the First Results]. Available at: <http://www.climatechange.ru/node/1023>.
37. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Snytkov V.A. *Biologicheskaya produktivnost' travyanistykh ekosistem* [Biological Productivity of Herbaceous Ecosystems]. Novosibirsk, 1988, 134 p.
38. Turchinovich I.E., Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Toropova A.A. Modelirovanie mnogoletnikh skorostey torfonakopleniya raznymi tipami bolot severo-zapada Rossii [Modelling of Long-Term Rates of Peat Accumulation in Different Types of Marshes of the North-

west of Russia]. *Dinamika bolotnykh ekosistem Severnoy Evrazii v golotsene* [Dynamics of Wetland Ecosystems of Northern Eurasia in Holocene]. Petrozavodsk, 2000, pp. 60–62.

39. Khotinskiy N.A. *Golotsen severnoy Evrazii* [The Holocene of Northern Eurasia]. Moscow, 1977, 200 p.

40. Adams J. Carbon Pools and Its Changes. *Proc. 14th INQA-Congress, August, 1985*. Berlin, 1995, pp. 17–23.

41. Atmospheric CO₂ and the Global Carbon Cycle. *USA Department of Energy, Report. DOE/ER 0239*. Washington, D.C.

42. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon Pools and Accumulation in Peatlands of the Former Soviet Union. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, vol. 9, no. 1, pp. 37–46.

43. Broecker W.S., Peng T.H. Carbon Cycle – 1985. Glacial to Interglacial Changes in the Operation of the Global Carbon Cycle. *Radiocarbon*, 1986, vol. 28, pp. 309–327.

44. Callendar G.S. On the Amount of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 1958, no. 10, pp. 243–251.

45. Clymo R.S. Limits to Peat Bog Growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1984, vol. 303b, pp. 605–654.

46. Clymo R.S. Assessing the Accumulation of Carbon in Peatlands. *Northern Peatlands in Global Climate Change*. Ed. by R. Laiho, J. Laine, H. Vasander. Helsinki, 1996, no. 1/96, pp. 207–212.

47. Hansen J. Global Climate Changes as Forecast by Goddard Institute for Space Studies Three Dimensional Model. *J. Geoph. Res.*, 1988, vol. 93, pp. 9341–9364.

48. Hansen J., Ch. Keeling, M. Harmon et al. Target Atmosphere Carbon Dioxide. *NASA Publ. Report*, 2008. 124 p.

49. Hoffert M.I. Global Distribution of Atmospheric Carbon Dioxide. A Projection. *Atm. Env.*, 1974, vol. 8, pp. 1225–1240.

50. Jenny H., Gessel S.P., Bingham F.T. Comparative Study of Decomposition Rate of Organic Matter in Temperate and Tropical Regions. *Soil Sci.*, 1949, vol. 68, pp. 419–432.

51. Vitt D.H., Beilman D.V., Halsey L.A. Spatial and Temporal Trends in Carbon Storage of Peatlands of Continental Western Canada through the Holocene. *Canadian Journ. of Earth Science*, 2000, no. 37, pp. 283–287.

52. Volk T., Hoffert M.I. Ocean Carbon Pump. Analysis of Relative Strength and Efficiencies in Ocean-Driven Atmospheric CO₂ Changes. *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present. Proceedings of the Chapman Conference on Natural Variations in Carbon Dioxide and the Carbon Cycle, Tarpon Springs, FL, January 9-13, 1984*. Washington, DC, American Geophysical Union, 1985, pp. 91–110.

53. Zoltai S.C., Taylor S., Jeglum J.K., Mills G.F., Johnson J.D. Wetlands of Boreal Canada. *Wetlands of Canada. Polyscience Publication*. Montreal; Quebec, 1988, pp. 97–154.

Received on March 18, 2015

УДК 631.524.6:582.9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.37

**ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
НА ПОКРЫТИЕ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ
ЭПИФИТНЫМИ ЛИШАЙНИКАМИ
В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ СЕВЕРО-ДВИНСКОГО БАССЕЙНА
И БЕЛОМОРСКО-КУЛОЙСКОГО ПЛАТО**

© С.Н. Тарханов, д-р биол. наук, ст. науч. сотр., зав. лаб.

Институт экологических проблем Севера УрО РАН, наб. Северной Двины, 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: tarkse@yandex.ru

Анализ состояния лишайникового покрова позволяет выявить влияние техногенного загрязнения на самых начальных стадиях деградации лесных экосистем, когда изменения на уровне фитоценоза в целом еще не регистрируются. Целью исследований является изучение накопления серы и тяжелых металлов в талломе эпифитных лишайников и воздействия аэротехногенного загрязнения на общее проективное покрытие ими стволов деревьев. Исследования проводили общепринятыми методами в лесных насаждениях бассейна Северной Двины и Беломорско-Кулойского плато на пробных площадях, заложенных в ельниках черничного типа и сосняках сфагновой группы. Дана оценка содержания серы и тяжелых металлов (Zn, Cu, Cd, Pb, Hg) в талломе *Hurogymnia physodes* (L.) Nyl. в разных условиях произрастания. Определено общее проективное покрытие стволов деревьев сосны и березы эпифитными лишайниками. Полученные результаты свидетельствуют о региональном (от местных источников эмиссии) аэротехногенном загрязнении серой таллома эпифитных лишайников. Их загрязнение тяжелыми металлами, вследствие отсутствия крупных металлургических и горно-обогатительных комбинатов, незначительно и близко к фоновому уровню. Общей тенденцией аэротехногенной трансформации эпифитных лишайников является уменьшение их проективного покрытия в связи с загрязнением атмосферного воздуха, прежде всего, сернистыми соединениями. Установлены прямые связи общего покрытия эпифитными лишайниками стволов форофитов с расстоянием до Архангельского целлюлозно-бумажного комбината и объектов теплоэнергетики, что свидетельствует о его уменьшении с приближением к источнику выбросов. Это соответствует характеру деградации эпифитного лишайникового покрытия в лесных насаждениях других промышленных регионов.

Ключевые слова: эпифитные лишайники, *Hurogymnia physodes* (L.) Nyl., сера, тяжелые металлы, общее проективное покрытие, атмосферное загрязнение.

Введение

Исследования элементного состава лишайников для оценки степени загрязнения атмосферы широко ведутся учеными в Скандинавии, на Кольском полуострове [11, 13, 15] и севере материковой части России [14]. Способность к накоплению загрязняющих веществ у лишайников гораздо выше, чем у многих сосудистых растений, что объясняется особенностями их морфологии и физио-

логии. Например, у лишайников нет восковой кутикулы, вся их поверхность круглосуточно открыта для диффузии любого химического вещества, находящегося в воздухе или на субстрате [1], они способны накапливать различные соединения даже при пониженных температурах. При этом лишайники могут поглощать воду в капельно-жидком состоянии из атмосферного воздуха и накапливать токсичные вещества из сильно разбавленных растворов [7].

Анализ состояния лишайникового покрова позволяет выявить влияние техногенных эмиссий на самых начальных стадиях деградации лесных экосистем, когда изменения на уровне фитоценоза в целом еще не регистрируются. Лишайники из группы устойчивых к антропогенным воздействиям видов накапливают в своих слоевищах различные химические элементы, что свидетельствует о загрязнении среды. Результаты исследований влияния атмосферного загрязнения на состояние эпифитных лишайников отражены в работах многих исследователей [1, 6, 12, 16].

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (более 80 тыс. т выбросов в год) и объекты теплоэнергетики (около 60 тыс. т выбросов в год) обуславливают специфику качественного состава атмосферных эмиссий в Северодвинском бассейне, в частности увеличение доли сернистых соединений в воздухе, что определяет загрязнение ими лишайникового покрова в лесных насаждениях. Общий объем выбросов вредных веществ в атмосферный воздух региона составляет ежегодно до 250 тыс. т. На формирование регионального фона также может оказывать влияние дальний перенос атмосферных загрязнений, прежде всего от предприятий цветной металлургии на Кольском полуострове. На расстоянии 15...30 км от промышленных зон максимальные по метеоусловиям концентрации диоксида серы в приземном слое атмосферного воздуха, рассчитанные с помощью программы «Эколог», составляют 0,02 мг/м³ [8]. Среднегодовая концентрация сульфат-ионов в снеге на периферии зон влияния предприятий Архангельска и Новодвинска колеблется от 5 до 20, в фоновых районах – 0,51 мг/л [2]. Отсутствие металлургических и горно-обогатительных предприятий определяет невысокий уровень загрязнения атмосферного воздуха соединениями металлов. Содержание микроэлементов (Fe, Ni, Cu, Zn, Mn, Cr, Pb) в Архангельске и Северодвинске значительно ниже, чем в других промышленных городах России, особенно в центрах металлургии [8]. Площадь двукратного (в сравнении с фоном) загрязнения снежного покрова твердыми веществами (на расстоянии до 30 км от промышленных зон Архангельска, Северодвинска и Новодвинска) составляет 2558 км², десятикратного (на расстоянии до 20 км) – 1380 км².

Целью настоящих исследований является оценка содержания серы и тяжелых металлов в таллеме эпифитных лишайников в различных условиях произрастания и влияния аэротехногенного загрязнения на покрытие ими стволов деревьев.

Методы исследования

Объекты исследований расположены в типичных северотаежных ландшафтах, преимущественно с равнинным или слегка волнистым рельефом,

в бассейне Северной Двины и на сопредельной территории Беломорско-Кулойского плато (Приморский, Холмогорский, Плесецкий, Пинежский, Мезенский районы Архангельской области и юго-западная часть Ненецкого автономного округа (НАО)) (рис. 1).



Рис. 1. Схема районов расположения пробных площадей

Пробные площади (в количестве 99 шт.) располагались в основном в северной тайге, в ельниках и сосняках черничных, на подзолистых почвах с высокой кислотностью верхних горизонтов, бедных элементами питания, в частности обменными основаниями, гумусом и азотом, и с бедным подзолистым горизонтом. Часть пробных площадей (16 шт.) размещена в сосняках сфагновой группы, произрастающих преимущественно на болотных верховых торфяных и торфяно-глеевых почвах.

Пробные площади в соответствии с принятыми в лесоустройстве стандартами закладывали на различном расстоянии от самых мощных региональных источников выбросов – Архангельского ЦБК (г. Новодвинск) и Архан-

гельской ТЭЦ (г. Архангельск), с учетом преобладающих ветров. Они располагались вне зон влияния «низких» и «неорганизованных» источников эмиссии, авто- и железнодорожных магистралей, что предопределило их подверженность загрязнению в основном «высокими» источниками выбросов. Расстояние между пробными площадями вблизи источников выбросов составляло 0,5...1,0 км, в более удаленных районах – до 10...20 км. На каждой пробной площадке методом случайной выборки у основания ствола и на высоте 1,3 м с северной и южной сторон у 10...30 деревьев сосны и березы в вегетационный период (преимущественно 1997–1998 гг.) при помощи рамки определяли общее проективное покрытие эпифитными лишайниками (в процентах от площади субстрата), отбирали образцы эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и формировали один смешанный образец (массой в воздушно-сухом состоянии не менее 200 г) для проведения лабораторных анализов. Этот вид доминирует, составляя до 70...90 % покрытия эпифитными лишайниками и встречается в различных экологических условиях (встречаемость до 95 %). Общее проективное покрытие эпифитными лишайниками стволов сосны (на высоте 1,3 м) и березы (у основания ствола) относится к наиболее информативным и приемлемым для оценки степени загрязнения атмосферы [8].

Общее содержание серы (S) в образцах определяли турбидиметрическим методом [5], содержание тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu) – методом атомно-абсорбционной спектроскопии с распылением и атомизацией раствора в пламени на спектрофотометре «Спектр-5» [3]. Пробы готовили методом сухого озоления при температуре $t = 500$ °С с дальнейшей обработкой золы кислотами. Содержание ртути (Hg) определяли на анализаторе «Юлия-2М» [4]. Минерализацию проводили концентрированной азотной кислотой в герметических реакторах при $t = 180$ °С в течение 1 ч.

Районы аэротехногенного загрязнения соответствовали критериям, рассмотренным в работах [2, 8, 10]. Фоновые площадки заложены на удалении более 120 км от г. Архангельска (Мезенский, Пинежский районы Архангельской области и юго-запад НАО). Полученный при исследованиях материал обработан методами вариационной статистики при помощи пакета лицензионных программ Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Имеются данные [7], что содержание веществ в слоевищах разных видов листоватых и кустистых лишайников, отобранных с различных субстратов (коры разных древесных пород) достоверно не различается. В таблице приведены и проанализированы усредненные данные валового содержания S и тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg), полученные по смешанным образцам талломов *H. physodes* без учета древесной породы – форофита. Концентрация S в талломе *H. physodes* ельников черничных в районах аэротехногенного загрязнения достоверно в 1,4 раза ($t_{\text{факт}} = 4,00$; $t_{0,01} = 3,27$) превышает фоновый уровень. Хотя по максимальным показателям превышение в районах аэротехногенного

Содержание тяжелых металлов (мг/кг) и серы (%) в эфигтных лишайниках (в числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее арифметическое значение с ошибкой)

Районы	Pb	Cd	Zn	Cu	Hg	S
Аэротехногенного загрязнения *	0,55...75,09 6,78±1,43	0,01...0,25 0,10±0,01	16,24...423,29 53,28±7,80	1,40...12,20 5,14±0,27	0,005...0,56 0,24±0,01**	0,06...0,20 0,11±0,00
	2,28...10,25 5,91±0,70	0,05...0,16 0,10±0,01	23,09...47,12 33,49±2,27	4,30...9,82 6,24±0,50	0,10...0,32 0,22±0,02	0,05...0,15 0,09±0,01
	4,31...7,13 5,51±0,66	0,09...0,11 0,10±0,00	28,82...43,43 35,61±3,27	3,74...4,71 4,38±0,23	0,16...0,21 0,18±0,01	0,06...0,10 0,08±0,01
	1,45...15,87 5,84±0,85	0,04...0,19 0,12±0,01	31,17...54,89 42,57±1,56	3,75...6,44 4,97±0,18	0,15...0,34 0,23±0,02	0,06...0,20 0,10±0,01
	2,49...11,47 5,19±0,78	0,00...0,36 0,13±0,03	37,24...74,40 55,58±3,46	2,25...8,63 4,84±0,63	0,12...0,28 0,20±0,03****	0,06...0,13 0,08±0,01*****
	5,45...9,25 7,35±1,90	0,10...0,12 0,11±0,01	35,40...42,86 39,13±1,86	3,73...4,98 4,36±0,62	Не отр.	Не отр.
	* Локальный и субрегиональный территориальный уровень техногенного воздействия [9]. ** Число пробных площадей n = 46. *** n = 15. **** n = 6. ***** n = 7.					

загрязнения по Pb, Zn, Cu и Hg составляет соответственно 6,5; 5,7; 1,4 и 2,0 раза, усредненные показатели содержания тяжелых металлов достоверно не различаются. Можно отметить повышенное накопление S в *H. Physodes* в ельниках черничных по сравнению с сосняками черничными влажными ($t_{\text{факт}} = 4,00$; $t_{0,05} = 3,18$), а также Zn – по сравнению с сосняками сфагновыми ($t_{\text{факт}} = 2,44$; $t_{0,05} = 2,08$). Под крону у ели проникает меньше осадков, чем у сосны, что может препятствовать вымыванию этих биофильных элементов из эпифитных лишайников.

Накопление химических веществ в талломе *H. Physodes* зависит от их концентрации в воздухе, которая связана с метеорологическими условиями в районе загрязнения атмосферного воздуха (направлением и скоростью ветра, осадками, температурными инверсиями и др. факторами). Нами установлено [8], что концентрация серы в талломе *H. Physodes* в районе увеличивается с повышением расчетных концентраций диоксида серы (SO_2) и сероводорода (H_2S) в приземных слоях атмосферного воздуха в юго-западном направлении от Архангельской ТЭЦ и Архангельского ЦБК ($r = 0,46 \dots 0,63$; $s_r = 0,17 \dots 0,20$; $p < 0,05$ и $p < 0,01$ соответственно), а также с повышением концентрации H_2S в воздухе ($r = 0,39$; $s_r = 0,17$; $p < 0,01$) по северо-восточному румбу.

Ранее [8] было показано, что максимальное общее проективное покрытие (ОПП) эпифитными лишайниками сосны для всей совокупности изучаемых нами пробных площадей в ельниках и сосняках черничных с северной стороны дерева у основания ствола составляет (80 ± 5 %), с южной – значительно ниже (60 ± 4 %). На высоте 1,3 м эти показатели гораздо меньше (65 ± 3 и 39 ± 4 % соответственно). У березы максимальные показатели ОПП лишайников у основания ствола и на высоте 1,3 м почти не различаются, составляя $78 \dots 79 \pm 7$ % с севера и 84 ± 6 и 77 ± 4 % с юга. Максимальные показатели ОПП эпифитных лишайников в сосняках сфагновой группы достигают $55 \dots 60 \pm 4$ % в прикорневой части деревьев, на высоте 1,3 м – 45 ± 4 % с северной стороны и только 27 ± 4 % с южной стороны. Следовательно, различия с максимальными показателями покрытия сосны лишайниками, характерными для насаждений черничного типа леса, с северной стороны ствола составляют 20 %, с южной – 5 % у основания ствола и 12 % на высоте 1,3 м.

В Северо-Двинском бассейне и на Беломорско-Кулойском плато общая площадь покрытия стволов деревьев эпифитными лишайниками значительно изменяется, если фоновый уровень загрязнения атмосферы превышен в 2,0–2,5 раза [8]. Для условий Среднего Урала это превышение может составлять 1,5–2,3 раза [6]. По нашим данным, в сосняках сфагновой группы ОПП стволов деревьев лишайниками с северной стороны на высоте 1,3 м тесно и отрицательно коррелирует с расчетной концентрацией SO_2 в приземных слоях воздуха по юго-западному румбу ($r = -0,79$). Линейные зависимости ОПП эпифитными лишайниками стволов форофитов от расстояния до источника эмиссии довольно тесные (рис. 2), вклад фактора достоверен на принятых

уровнях значимости, особенно у сосны на высоте 1,3 м к северо-востоку (F – критерий, $p = 0,001$) и у основания ствола березы к юго-западу от источников выбросов (F – критерий, $p < 0,001$).

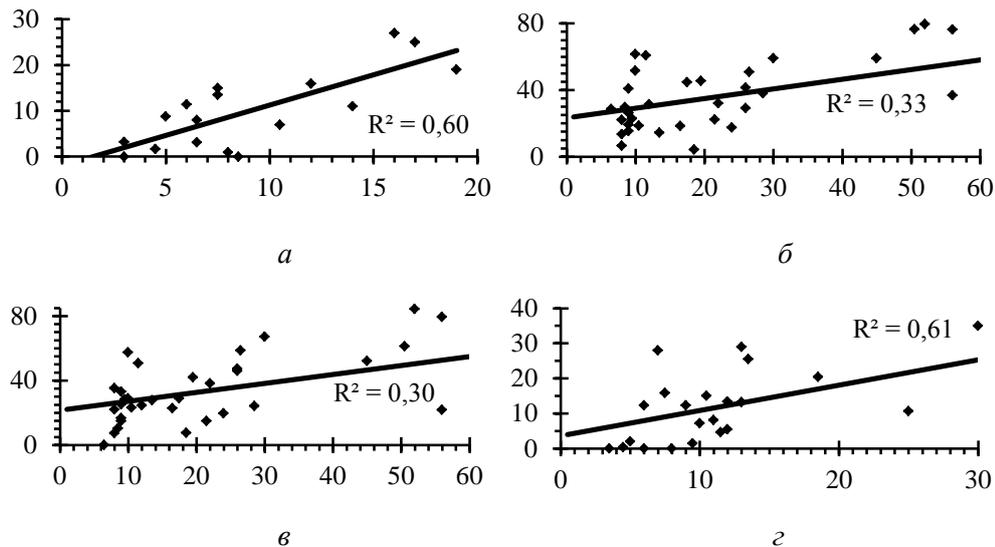


Рис. 2. Зависимость общего проективного покрытия стволов сосны на высоте 1,3 м (а – ю, СВ) и основания стволов березы (б – с, ЮВ; в – ю, ЮВ; г – ю, ЮЗ) эпифитными лишайниками от расстояния до источника выбросов (с, ю – соответственно северная и южная стороны ствола; СВ, ЮВ, ЮЗ – соответственно северо-восточный, юго-восточный, юго-западный румбы; вертикальная ось – ОПП, %; горизонтальная ось – расстояние до источника выбросов, км)

Связи покрытия стволов форофитов эпифитными лишайниками с содержанием в талломе тяжелых металлов слабые или отсутствуют. ОПП стволов сосны эпифитными лишайниками на высоте 1,3 м с южной стороны (без учета румба и типов леса) отрицательно и в слабой степени ($r = -0,40 \dots -0,42$; $s_r = 0,16 \dots 0,18$; $p < 0,05$) коррелирует с концентрацией Hg, Cu в талломе *H. Physodes*. Покрытие лишайниками основания стволов березы отрицательно и слабо коррелирует с концентрацией в талломе Hg и Cu ($r = -0,33 \pm 0,13 \dots -0,38 \pm 0,12$; $p < 0,05$). Это связано с отсутствием в регионе основных источников загрязнения тяжелыми металлами, в первую очередь металлургических и горно-обогатительных предприятий, как на Урале [6].

Заключение

В бассейне Северной Двины и на Беломорско-Кулойском плато аэротехногенное воздействие на разные компоненты лесных экосистем, в том числе на эпифитные лишайники, определяется главным образом выбросами кислотооб-

разующих сернистых соединений от АЦБК и Архангельской ТЭЦ. Концентрация серы в талломе эпифитных лишайников (*Hypogymnia physodes* L.) в ельниках черничных в районах аэротехногенного загрязнения в 1,4 раза выше чем в фоновых районах (на удалении более 120 км от Архангельска). Общей тенденцией аэротехногенной трансформации эпифитных лишайников является уменьшение их проективного покрытия в связи с влиянием соединений серы. Установлена прямая корреляция общего покрытия стволов сосны и березы эпифитными лишайниками на расстоянии до АЦБК и Архангельской ТЭЦ ($r = 0,55 \dots 0,78$), что свидетельствует о его уменьшении с приближением к источнику эмиссии. Это соответствует характеру деградации эпифитных лишайников в лесных насаждениях других промышленных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андерсон Ф.К., Трешоу М. Реакция лишайников на атмосферное загрязнение // Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 295–326.
2. Лобанова О.А., Надеин А.Ф., Тарханов С.Н., Кочерина Е.В. Химический состав осадков и снежного покрова как показатель аэротехногенного загрязнения окружающей среды Архангельской агломерации//Север. экология: сб. науч. тр. ИЭПС: Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. С. 40–54.
3. Методические рекомендации по спектральному определению тяжелых металлов в биологических материалах и объектах окружающей среды. М.: Госкомгидромет СССР, 1986. 51 с.
4. Методические указания по обнаружению и определению общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной адсорбции. М.: Центральный НИИ агрохимического обслуживания сельского хозяйства, 1990. 11 с.
5. Методические указания по турбидиметрическому определению серы в растениях. М.: Центральный НИИ агрохимического обслуживания сельского хозяйства, 1986. 9 с.
6. Михайлова И.Н., Воробейчик Е.Л. Эпифитные лишайники в условиях химического загрязнения: зависимости доза – эффект//Экология. 1995. № 6. С. 455–460.
7. Свирко Е.В., Страховенко В.Д. Тяжелые металлы и радионуклиды в слоевищах лишайников в Новосибирской области, Алтайском крае и Республике Алтай//Сиб. экол. журн. 2006. № 3. С. 385–390.
8. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Коновалов В.Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения. Диагностика состояния. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 333 с.
9. Черненко Т.В., Бочарников В.Н. Комплексная оценка и организация данных в системе биомониторинга лесных территорий//Лесоведение. 2003. № 1. С. 37–47.
10. Юдахин Ф.Н., Лобанова О.А., Тарханов С.Н. Аэротехногенное загрязнение окружающей среды Архангельской агломерации и прилегающих к ней территорий//Геоэкология, инженерная геология, геогидрология, геокриология. 2001. № 4. С. 369–375.
11. Dorozhkina M.V., Pavlova Ye.Yu., Budnikova L.L. Heavy metals in lichens and soils of Monchegorsk (Kola Peninsula)//The AMAP Intern. Symp. On environmental pollution of Arctic: Extended abstr. Troms, 1997. Vol. 1. P. 359–362.

12. *Le Blanc F., De Sloover J.* Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal//Can. y. Bot., 1970. Vol. 48, N 8. P. 1485–1496.

13. *Lippo H., Poikolainen J., Kubin E.* The use of moss, lichen and pine bark in the nationwide monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Finland//Water, Air and Soil Pollut. 1995. Vol. 85. P. 2241–2246.

14. *Melnikov S.A.* The state of the Arctic environment: Report on heavy metals. Rovaniemi: Arctic Centre, 1991. Vol. 2. P. 82–153.

15. *Reimann C., Caritat P. de, Halleraker J.H., Finne T.E., Boyd R., Jæger Ø., Volden T., Kashulina G., Bogatyrev I., Chekushin V., Pavlov V., Åyräs M., Räsänen M-L., Niskavaara H.* Regional atmospheric deposition patterns of Ag, As, Bi, Cd, Hg, Mo, Sb and Tl in a 188,000 km² area in the European Arctic as displayed by terrestrial moss samples – Long range atmospheric transport versus local impact // Atmospheric Environment. 1997. Vol. 31. P. 3887–3901.

16. *Stringer P.W., Stringer M.H.L.* Air pollution and distribution of epiphytic lichens and bryophytes in Winnipeg, Manitoba // Bryologist. 1974. Vol. 77. N 4. P. 405–426.

Поступила 19.12.14

UDC 631.524.6:582.9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.37

Influence of Aerotechnogenic Pollution on the Tree Trunks Coverage by Epiphytic Lichens in the Forest Plantations of the Northern Dvina Basin and the White Sea-Kuloi Plateau

S.N. Tarkhanov, Doctor of Biological Sciences, Senior Research Officer

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelks, 163000, Russian Federation; e-mail: tarkse@yandex.ru

Analysis of the lichen cover reveals the influence of technogenic pollution at the very initial stages of forest ecosystems degradation, when changes at phytocenosis are not yet registered. The purpose of our research is to study the accumulation of sulfur and heavy metals in the thallus of epiphytic lichens and the impact of aerotechnogenic pollution on the total projective cover of the tree trunks. The research was carried out by conventional methods in the sampling areas of the blueberry spruce forests and sphagnum pine forests in the Northern Dvina basin and the White Sea-Kuloi plateau. The estimation of sulfur and heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, Hg) in thallus of *Hypogymnia rhyodes* (L.) Nyl. in different growing conditions is given. The total projective cover of tree trunks of pine and birch by the epiphytic lichens is determined. The results demonstrate the regional (from the local emission sources) environmental contamination of thallus of epiphytic lichens by sulfur. Their heavy metal contamination is insignificant due to the absence of major metallurgical and mining and processing plants, and close to the background level. The general trend of aerotechnogenic transformation of epiphytic lichens is to reduce their projective cover because of the air pollution, especially by the sulfur compounds. The direct links of total cover of the phorophit trunks by epiphytic lichens with the distance to the Arkhangel'sk pulp and paper mill and heating enterprises are established. The total cover decreases with the approach to the source

of emissions. This corresponds to the nature of the degradation of epiphytic lichen cover in the forest plantations of other industrial regions.

Keywords: epiphytic lichens, *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., sulfur, heavy metals, total projective cover, atmospheric pollution.

REFERENCES

1. Anderson F.K., Treshou M. Reaktsiya lishaynikov na atmosfernoe zagryaznenie [Reaction of Lichens on Air Pollution]. *Zagryaznenie vozdukha i zhizn' rasteniy* [Air Pollution and Plant Life]. Leningrad, 1988, pp. 295–326.
2. Lobanova O.A., Nadein A.F., Tarkhanov S.N., Kocherina E.V. Khimicheskiy sostav osadkov i snezhnogo pokrova kak pokazatel' aerotekhnogenogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy Arkhangel'skoy aglomeratsii [Chemical Composition of Precipitation and Snow Cover as an Indicator of Aerotechnogenic Pollution of the Environment of the Arkhangelsk Agglomeration]. *Sever. ekologiya: sb. nauch. tr.* [The North Ecology: Proc.]. Yekaterinburg, 2000, pp. 40–54.
3. *Metodicheskie rekomendatsii po spektral'nomu opredeleniyu tyazhelykh metallov v biologicheskikh materialakh i ob"ektakh okruzhayushchey sredy* [Guidelines for the Spectral Determination of Heavy Metals in Biological Materials and Environmental Samples]. Moscow, 1986. 51 p.
4. *Metodicheskie ukazaniya po obnaruzheniyu i opredeleniyu obshchey rtuti v pishchevykh produktakh metodom besplamennoy atomnoy adsorbtsii* [Guidelines for the Detection and Determination of Total Mercury in Food by Flameless Atomic Absorption Method]. Moscow, 1990. 11 p.
5. *Metodicheskie ukazaniya po turbidimetricheskomu opredeleniyu sery v rasteniyakh* [Guidelines for the Turbidimetric Determination of Sulfur in Plants]. Moscow, 1986. 9 p.
6. Mikhaylova I.N., Vorobeychik E.L. Epifitnye likhenosinuzii v usloviyakh khimicheskogo zagryazneniya: zavisimosti doza – effect [Epiphytic Lichensynusia in Conditions of Chemical Pollution: the Dose–Effect Dependency]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1995, no. 6, pp. 455–460.
7. Svirko E.V., Strakhovenko V.D. Tyazhelye metally i radionuklidy v sloevishchakh lishaynikov v Novosibirskoy oblasti, Altayskom krae i Respublike Altay [Heavy Metals and Radionuclides in Lichen Thalli in the Novosibirsk Region, Altai Territory and Republic of Altai]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2006, no. 3, pp. 385–390.
8. Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Kononov V.N. *Lesnye ekosistemy basseyna Severnoy Dviny v usloviyakh atmosferного zagryazneniya. Diagnostika sostoyaniya* [Forest Ecosystems of the Northern Dvina Basin in Terms of Air Pollution. The Diagnostics]. Yekaterinburg, 2004. 333 p.
9. Chernen'kova T.V., Bocharnikov V.N. Kompleksnaya otsenka i organizatsiya dannykh v sisteme biomonitoringa lesnykh territoriy [Comprehensive Assessment and Data Management in the Biomonitoring System of Forest Areas]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2003, no. 1, pp. 37–47.
10. Yudakhin F.N., Lobanova O.A., Tarkhanov S.N. Aerotekhnogennoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy Arkhangel'skoy aglomeratsii i prilgayushchikh k ney territoriy [Aerotechnogenic Pollution of the Environment of the Arkhangelsk Agglomeration and Adjacent Territories]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Environmental Geoscience], 2001, no. 4, pp. 369–375.

11. Dorozhkina M.V., Pavlova Ye.Yu., Budnikova L.L. Heavy Metals in Lichens and Soils of Monchegorsk (Kola Peninsula). *The AMAP Intern. Symp. on Environmental Pollution of Arctic: Extended Abs.* Troms, 1997, vol. 1, pp. 359–362.

12. Le Blanc F., De Sloover J. Relation Between Industrialization and the Distribution and Growth of Epiphytic Lichens and Mosses in Montreal. *Can. J. Bot.*, 1970, vol. 48, no. 8, pp. 1485–1496.

13. Lippo H., Poikolainen J., Kubin E. The Use of Moss, Lichen and Pine Bark in the Nationwide Monitoring of Atmospheric Heavy Metal Deposition in Finland. *Water, Air and Soil Pollut.*, 1995, vol. 85, pp. 2241–2246.

14. Melnikov S.A. *The State of the Arctic Environment: Report on Heavy Metals.* Rovaniemi, 1991, vol. 2, pp. 82–153.

15. Reimann C., de Caritat P., Halleraker J.H., Finne T.E., Boyd R., Jæger Ø., Volden T., Kashulina G., Bogatyrev I., Chekushin V., Pavlov V., Äyräs M., Räisänen M.L., Niskavaara H. Regional Atmospheric Deposition Patterns of Ag, As, Bi, Cd, Hg, Mo, Sb and Tl in a 188,000 km² Area in the European Arctic as Displayed by Terrestrial Moss Samples – Long Range Atmospheric Transport Versus Local Impact. *Atmospheric Environment*, 1997, vol. 31, pp. 3887–3901.

16. Stringer P.W., Stringer M.H.L. Air Pollution and Distribution of Epiphytic Lichens and Bryophytes in Winnipeg, Manitoba. *Bryologist*, 1974, vol. 77, no. 4, pp. 405–426.

Received on December 19, 2014

УДК 582.47 (470.13)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.48

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КУЛЬТУРЫ СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ В СЫКТЫВКАРСКОМ ЛЕСНИЧЕСТВЕ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

© Л.Н. Гутий¹, асп., вед. специалист

А.Л. Федорков², д-р биол. наук, вед. науч. сотр.

¹Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, ул. Ленина, 39, г. Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167000; e-mail: lgutiy@mail.ru

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, ул. Коммунистическая, 28, г. Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167000; e-mail: fedorkov@ib.komisc.ru

Интродукция новых перспективных пород для ускоренного выращивания древесины является достаточно эффективным мероприятием при лесовосстановлении. Цель работы – исследование изменчивости жизненного состояния и высоты сосны скрученной и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах Республики Коми, заложённых в 2006 и 2007 гг. в Краснозатонском и Сыктывкарском участковых лесничествах. Для создания плантаций использовали семена сосны скрученной, полученные на 6 шведских лесосеменных плантациях, в качестве контроля – семена сосны обыкновенной местного происхождения. В ходе исследований измеряли высоту и оценивали жизненное состояние растений. Установлено, что сохранность сосны скрученной была лучше, чем сосны обыкновенной (79 и 58 % соответственно). По росту в высоту сосна скрученная также превосходит сосну обыкновенную. Следует отметить хорошую устойчивость сосны скрученной к грибным болезням, что способствовало лучшей сохранности в первые годы роста. Для статистического анализа был использован пакет программ Statistica 6.0. Выявлено, что отличия между сосной скрученной и сосной обыкновенной были статистически значимы ($p < 0,05$) по жизненному состоянию и росту в высоту. В свою очередь, происхождения сосны скрученной между собой статистически значимо не различаются. Важно отметить, что сосна скрученная достаточно устойчива в климатических условиях Республики Коми.

Ключевые слова: сосна скрученная, происхождение, жизненное состояние, высота, интродукция, лесосеменная плантация.

Введение

Естественный ареал сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) находится на западе Северной Америки, простираясь от Аляски на севере (64° с. ш.) до Калифорнии на юге (30° с. ш.), на востоке доходит до Скалистых гор, поднимаясь до 3900 м над уровнем моря.

Насаждения сосны скрученной в Канаде занимают примерно 20, в США – 5 млн га [13]. Древесина сосны скрученной по своим физико-механическим свойствам близка к древесине сосны обыкновенной и используется в основном для производства пиломатериалов и целлюлозы, а также в строительстве [12].

По результатам исследования 25–30-летних культур сосны скрученной в Карелии и Ленинградской области был сделан вывод о перспективности ее интродукции на северо-западе СССР [2]. Позднее сообщалось, что в 55-летнем возрасте эти культуры имеют высокую продуктивность (Ia класс бонитета) и устойчивы к местному климату [4]. Современный этап создания опытных культур сосны скрученной в Ленинградской, Архангельской областях и Республике Карелия относится к 80-м гг. XX в. [1, 4, 8]. Исследования, проведенные в этих регионах, показали, что сосна скрученная значительно обгоняет сосну обыкновенную по скорости роста [5–7, 11].

Методы исследования

Экспериментальные культуры в Краснозатонском участковом лесничестве были заложены весной 2006 г. двухлетними сеянцами с закрытой корневой системой. Площадь участка 1,0 га, было высажено 2076 сеянцев сосны скрученной и 455 сосны обыкновенной. Осенью 2007 г. в Сыктывкарском участковом лесничестве на площади участка 1,1 га также были высажены сеянцы с закрытой корневой системой: 2256 сеянцев сосны скрученной и 425 сеянцев сосны обыкновенной.

Происхождение материала сосны скрученной идентично на обоих участках – 6 шведских лесосеменных плантаций. В качестве контроля на участке в Краснозатонском участковом лесничестве использованы сеянцы сосны обыкновенной, выращенные из семян, собранных в естественных насаждениях Сысольского участкового лесничества и на Сысольской лесосеменной плантации (ЛСП) Республики Коми. На участке в Сыктывкарском участковом лесничестве использованы сеянцы сосны обыкновенной, выращенные из семян, собранных в естественных насаждениях Сыктывкарского участкового лесничества и на Сыктывкарской ЛСП [9]. Схема опыта на обоих участках – рядовые делянки (8 вариантов), размещенные рендомизированно в 4–6-кратной повторности.

Исследование было проведено осенью 2013 г. Жизненное состояние растений при исследовании экспериментальных культур оценивалось по следующей классификации: 1-й класс – здоровое растение, почки здоровые, ствол прямой; 2-й класс – слабо поврежденное растение, состояние хорошее, имеются незначительные повреждения хвои, верхушечная и боковые почки здоровые, ствол прямой; 3-й класс – сильно поврежденное растение, состояние плохое, около 30 % хвои повреждено, верхушечная почка повреждена или погибла, рост замедлен; 4-й класс – погибшее растение. Высота измерялась у всех выживших растений.

На первом этапе статистического анализа вычисляли средние значения жизненного состояния и высоты для каждой делянки. Для оценки степени достоверности различий между выборочными средними проводили дисперсионный анализ с использованием пакета программ Statistica 6.0.

Результаты исследования

Рассчитанная в целом по обоим участкам сохранность растений сосны в 6–8-летнем возрасте составила 79 (для скрученной) и 58 % (для обыкновенной).

Дисперсионный анализ показал статистическую значимость отличий сосны скрученной от сосны обыкновенной ($p < 0,05$) по жизненному состоянию и росту в высоту (табл. 1).

Таблица 1
Дисперсионный анализ жизненного состояния и роста в высоту
сосны обыкновенной и сосны скрученной
в экспериментальных культурах в 6–8-летнем возрасте

Источник варьирования	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий	p-значение
<i>Жизненное состояние</i>				
Порода	1	3,546	10,270	0,002
Происхождения сосны скрученной	5	0,186	0,551	0,737
<i>Высота</i>				
Порода	1	2,529	10,580	0,002
Происхождения сосны скрученной	5	0,095	0,397	0,849

Сосна скрученная обгоняет сосну обыкновенную по высоте в среднем на 21...35 %, при этом жизненное состояние сосны скрученной лучше, чем у сосны обыкновенной (табл. 2).

Таблица 2
Жизненное состояние (класс) и высота растений (см) сосны скрученной
и сосны обыкновенной (с 95 %-м доверительным интервалом) в 6–8-летнем возрасте

Происхождение	Жизненное состояние			Высота		
	Среднее значение	-95%	+95%	Среднее значение	-95%	+95%
<i>Сосна скрученная</i>						
Нарлинге	1,88	1,55	2,21	2,08	1,80	2,35
Оппала	1,81	1,46	2,15	2,09	1,80	2,37
Скорсерум	2,09	1,75	2,43	1,96	1,67	2,25
Ларслунд	1,96	1,62	2,30	1,97	1,68	2,25
Румхулт	1,71	1,34	2,08	1,99	1,68	2,30
Остерби	2,06	1,70	2,41	1,88	1,58	2,17
<i>Сосна обыкновенная</i>						
Естественные насаждения	2,48	2,11	2,85	1,55	1,24	1,86
Лесосеменные плантации	2,34	1,96	2,71	1,63	1,32	1,94

Происхождения сосны скрученной не различаются статистически значительно между собой по жизненному состоянию и высоте, хотя наблюдается тренд в сторону лучшего жизненного состояния северных происхождений по сравнению с южными (табл. 1, 2). Полученные результаты о превосходстве сосны скрученной над сосной обыкновенной по скорости роста соответствуют имеющимся в литературе [5–7, 11, 14]. Причинами этого является более продолжительный период роста сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной [8, 10, 14], а также лучшее развитие ассимиляционного аппарата [11].

Наши данные о лучшей сохранности (на 21 %) сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной не согласуются с результатами, полученными в 2011 г. с использованием идентичного по происхождению материала в экспериментальных культурах Ухтинского, Сторожевского и Койгородского лесничеств Республики Коми [14], согласно которым жизненное состояние сосны скрученной было хуже, чем местной сосны обыкновенной. Исследование, проведенное ранее в Финляндии, также свидетельствует о более высокой (на 14 %) сохранности сосны обыкновенной по сравнению с сосной скрученной [16].

Одна из причин этого заключается в том, что сосна скрученная характеризуется повышенной устойчивостью к грибным болезням типа «шютте» по сравнению с сосной обыкновенной [15]. Саженьцы сосны обыкновенной на исследованных участках серьезно пострадали в первые годы от «снежного шютте», особенно на участке с осенней посадкой.

Второй причиной, видимо, могли быть серьезные повреждения растений, что наблюдалось [3] у интродуцированных древесных пород в дендрологических садах и городских посадках зимой 2010 г. Поскольку исследованные нами культуры были заложены в 2006–2007 гг., они избежали серьезных повреждений зимой 2010 г., потому что саженьцы (особенно на участке 2007 г.) находились под защитой снежного покрова из-за небольшой высоты.

При исследовании культур на участке Сыктывкарского участкового лесничества было отмечено, что определенный вред сосне скрученной причинили также мышевидные грызуны, которые повредили 4 % саженьцев. Такие же повреждения были отмечены ранее Б.Л. Стафеевым в Архангельской области [8].

Таким образом, результаты исследования экспериментальных культур сосны скрученной на двух участках Сыктывкарского лесничества показали хорошую сохранность, быстрый рост в высоту, устойчивость к климатическим условиям. Для ответа на вопрос о перспективности выращивания сосны скрученной в Республике Коми необходимо провести дальнейшие исследования, в частности оценить сохранность, объем и качество стволов сосны скрученной в экспериментальных культурах старшего возраста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.М., Жигунов А.В., Бондаренко А.С., Бурцев Д.С.* Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области//Лесн. журн. 2014. № 3. С. 24–33. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. *Гиргидов Д.Я.* Культуры сосны Муррея и дуба красного в северо-западных районах СССР//Лесн. хоз-во. 1952. № 7. С. 8–13.
3. *Мартынов Л.Г.* О перезимовке древесных растений в ботаническом саду Института биологии Коми научного центра в 2009–2010 гг.//Изв. КомиНЦ УрО РАН. Вып. 3 (11). Сыктывкар, 2012. С. 46–51
4. *Мордась А.А., Раевский Б.В.* Всхожесть семян и рост сосны скрученной в Карелии//Лесоведение. 1992. № 1. С. 89–93.
5. *Раевский Б.В.* Ход роста смешанных культур сосны скрученной и сосны обыкновенной в южной Карелии//Изв. КомиНЦ УрО РАН. 2010. № 1. С. 31–38.
6. *Раевский Б.В., Мордась А.А.* Рост и продуктивность испытательных культур сосны скрученной в южной Карелии//Лесн. журн. 2000. № 5–6. С. 74–82. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Раевский Б.В., Пеккоев А.Н.* Перспективы выращивания сосны скрученной в Южной Карелии // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. СПб: СПбНИИЛХ, 2013. С. 182–193.
8. *Стафеев Б.Л.* Северо-американская сосна скрученная – перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области//Вопросы интродукции хозяйственно-ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: АИЛиЛХ, 1989. С. 35–43.
9. *Федорков А.Л., Туркин А.А.* Экспериментальные культуры сосны скрученной в Республике Коми//Лесоведение. 2010. № 1. С. 70–74.
10. *Феклистов П.А., Бирюков С.Ю.* Сезонный рост сосны скрученной в северной подзоне тайги//Лесн. журн. 2006. № 6. С. 24–29. (Изв. высш. учеб. заведений).
11. *Феклистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л.* Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги // Архангельск: АГТУ, 2008. 118 с.
12. *Элайс Томас С.* Североамериканские деревья: определитель/Пер. с англ. под ред. И.Ю. Коропачинского. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2014. 959 с.
13. *Elfving B., Ericsson T., Rosvall O.* The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // Forest Ecology and Management. 2001. N 141(1–2). P. 15–29.
14. *Fedorkov A.* Swedish lodgepole pine seed orchard crops tested in north-west Russia // Scandinavian Journal of Forest Research. 2009. N 4. P. 410–423.
15. *Segebaden G.* Lodgepole pine in Sweden A situation report // Pinus contorta from untamed forest to domesticated crop. Department of Forest Genetics and Plant Physiology. Swedish University of Agricultural Sciences. Report 11. 1993. P. 8–23.
16. *Varmola M, Salminen H., Rikala R., Kerkelä M.* Survival and early development of lodgepole pine // Scandinavian Journal of Forest Research. 2012. N 27. P. 675–680.

Поступила 20.01.15

УДК 582.47 (470.13)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.48

Experimental Plantations of Lodgepole Pine in the Syktyvkar Forestry in the Komi Republic

L.N. Gutiy¹, Postgraduate Student, Head Researcher

A.L. Fedorkov², Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher

¹Syktyvkar Forest Institute – Branch of Saint Petersburg State Forest Technical Academy named after S.M. Kirov, Lenin st., 39, Syktyvkar, Komi Republic, 167000, Russian Federation; e-mail: lgutiy@mail.ru

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, Komi Republic, 167000, Russian Federation; e-mail: fedorkov@ib.komisc.ru

Introduction of new promising species for accelerated wood growth is quite effective in reforestation. The aim of the paper is to study variability of vitality and the height of Lodgepole pine and Scots pine in the experimental plantations in the Komi Republic, founded in 2006 and 2007 in the Kranozatonskoe and Syktyvkar forestries. The seeds of Lodgepole pine from six Swedish seed plantations were used. As a control we used the seeds of Scots pine of local origin. In the course of the research the height and vitality of plants were measured. The capacity for survival of Lodgepole pine was better than Scots pine (79 % and 58 % respectively). Lodgepole pine exceeded Scots pine in height growth. Lodgepole pine had a good resistance to fungal diseases. That fact also contributed to the better capacity for survival in the first years of growth. Software package Statistica 6.0 was used for the statistical analysis. The differences between Lodgepole pine and Scots pine were statistically significant ($p < 0.05$) by vitality and height growth. In turn, the origins of Lodgepole pine were not statistically different. It is important to note, that Lodgepole pine is sufficiently stable under the climatic conditions of the Republic of Komi.

Keywords: origin, vitality, height, introduction, seed plantation, research.

REFERENCES

1. Alekseev V.M., Zhigunov A.V., Bondarenko A.S., Burtsev D.S. Introduktsiya sosny skruchennoy v usloviyakh Leningradskoy oblasti [Introduction of Lodgepole Pine in the Leningrad Region]. *Lesnoy zhurnal*, 2014, no. 3, pp. 24–33.
2. Girgidov D.Ya. Kul'tury sosny Murreya i duba krasnogo v severo-zapadnykh rayonakh SSSR [Pinus murrayana and Spanish Oak Crops in the North-Western Regions of the USSR]. *Lesnoy zhurnal*, 1952, no. 7, pp. 8–13.
3. Martynov L.G. O perezimovke drevesnykh rasteniy v botanicheskom sadu Instituta biologii Komi nauchnogo tsentra v 2009–2010 gg. [On the Wintering of the Woody Plants in the Botanical Garden of Institute of Biology of the Komi Scientific Center in 2009–2010]. *Izvestiia Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proc. of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences], 2012, no. 3 (11), pp. 46–51.
4. Mordas' A.A., Raevskiy B.V. Vskhozhest' semyan i rost sosny skruchennoy v Karelii [The Germinating Ability and the Growth of Lodgepole Pine in Karelia]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1992, no. 1, pp. 89–93.

5. Raevskiy B.V. Khod rosta smeshannykh kul'tur sosny skruchennoy i sosny obyknovennoy v yuzhnoy Karelii [The Growth Course of the Mixing Cultures of Lodgepole Pine and Scots Pine in the Southern Karelia]. *Izvestiia Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proc. of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences], 2010, no. 1, pp. 31–38.
6. Raevskiy B.V., Mordas' A.A. Rost i produktivnost' ispytatel'nykh kul'tur sosny skruchennoy v yuzhnoy Karelii [Growth and Productivity of the Experimental Plantations of Lodgepole Pine in the Southern Karelia]. *Lesnoy zhurnal*, 2000, no. 5–6, pp. 74–82.
7. Raevskiy B.V., Pekkoev A.N. Perspektivy vyrashchivaniya sosny skruchennoy v Yuzhnoy Karelii [Prospects for Growing of Lodgepole Pine in the Southern Karelia]. *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaystve – 2013: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ch. 2*. [Innovations and Technology in Forestry – 2013: Proc. of III Intern. Sci. and Prac. Conf. Part 2], 2013, pp. 182–193.
8. Stafeev B.L. Severo-amerikanskaya sosna skruchennaya – perspektivnaya poroda dlya introduktsionnogo ispytaniya v Arkhangel'skoy oblasti [North American Lodgepole Pine is a Perspective Species for Introduction to the Arkhangelsk Region]. *Voprosy introduktsii khozyaystvenno-tsennykh drevesnykh porod na Evropeyskiy Sever* [Problems of Introduction of Commercially Valuable Tree Species in the European North]. Arkhangelsk, 1989, pp. 35–43.
9. Fedorkov A.L., Turkin A.A. Eksperimental'nye kul'tury sosny skruchennoy v Respublike Komi [The Experimental Plantations of Lodgepole Pine in the Komi Republic]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2010, no. 1, pp. 70–74.
10. Feklistov P.A., Biryukov S.Yu. Sezonnnyy rost sosny skruchennoy v severnoy podzone taygi [Seasonal Growth of Lodgepole Pine in the Northern Taiga Subzone]. *Lesnoy zhurnal*, 2006, no. 6, pp. 24–29.
11. Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyayev A.L. *Sravnitel'nye ekologo-biologicheskie osobennosti sosny skruchennoy i obyknovennoy v severnoy podzone evropeyskoy taygi* [Comparative Ecological and Biological Characteristics of Lodgepole Pine and Scots Pine in the Northern Subzone of the European Taiga]. Arkhangelsk, 2008. 118 p.
12. Elias Thomas S. *Field Guide to North American Trees*. Danbury, 2014. 959 p.
13. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The Introduction of Lodgepole Pine for Wood Production in Sweden – a Review. *Forest Ecology and Management*, 2001, no. 141(1–2), pp. 15–29.
14. Fedorkov A. Swedish Lodgepole Pine Seed Orchard Crops Tested in North-West Russia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, no. 4, pp. 410–423.
15. Segebaden G. Lodgepole Pine in Sweden – a Situation Report. *Pinus contorta – from Untamed Forest to Domesticated Crop. Department of Forest Genetics and Plant Physiology. Swedish University of Agricultural Sciences. Report 11*, 1993, pp. 8–23.
16. Varmola M., Salminen H., Rikala R., Kerkelä M. Survival and Early Development of Lodgepole Pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, no. 27, pp. 675–680.

Received on January 20, 2015

УДК 674.032.475.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.55

КОРНЕВАЯ СИСТЕМА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРОТАЕЖНОЙ ЗОНЫ

© *О.Н. Тюкавина, канд. с.-х. наук, доц.*

В.Н. Евдокимов, канд. биол. наук, доц.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: olga-tukavina@yandex.ru

Сосна обыкновенная может приспосабливаться к различным экологическим условиям, развивая как глубоко идущую, так и поверхностную корневую систему. Данные о строении и развитии корневых систем сосны позволяют повысить эффективность лесокультурных, лесохозяйственных и гидротехнических мероприятий в лесопарковом хозяйстве, выявить опасные и аварийные деревья. Устойчивость деревьев связана с распределением скелетных корней в плоскости и их размерами. Поэтому целью исследования являлось изучение структуры корневой системы сосны в Архангельском лесничестве (Архангельская область). Исследования по изучению строения корневой системы сосны проводились в сосняках лишайниковом, мохово-лишайниковом, черничном и долгомошном. Корневую систему подроста и деревьев сосны изучали путем частичного или полного освобождения ее от почвы. Установлено, что в сосняке лишайниковом формируется полноценно развитый стержневой корень. В остальных типах леса стержневой корень имеет резко сбежистую форму (форму «редьки») или не развивается. У зрелых деревьев в сосняке черничном, долгомошном, мохово-лишайниковом четко выраженный стержневой корень отсутствует. В процессе взросления дерева он переходит в хорошо развитые горизонтальные корни или принимает горизонтальное направление. До 10-летнего возраста корневая система подроста развивается одинаково в различных типах леса. В более старшем возрасте происходит дифференциация структуры и параметров корневой системы в зависимости от условий произрастания. Превышение доли вертикальных корней после 10-летнего возраста указывает на наличие патологии корневой системы или нижней части ствола. Мощность корнеобитаемого слоя в сосняке черничном больше, но проникновение вглубь вертикальных корней и радиус скелетных корней преобладают в сосняке лишайниковом. Следовательно, устойчивость наземной части деревьев в сосняке лишайниковом формируется за счет развития стержневого и скелетных корней, в сосняке черничном – в результате значительной разветвленности как вертикальных, так и горизонтальных корней. Высокая вероятность вывала деревьев в сосняке долгомошном связана не только с поверхностной корневой системой, но и с патологией ее развития.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, корневая система, стержневой корень, скелетные корни.

Сосна обыкновенная является одной из основных лесообразующих хозяйственно-ценных древесных пород северных регионов. На территории Архангельской области сосна имеет большую площадь распространения. Сосняки приурочены главным образом к песчаным отложениям, склонам холмов

и занимают около $\frac{1}{4}$ покрытых лесом площадей. К сухим условиям произрастания тяготеют сосняки лишайниковые и брусничные, характерные для маломощных и среднемощных песчаных и супесчаных подзолов с глубоким залеганием грунтовых вод. Сосняки черничные распространены на подзолах маломощных и среднемощных песчаных и супесчаных, подстилаемых суглинками с удовлетворительными дренажными условиями. Сосняки долгомошные и сфагновые ассоциированы с торфянистыми, торфяно-глеевыми и торфяно-верховыми подзолами, подстилаемыми водоупорными суглинками [5]. Корневая система сосны очень пластична. Благодаря этому она может приспосабливаться к различным экологическим условиям, развивая как глубоко идущую, так и поверхностную корневую систему. На легких почвах, которые для произрастания сосны наиболее благоприятны, развиваются корни как горизонтальной, так и вертикальной ориентации. Основная масса тонких всасывающих и проводящих корней находится в верхних горизонтах почвы. Якорные корни могут уходить на значительную глубину, заканчиваясь там метлообразными разветвлениями [14]. Якорные корни в большинстве случаев формируются с 25...30 лет [3]. Мощную корневую систему со слабо развитым стержневым корнем, но исключительно сильно развитыми боковыми корнями, располагающимися на небольшой глубине параллельно поверхности на песчаных почвах, отмечает ряд авторов [3, 7–9, 13, 14, 16, 17]. На заболоченных почвах и верховых болотах сосна формирует типично поверхностную корневую систему. Вертикальные корни отсутствуют, некоторые скелетные корни заканчиваются своеобразными пучками, «лапами», с многочисленными живыми и отмершими корнями [1, 2, 4]. В сосняках черничных формируется мощная корневая система с развитым стержневым («редькой») и боковыми корнями. Большая масса корней всех фракций сосредоточена в самой верхней части почвенного профиля, но в небольшом количестве они распределены по всему почвенному профилю [14]. В условиях достаточного увлажнения почвы, при уменьшении уровня ее потенциального плодородия, сосна образует менее интенсивную стержневую часть корневой системы, но существенно увеличивает вертикальные ответвления от горизонтальных корней, позволяющие более интенсивно использовать верхние наиболее плодородные слои почвы по всей глубине их залегания [6].

Пластичность корневой системы может выражаться через степень изменения ее структуры. Под структурой корневой системы понимается соотношение трех категорий корней: горизонтальных, стержневых, вертикальных ответвлений от горизонтальных корней [6]. Соотношение данных групп корней показывает устойчивость дерева к ветровалу, его резистентность к различным факторам среды, адаптивность и способность к регенерации. В зависимости от выполняемой функции корни подразделяются на скелетные и тонкие (менее 3 мм). Основным фундаментом дерева является корневая лапа. Она располагается от шейки корня в радиусе до 6 его диаметров. Корни этой зоны имеют форму клиньев и переходят в скелетные корни, имеющие цилиндриче-

скую форму. Эти группы корней выполняют механическую функцию по удержанию дерева в почве, поэтому для выявления аварийных деревьев необходимо определять радиус распространения скелетных корней, равномерность их распределения вокруг ствола дерева. Всасывающие корни образуются как на длинных горизонтальных корнях, так и на вертикальных, но основная их часть располагается на тонких (менее 1 мм) проводящих корнях, представляющих систему последнего порядка ветвления [1]. Тонкие корни (менее 3 мм) повышают интенсивность использования занятого объема почвы и формируют зону почвенного питания растения. Основная масса тонких корней сосредоточена в верхнем 20-сантиметровом слое почвы при различных условиях произрастания [1, 6, 12, 14, 19]. С возрастом дерева увеличивается интенсивность ветвления корней, т. е. повышается плотность корней в верхнем слое почвы и увеличивается площадь корневого питания. Следовательно, радиус распространения тонких корней больше радиуса распространения скелетных корней. Радиус корней, обеспечивающих механическую устойчивость дерева, будет меньше радиуса корневого питания. В зависимости от поставленных задач необходимо определять зону корневого питания дерева. Это связано с трудоемкими кропотливыми исследованиями с применением микроскопа по методикам А.Я. Орлова [10, 11], И.Н. Рахтеенко [13] или достаточно определить радиус скелетных корней путем поверхностной раскопки по ходу корней. При раскопках желательно учитывать тонкие корешки сосны без волосков, корневые мочки темно-коричневого цвета, отходящие веерообразно, и скелетные корни светло-коричневого цвета с длинными шелушащимися чешуйками покровной ткани.

Данные о строении и развитии корневой системы сосны позволяют повысить эффективность лесокультурных, лесохозяйственных и гидротехнических мероприятий. В лесопарковом хозяйстве и насаждениях города важна правильная оценка опасных и аварийных деревьев. Устойчивость дерева связана с распределением скелетных корней в плоскости и их размерами. Поэтому исследования корневых систем деревьев актуальны и востребованы.

Изучением корневых систем занимались многие ученые. Большинство работ относятся к более южным районам лесной зоны. В условиях северотаежной подзоны корневая система деревьев изучена недостаточно.

Целью исследования являлось изучение структуры корневой системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в северотаежной подзоне на примере Архангельского лесничества Архангельской области.

Исследования по изучению строения корневых систем сосен проводили в сосняках лишайниковом, мохово-лишайниковом, черничном и долгомошном. Сосняки чистые с примесью березы, в сосняке черничном – с примесью березы и ели. Полнота древостоев составляла 0,6, средний возраст 60...80 лет. Почвы в сосняке лишайниковом и мохово-лишайниковом песчаные свежие, в сосняке черничном – слабоподзолистые, иллювиально-железистые, супесчаные на моренном суглинке, в сосняке долгомошном – супесчаные влажные на су-

глинке. В каждом типе леса подбирали модельные деревья разного возраста, у которых полностью или наполовину освобождали корневую систему от почвы.

В сосняке лишайниковом у сосны хорошо развиваются корни горизонтальной и вертикальной ориентации. Корневая система с развитым стержневым корнем есть и у подростка, и 150-летних деревьев. Из рассмотренных типов леса только в сосняке лишайниковом отмечается стержневой корень у деревьев в возрасте зрелости [15]. К.С. Бобкова [1] так же указывала на формирование сосной стержневой корневой системы на песчаных почвах. Вероятно, это является особенностью сосны, произрастающей в подзоне средней тайги. В остальных типах леса стержневой корень имеет резко сбежистую форму (форму «редьки») или не развивается. У зрелых деревьев в сосняке черничном, долгомошном, мохово-лишайниковом четко выраженный стержневой корень отсутствует. В процессе взросления дерева он переходит в хорошо развитые горизонтальные корни или принимает горизонтальное направление.

До 10 лет длина стержневого корня у подростка одинакова при различных условиях произрастания и составляет около 10 см (рис. 1).

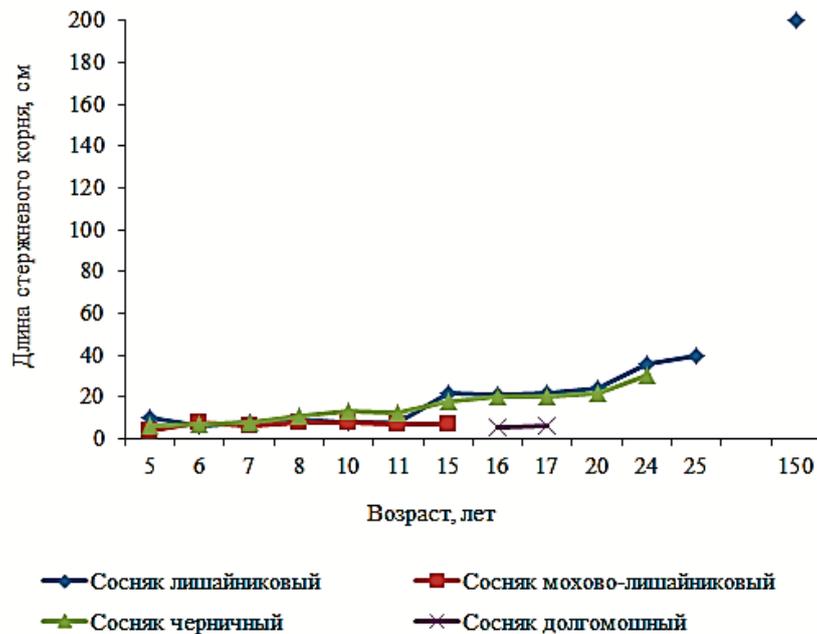


Рис. 1. Развитие стержневого корня сосны с возрастом

В более старшем возрасте темпы развития стержневого корня различаются. В сосняке долгомошном стержневой корень или не формируется, или не превышает 10 см. С возрастом в данных условиях увеличивается масса горизонтальных корней и корней меньших порядков. Стержневой корень не формируется у подростка с искривленным стволиком в области шейки корня. Стволик

располагается сначала горизонтально, а потом занимает вертикальное положение. Вероятно, это связано с выжиманием подроста на влажных почвах. Так как нижняя часть молодого стволика находится в постоянном контакте с почвой, на нем начинает формироваться совокупность вертикальных корней. Горизонтальные корни тоже формируются, но исключительно в направлении первичной корневой системы. Неравномерность расположения корней вокруг ствола способствует ветровалу деревьев. Следовательно, ветровал сосны в долгомошном типе леса связан в основном не с поверхностной корневой системой, а с неравномерностью расположения скелетных корней.

Особенностью развития корневой системы сосны в сосняке мохово-лишайниковом является интенсивное развитие горизонтальных корней. От горизонтальных корней отходят вертикальные корни. Такая корневая система позволяет улавливать атмосферные осадки и использовать верхние наиболее плодородные слои почвы. Устойчивость деревьев будет зависеть от протяженности горизонтальных корней и равномерности их распределения вокруг ствола.

В сосняке черничном формируется мощная корневая система за счет большого количества (более 7) отходящих от шейки корня скелетных корней с интенсивным ветвлением. От горизонтальных корней отходят не только сильно ветвящиеся корни больших порядков, но и вертикальные. Стержневой корень на глубине 20 см переходит в горизонтальное положение, но крупные вертикальные ответвления от скелетных корней проникают на глубину до 2 м.

У подроста до 10 лет корневая система осваивает верхний слой почвы мощностью до 20 см. Но горизонтальные корни отмечаются лишь в верхнем 10-сантиметровом слое почвы (см. таблицу). С возрастом деревьев проникновение отдельных вертикальных корней вглубь происходит интенсивнее в сосняке лишайниковом по сравнению с сосняком черничным: в молодом возрасте – в 2,5 раза, в зрелом возрасте – в 1,5 раза (рис. 2). Однако мощность корнеобитаемого слоя почвы выше в сосняке черничном (рис. 3). Под корнеобитаемым слоем почвы в данном исследовании понимается область интенсивного ветвления основных корней, без учета тонких корней и всасывающих. С 20 лет корневая система сосны в черничном типе леса интенсивно использует весь освоенный корнями почвенный профиль, это связано с благоприятными водным и воздушным режимами и наличием питательных веществ. Многие авторы отмечают, что корневая система интенсивно развивается, ветвится в благоприятных условиях, особенно при наличии питательных веществ. Неравномерное распределение питательных элементов в почве может приводить к скученности корней в зонах с лучшими условиями [18]. Следовательно, на распределение корней относительно корневой шейки влияют качественные характеристики почвы и наличие препятствий для развития корней. Препятствиями могут быть более плотные горизонты, включения [1, 12, 14], а в городской среде – антропогенные объекты [19]. В связи с множественностью факторов, влияющих на развитие корневой системы, можно лишь предполагать о типе корневой системы, наиболее распространенном в конкретных условиях, но нельзя прогнозировать ее количественные характеристики.

Разнообразие параметров корневой системы в пределах одного возраста для сходных лесорастительных условий представлено в таблице.

Характеристика корневой системы сосны

Возраст, лет	Глубина проникновения корней, см	Мощность корнеобитаемого слоя почвы, см	Процент от суммарной протяженности корней, %		Радиус распространения скелетных корней, см
			вертикальных	горизонтальных	
<i>Сосняк лишайниковый</i>					
5	17	7	30	70	6
6	8	8	17	83	13
6	29	7	43	57	7
8	19	7	20	80	11
11	14	10	17	83	13
15	42	14	12	88	30
25	50	18	12	88	48
25	60	13	9	91	50
150	200	45	–	–	400
<i>Сосняк мохово-лишайниковый</i>					
2	3	3	57	43	3
3	11	11	82	18	4
5	8	4	53	47	14
6	11	9	10	90	14
7	13	5	48	52	10
10	17	6	38	62	90
15	6	6	7	93	11
180	120	50	–	–	260
<i>Сосняк черничный</i>					
5	12	12	28	72	7
10	11	11	33	67	8
10	17	9	12	88	15
20	30	30	13	87	20
24	16	16	2	98	30
110	150	150	–	–	300
<i>Сосняк долгомошный</i>					
16	12	12	63	37	5
17	10	10	24	76	30
20	16	16	12	88	30
20	30	30	51	49	30
20	10	10	6	94	8
25	16	10	0	100	30
150	20	20	–	–	100

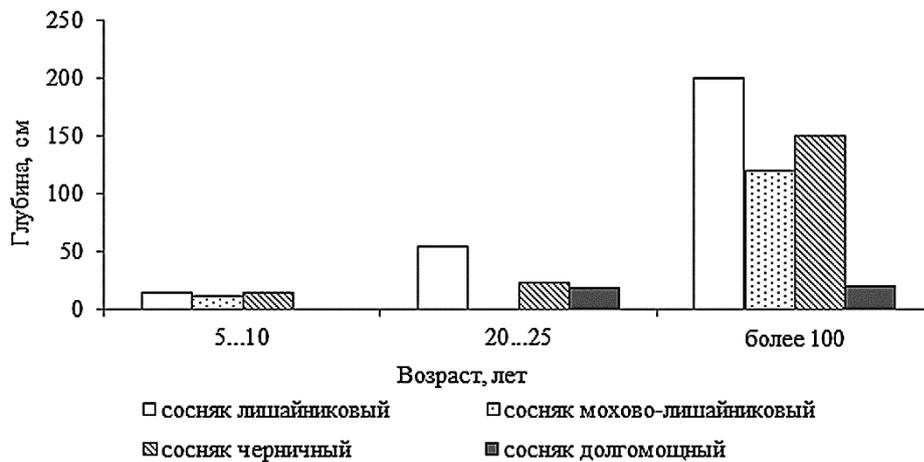


Рис. 2. Глубина проникновения корней сосны в разных условиях произрастания

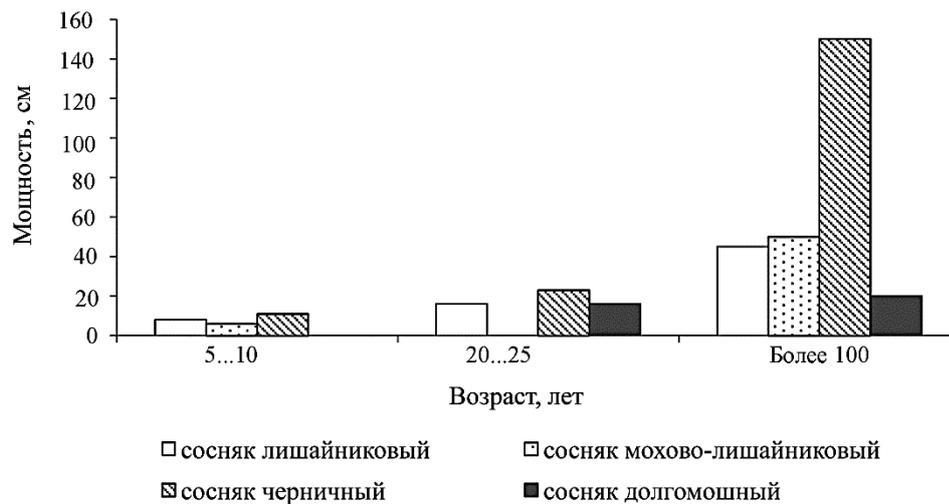


Рис. 3. Мощность корнеобитаемого слоя почвы в разных типах леса

В сосняке долгомошном корневые системы деревьев не проникают глубже 20 см, но этот слой почвы осваивается ими интенсивно.

Во всех рассматриваемых типах леса протяженность горизонтальных корней выше, чем вертикальных (см. таблицу). Однако на примере сосняка мохово-лишайникового можно отметить, что до 5 лет у подростка идет формирование стержневого корня. В этот период протяженность вертикальных корней в 1,5 – 4,5 раза больше горизонтальных. Затем происходит развитие горизонтальных корней и соотношение суммарных длин вертикальных и горизонтальных корней выравнивается, начинает доминировать последняя группа.

Если после 5 лет преобладают вертикальные корни, то это означает наличие патологии в развитии корневой системы или стволика у подростка. Так, в сосняке мохово-лишайниковом у 5- и 7-летнего подростка преобладание вертикальных корней связано с односторонним (флагообразным) развитием корневой системы. Причины могут быть разнообразные: от корневой конкуренции с взрослыми деревьями, лучшие участки почвы по минеральному питанию до наличия включений в почве, преград для развития корневой системы. Так как горизонтальные корни развиваются неравномерно относительно шейки корня, подрост укореняется вертикальными корнями. В сосняке долгомошном у 16- и 20-летнего подростка преобладание вертикальных корней связано с искривлением нижней части стволика, поэтому часть вертикальных корней отходит от шейки корня и даже от нижней части ствола.

В рассматриваемых насаждениях у сосны от шейки корня отходят 4–6 скелетных корней, в сосняке черничном – до 8. Наибольший радиус распространения основных скелетных корней отмечен в сосняке лишайниковом и составляет 4 м, в сосняке черничном – 3 м, в сосняке долгомошном – 1 м. При изучении радиуса распространения основных скелетных корней у деревьев в возрасте более 100 лет измеряли длину корня до толщины 1 см, т. е. радиус зоны, отвечающей за стабильность наземной части дерева.

Таким образом, в сосняке лишайниковом у сосны формируются полноценно развитые стержневые корни. До 10-летнего возраста корневая система подростка развивается одинаково в различных типах леса. Превышение доли вертикальных корней после 10-летнего возраста указывает на наличие патологии корневой системы или нижней части ствола. Мощность корнеобитаемого слоя в сосняке черничном больше, чем в других типах леса. Но проникновение вглубь вертикальных корней и радиус скелетных корней преобладают в сосняке лишайниковом. Следовательно, устойчивость наземной части деревьев в сосняке лишайниковом формируется за счет развития стержневого и скелетных корней, в сосняке черничном – в результате значительной разветвленности как вертикальных, так и горизонтальных корней. Высокая вероятность вывала деревьев в сосняке долгомошном связана не только с поверхностной корневой системой, но и с патологией ее развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобкова К.С. Строение корневых систем древесных пород в различных типах сосновых лесов Зеленоборского стационара // Вопросы экологии сосняков Севера: тр. Коми филиала АН СССР. 1972. Вып. 24. С. 52–69.
2. Веретенников А.В. Физиологические основы устойчивости древесных растений к временному избытку влаги в почве. М.: Наука, 1968. 215 с.
3. Волкорезов В.И. Особенности строения и формирования корневых систем сосны Приокских лишайниковых боров Горьковской области // Лесн. журн. 1970. № 2. С. 14–17. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Волперский С.Э. Микрорельеф поверхности заболоченных и болотных почв и его лесоводственное значение // Влияние избыточного увлажнения почв на продуктивность лесов. М.: Наука, 1966. С. 96–111.

5. *Ежов О.Н.* Афилофоровые грибы сосны обыкновенной и их значение в лесных экосистемах на территории Архангельской области. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 148 с.
6. *Калинин М.И.* Структура и пластичность корневой системы сосны обыкновенной // Лесн. журн. 1981. № 4. С. 13–16. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Каннер О.Г.* Хвойные породы. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954. 304 с.
8. *Огиевский В.В.* Влияние условий местопроизрастания на строение корневых систем в 17–20-летних культурах сосны (*Pinus silvestris* L.) Ленинградской области // Ботан. журн. 1958. Т. 43, № 11. С. 89–114.
9. *Оловяникова И.Н.* Корневая система сосны обыкновенной в условиях ленточных боров Прииртышья // Тр. Лаборатории лесоведения АН СССР. 1962. Вып. 4. С. 111–144.
10. *Орлов А.Я.* К методике количественного определения сосущих корней древесных пород в почве // Бюлл. МОИП. Отд. Биология. 1955. Т. LX, № 3. С. 78–96.
11. *Орлов А.Я.* Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможность учета годичного прироста органической массы в толще лесной почвы // Лесоведение. 1967. № 1. С. 64–69.
12. *Рахтенко И.Н.* Корневые системы древесных и кустарниковых пород. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 106 с.
13. *Рахтеенко И.Н.* Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений. Минск: АН БССР, 1963. 254 с.
14. *Рысин Л.П., Савельева Л.И.* Сосновые леса России. М.: КМК, 2008. 289 с.
15. *Тюкавина О.Н., Евдокимов В.Н.* Особенности корневой системы сосны // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 17. Архангельск: САФУ, 2014.
16. *Шиманюк А.П.* Развитие корневых систем сосны в лесах // Тр. Института леса АН СССР. М.: АН СССР, 1950. С. 87–94.
17. *Якушенко И.К.* Влияние генезиса песков на строение корневой системы сосны // Выращивание высокопродуктивных лесов. Минск: АН БССР, 1963. С. 32–46.
18. *George E., Seith B., Schaeffer C., Marschner H.* Responses of *Picea*, *Pinus* and *Pseudotsuga* roots to heterogeneous nutrient distribution in soil // *Tree Physiology*. 1997. P. 39–45.
19. *Plourde A., Krause C., Lord C.* Spatial distribution, architecture, and development of the root system of *Pinus banksiana* Lamb. in natural and planted stands // *Forest Ecology and Management*. 2009. P. 2143–2152.

Поступила 30.12.14

UDC 674.032.475.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.55

***Pinus Silvestris* Root System in the North Taiga Zone**

O.N. Tyukavina, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

V.N. Evdokimov, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,

Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: o.tukavina@narfu.ru

Pine can adapt to the different environmental conditions, developing deep and shallow root system. Data about the structure and development of pine root systems can improve the silvicultural, forestry and hydraulic treatment and identify the hazardous trees. Trees stability is related to the distribution of tree skeletal roots and their dimensions. The aim of the research was to study the pine root structure in the Arkhangelsk forestry (Arkhangelsk region). The studies of the structure of the pine root system were carried out in the lichen, moss and lichen and bilberry pine forests. The root systems of the undergrowth and pine trees were studied by its partial or complete exemption from the soil. The fully developed taproot is formed in the lichen pine forest. In other types of forests the taproot has the excurrent form (the form of a “radish”) or does not developed. The mature trees in the bilberry and moss and lichen pine forests do not have a taproot. In the process of the tree growing, it becomes a well-developed horizontal root and takes the horizontal direction. Up to 10 years of age the undergrowth root system develops identically in different types of forests. At older ages, the differentiation of structure and parameters of the root system occurs. It depends on the growing conditions. The excess of the vertical roots of a tree of more than 10-years-old indicates the diseases of a root system or a lower trunk. The vigor of the root layer in a bilberry pine forest more, but the depth penetration of the vertical roots and the radius of skeletal roots predominate in a lichen pine forest. Consequently, the tree stability in a lichen pine forest is formed due to the taproots and skeletal roots, in a bilberry pine forest – as a result of significant branching of vertical and horizontal roots. The high probability of the trees fall in a pine forest is associated not only with a shallow root system, but also with the development of its pathology.

Keywords: Scots pine, root system, taproot, skeletal roots.

REFERENCES

1. Bobkova K.S. Stroenie kornevykh sistem drevesnykh porod v razlichnykh tipakh sosnovykh lesov Zelenoborskogo statsionara [The Structure of a Tree Root Systems in Different Types of Pine Forests of the Zelenoborsk Station]. *Voprosy ekologii sosnyakov Severa: Tr. Komi filiala AN SSSR* [Questions of Ecology of Pine Forests of the North: Proc. of the Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR], 1972, no. 24, pp. 52–69.
2. Veretennikov A.V. *Fiziologicheskie osnovy ustoychivosti drevesnykh rasteniy k vremennomu izbytku vlagi v pochve* [Physiological Bases of Woody Plants Resistance to a Temporary Moisture Excess in the Soil]. Moscow, 1968. 215 p.
3. Volkorezov V.I. Osobennosti stroeniya i formirovaniya kornevykh sistem sosny Priokskikh lishaynikovyykh borov Gor'kovskoy oblasti [Features of the Structure and Formation of the Root Systems of Pine in the Prioksk Lichen Forests of the Gorky Region]. *Lesnoy zhurnal*, 1970, no. 2, pp. 14–17.
4. Vomperskiy S.E. Mikrorel'ef poverkhnosti zabolochennykh i bolotnykh pochv i ego lesovodstvennoe znachenie [The Surface Microrelief of Wetlands and Bog Soils and Its Silvicultural Value]. *Vliyanie izbytochnogo uvlazhneniya pochv na produktivnost' lesov* [The Effect of Excessive Soil Moisture on Forest Productivity], 1966, pp. 96–111.
5. Ezhov O.N. *Afilloforovye griby sosny obyknovennoy i ikh znachenie v lesnykh ekosistemakh na territorii Arkhangel'skoy oblasti* [Aphyllloporales Scots Pine Fungi and Their Significance in the Forest Ecosystems in the Arkhangelsk Region]. Yekaterinburg, 2012. 148 p.

6. Kalinin M.I. Struktura i plastichnost' kornevoy sistemy sosny obyknovennoy [Structure and Plasticity of the Root System of Scots Pine]. *Lesnoy zhurnal*, 1981, no. 4, pp. 13–16.
7. Kapper O.G. *Khvoynye porody* [Coniferous Species]. Moscow; Leningrad, 1954. 304 p.
8. Ogievskiy V.V. Vliyanie usloviy mestoproizrastaniya na stroenie korne-vykh sistem v 17–20 letnikh kul'turakh sosny (*Pinus silvestris* L.) Leningradskoy oblasti [The Effect of Site Conditions on the Root System Structure of the 17–20 Years Old Cultures of Pine (*Pinus silvestris* L.) in the Leningrad Region]. *Botan. zhurn.*, 1958, vol. 43, no. 11, pp. 89–114.
9. Olovyannikova I.N. Kornevaya sistema sosny obyknovennoy v usloviyakh lentochnykh borov Priirtysh'ya [The Root System of Scots Pine in the Irtysh Pine Forests]. *Tr. Laboratorii lesovedeniya AN SSSR* [Proc. of the Laboratory of Forest Sciences of the Academy of Sciences of the USSR]. Moscow, 1962, iss. 4, pp. 111–144.
10. Orlov A.Ya. K metodike kolichestvennogo opredeleniya sosushchikh korney drevesnykh porod v pochve [By the Method of Quantitative Determination of Absorbing Tree Roots in the Soil]. *Byull. MOIP. Otd. Biologiya* [Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series], 1955, vol. LX, no. 3, pp. 78–96.
11. Orlov A.Ya. Metod opredeleniya massy korney derev'ev v lesu i vozmozhnost' ucheta godichnogo prirosta organicheskoy massy v tolshe lesnoy pochvy [Method for Determining the Mass of the Tree Roots in a Forest and Inventory of the Annual Increment of Organic Mass in the Depth of Forest Soil]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1967, no. 1, pp. 64–69.
12. Rakhtenko I.N. *Kornevye sistemy drevesnykh i kustarnikovykh porod* [The Root Systems of Woody and Shrubby Species]. Moscow; Leningrad, 1952. 106 p.
13. Rakhtenko I.N. *Rost i vzaimodeystvie kornevykh sistem drevesnykh rasteniy* [The Growth and the Interaction of the Root Systems of Woody Plants]. Minsk, 1963. 254 p.
14. Rysin L.P., Savel'eva L.I. *Sosnovye lesa Rossii* [Pine Forests of Russia]. Moscow, 2008. 289 p.
15. Tyukavina O.N., Evdokimov V.N. Osobennosti kornevoy sistemy sosny [Features of the Pine Root System]. *Ekologicheskie problemy Arktiki i severnykh territoriy: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Ecological Problems of the Arctic and Northern Territories: Interacademic Proc.]. Arkhangelsk, 2014, iss.17.
16. Shimanyuk A.P. Razvitie kornevykh sistem sosny v lesakh [Development of Pine Root Systems in the Forests]. *Tr. Instituta lesa AN SSSR* [Proc. of Institute of Forest of the Academy of Sciences of the USSR]. Moscow, 1950, pp. 87–94.
17. Yakushenko I.K. Vliyanie genezisa peskov na stroenie kornevoy sistemy sosny [The Influence of Sand Genesis on the Structure of the Pine Root System]. *Vyrashchivanie vysokoproduktivnykh lesov* [Growing of High-Productive Forests]. Minsk, 1963, pp. 32–46.
18. George E., Seith B., Schaeffer C., Marschner H. Responses of *Picea*, *Pinus* and *Pseudotsuga* Roots to Heterogeneous Nutrient Distribution in Soil. *Tree Physiology*, 1997, pp. 39–45.
19. Plourde A., Krause C., Lord C. Spatial Distribution, Architecture, and Development of the Root System of *Pinus Banksiana* Lamb. in Natural and Planted Stands. *Forest Ecology and Management*, 2009, pp. 2143–2152.

Received on December 30, 2014

УДК 630*165.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.66

ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН ЛИСТВЕННИЦЫ В ЗАБАЙКАЛЬСКОМ КРАЕ

© *В.П. Макаров, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.*

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова, 16а, г. Чита, Забайкальский край, Россия, 672014; e-mail:vm2853@mail.ru

В результате изменения климатических условий Забайкальского края в последние десятилетия усиливается воздействие пожаров на лесные экосистемы. Большие площади, особенно лиственничных лесов, нуждаются в лесовосстановлении. Использование достоверных сведений о качестве семян древесных пород важно для проведения работ по выращиванию посадочного материала, искусственному восстановлению лесов после пожаров и других антропогенных воздействий. Для исследования посевных качеств семян лиственницы обобщены сведения по энергии прорастания, лабораторной всхожести и массе 1000 семян, полученных Читинской лесосеменной станцией в период с 1973 г. по 2013 г. Установлены лесничества Забайкальского края с высокими показателями качества семян лиственницы по трем лесосеменным районам. Выяснено, что наиболее высокой энергией прорастания (61 %) отличаются семена лиственницы Гмелина из Читинского лесничества. Семена из Балецкого, Могочинского, Нерчинского и Шилкинского лесничеств также имеют высокую энергию прорастания (50 % и более). К 1-му классу качества относятся семена из большинства лесничеств Забайкалья. Более крупные семена свойственны лиственнице Чекановского из Кыринского лесничества и лиственнице Гмелина из Читинского и Александрово-Заводского лесничеств. Установлены уровни изменчивости посевных качеств семян лиственницы за период их поступления. Энергия прорастания и всхожесть семян лиственницы в большинстве лесничеств характеризуется повышенным и высоким уровнями изменчивости (соответственно 26..35 и 36...50 %). Масса 1000 семян лиственницы характеризуется в большинстве лесничеств очень низким и низким уровнями изменчивости. Результаты исследования будут полезны для совершенствования организации выращивания посадочного материала в лесных питомниках Забайкальского края согласно лесосеменному районированию.

Ключевые слова: лиственница, лесничества, Забайкальский край, посевные качества семян, изменчивость.

Введение

Лиственница в Забайкальском крае – основная лесообразующая порода. Лиственничные леса доминируют в сложении растительного покрова, занимают около 78 % от лесопокрытой площади. Лиственничные леса образует преимущественно лиственница Гмелина (*Larix gmelinii*), в юго-западных районах значительные площади лесов образованы л. Чекановского (*L. X czekanowskii*) и л. сибирской (*L. sibirica*). От благополучия лесов зависит

экологическое состояние среды обитания населения и экономическое развитие Забайкальского края.

В последние десятилетия в крае заметны климатические изменения, характеризующиеся повышением среднегодовой температуры воздуха, вариацией режима и количества осадков, что приводит к возрастанию количества и площади лесных пожаров. По состоянию на 01.01.2011 г. на этой территории площадь не покрытых лесной растительностью земель составляет 523,2 тыс. га, в том числе гарей – 366,1 тыс. га, погибших насаждений – 51,4 тыс. га, вырубок – 89,9 тыс. га, пустырей и прогалин – 15,8 тыс. га. В связи с этим в крае утверждена долгосрочная целевая программа «Воспроизводство лесов Забайкальского края (2012–2015 гг.)» [6]. По выгораемой площади лиственничные леса лидируют среди остальных насаждений. В настоящее время реальные масштабы и частота воздействия антропогеннопирогенного фактора на светлохвойные леса Забайкалья многократно превосходят естественную эволюционно обусловленную норму [1]. Несмотря на принимаемые меры по воспроизводству лесов ежегодно увеличиваются площади, на которых необходимо проводить лесовосстановление. Основная причина гибели лесов – лесные пожары, в результате которых только в 2012 г. уничтожено 35,6 тыс. га леса. Кроме того, остается проблемным вопрос с обеспечением исполнителей государственных контрактов и арендаторов лесных участков качественным посадочным материалом. Для решения этой проблемы признано необходимымкратно увеличить площади выращивания семян как с открытой, так и закрытой корневой системой [6].

Естественное восстановление лиственницы после пожаров и рубок происходит не всегда благополучно. Репарационный потенциал лиственничников реализуется до 80-летнего возраста древостоев, в более старых древостоях, изреженных пожарами на 20...30 %, прирост выживших деревьев недостаточен для компенсации потерь их полноты [1]. Поэтому требуется значительное количество посадочного материала для лесовосстановления. Кроме того, семенные годы у лиственницы повторяются через 3...5 лет [2]. Основным способом получения посадочного материала лиственницы является выращивание его из собранных семян и посадка согласно лесосеменному районированию. Большое значение при этом необходимо уделять посевным качествам семян. В Забайкальском крае различают 4 лесосеменных района: Джидинский (л. сибирская), Южнозабайкальский (л. Чекановского), Шилкинский и Витимо-Олекминский (л. Гмелина) [3].

Методы исследования

Обобщены результаты анализа посевных качеств л. Гмелина и Чекановского (Кыринское лесничество), выполненные Читинской лесосеменной станцией в с 1973 г. по 2013 г. Используются данные по 19 лесничествам Забайкальского края из трех лесосеменных районов, кроме Джидинского (не обнаружено

данных). К Витимо-Олекминскому лесосеменному району относятся Тунгиро-Олекминское и Тунгокочинское лесничества, к Южнозабайкальскому – Кыринское. Другие лесничества входят в состав Шилкинского лесосеменного района. Количество проведенных анализов по лесничествам различно: от 4 до 229 – по энергии прорастания и всхожести, от 2 до 182 – по массе 1000 семян. По ряду лесничеств не оказалось данных по массе 1000 семян (Тунгиро-Олекминское, Беклемишевское, Курорт-Ямаровское, Кыринское, Оленгуйское, Петровск-Забайкальское, Шелопугинское). Для оценки изменчивости посевных свойств семян использовали шкалу С.А. Мамаева [5].

Результаты исследования и их обсуждение

Энергия прорастания. Известно, что семена с высокой энергией прорастания дружнее всходят, лучше используют факторы роста, их всходы меньше угнетаются сорняками, более устойчивы к внешним неблагоприятным условиям.

В Забайкальском крае наиболее высокой энергией прорастания (61 %) отличаются семена л. Гмелина из Читинского лесничества. Высокой энергией прорастания (50 % и более) характеризуются семена этого вида из Бaleyского, Могочинского, Нерчинского и Шилкинского лесничеств.

В большинстве других лесничеств (Тунгокочинское, Александрово-Заводское, Беклемишевское, Верх-Читинское, Кыринское, Оленгуйское, Чернышевское, Шелопугинское) энергия прорастания семян л. Гмелина и л. Чекановского (Кыринское) находится в пределах 40...50 %.

Низкой энергией прорастания (26 и 27 %) отличаются семена л. Гмелина из Тунгиро-Олекминского и Петровск-Забайкальского лесничеств. Учитывая небольшое количество семян, представленных для анализа из этих районов, это заключение нуждается в уточнении. Особенно это касается данных из Петровск-Забайкальского лесничества, находящегося в более благоприятных условиях, чем Тунгиро-Олекминское. Энергии прорастания семян л. Гмелина и л. Чекановского из Кыринского лесничества близки: 47 и 45 % соответственно (рис. 1).

Лабораторная всхожесть. Семена с высокой всхожестью дают быстрые и дружные всходы. К 1-му классу качества (всхожесть по ГОСТ 14161–86 должна быть не менее 50 %) относятся семена л. Гмелина и л. Чекановского из большинства лесничеств Забайкальского края. Во 2-й класс качества (всхожесть не менее 35 %) вошли семена л. Гмелина из Аргунского, Беклемишевского, Чернышевского и Шелопугинского лесничеств. Семена л. Гмелина из Тунгиро-Олеминского и Петровск-Забайкальского лесничеств характеризуются низкой всхожестью. Всхожесть семян л. Чекановского из Кыринского лесничества несколько выше всхожести семян л. Гмелина из того же лесничества: 56 и 52 % соответственно (рис. 2).

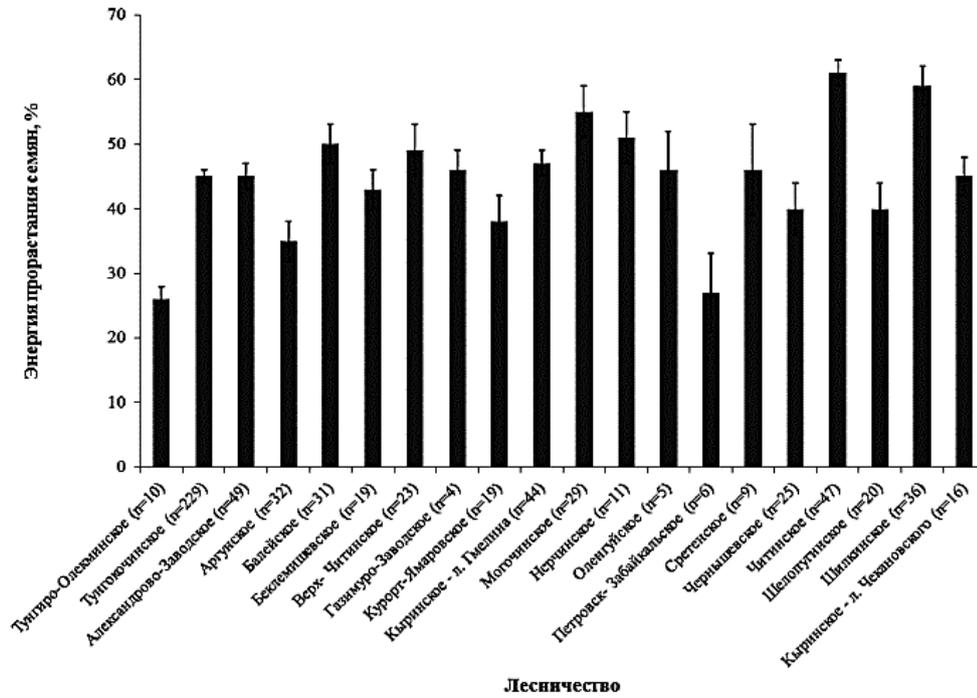


Рис. 1. Средняя энергия прорастания семян лиственницы в лесничествах Забайкальского края (1971–2013 гг.)

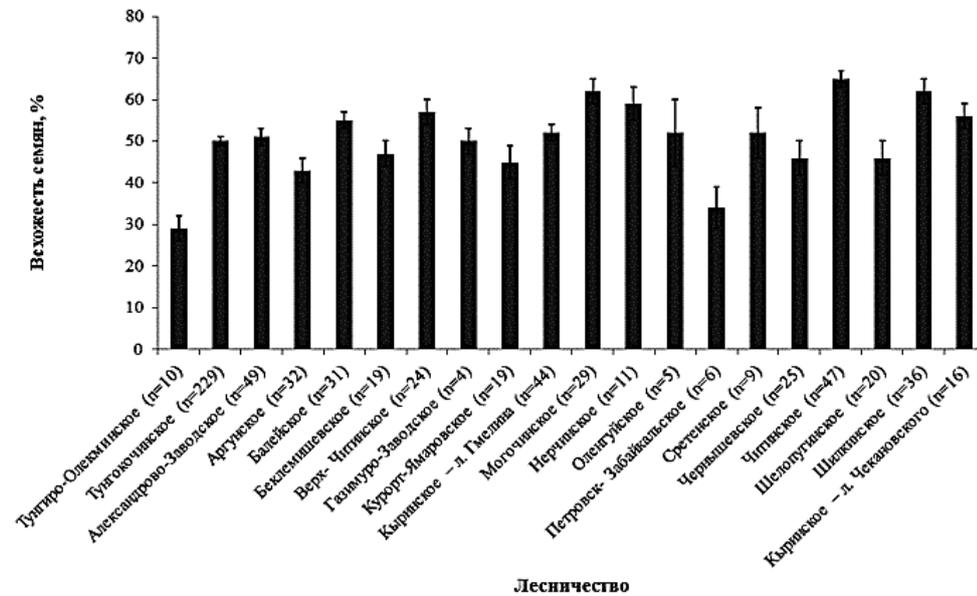


Рис. 2. Средняя всхожесть прорастания семян лиственницы в лесничествах Забайкальского края (1971–2013 гг.)

Масса 1000 семян. Масса 1000 воздушно-сухих семян служит показателем их крупности. Чем больше масса семян, тем выше их качество. Посев тяжеловесными семенами всегда обеспечивает получение более высоких урожаев по сравнению с посевом мелкими легковесными семенами. Более крупные семена обнаружены у л. Чекановского из Кыринского лесничества (масса 1000 семян – 5,0 г), л. Гмелина из Читинского и Александрово-Заводского лесничеств (4,0...4,1 г). Низкой массой 1000 семян (3,1...3,4 г) обладают лиственницы из Нерчинского, Тунгокоченского и Газимуро-Заводского лесничеств (рис. 3).

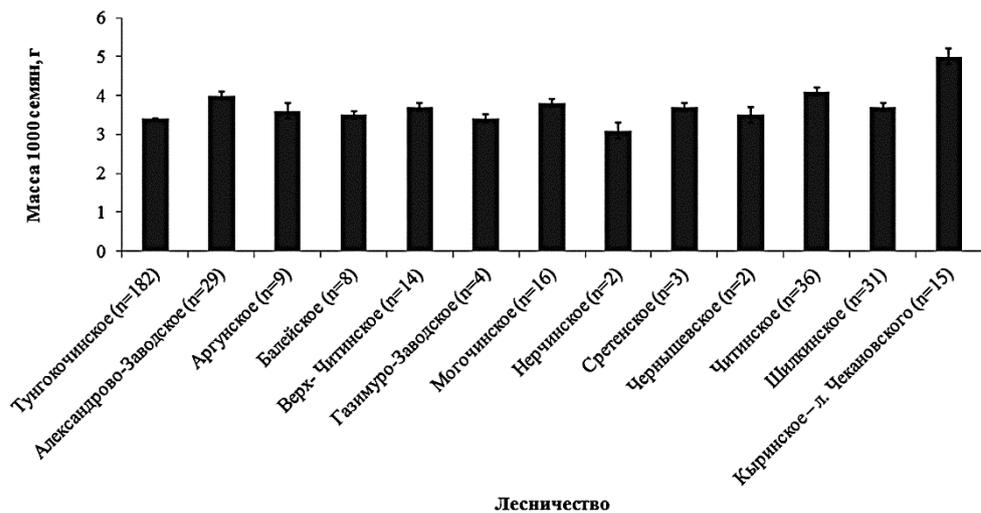


Рис. 3. Средняя масса 1000 семян лиственницы в лесничествах Забайкальского края (1971–2013 гг.)

Изменчивость показателей качества семян. Показатели посевных качеств семян лиственницы очень изменчивы и зависят от многих факторов (сроки сбора, обилие семеношения, погодные условия, повреждение болезнями и вредителями). Показатели качества также подчиняются широтной закономерности в географической изменчивости. Существенно различаются показатели качества семян в зависимости от вида и климатипа лиственницы [4].

Стабильность ежегодного получения семян хорошего качества является благоприятным фактором для устойчивого семеноводства растений, в том числе лиственницы. В наших исследованиях климатипы и виды лиственницы заметно различаются по степени варьирования показателей качества семян в зависимости от года заготовки и происхождения. Относительной стабильностью посевных качеств семян по годам отличаются л. Гмелина из Балейского, Кыринского, Могочинского и Читинского лесничеств Шилкинского лесосеменного района и л. Чекановского из Кыринского лесничества Южнозabayкальского лесосеменного района. Варьирование показателей качества семян по

годам у л. Гмелина из Газимуро-Заводского лесничества ниже, чем у выше-приведенных происхождений, однако этот факт требует дополнительного исследования ввиду низкой представительности образцов семян по годам.

Качество семян по годам у л. Гмелина из Витимо-Олекминского лесосеменного района характеризуется меньшей стабильностью, уровень вариации их всхожести повышен. Подобная неустойчивость посевных качеств семян л. Гмелина по годам проявилась в Александрово-Заводском, Беклемишевском, Верх-Читинском и Оленгуйском лесничествах Шилкинского лесосеменного района.

Ряд лесничеств этого лесосеменного района (Аргунское, Курорт-Ямаровское, Петровск-Забайкальское, Сретенское, Чернышевское и Шелопугинское) отличаются высоким уровнем варьирования качества семян л. Гмелина по годам. Причины этого явления сложно объяснить без дополнительных исследований, можно лишь предположить, что с погодными условиями это вряд ли связано (таблица).

Пределы изменчивости показателей качества семян лиственницы в лесничествах Забайкальского края (1971–2013 гг.)

Лесничество	Энергия прорастания, %		Всхожесть, %		Масса 1000 семян, г	
	Lim	C _v , %	Lim	C _v , %	Lim	C _v , %
<i>Л. Гмелина, Витимо-Олекминский лесосеменной район</i>						
Тунгино-Олекминское	15...36	28	16...42	31	–	–
Тунгокочинское	6...89	37	8...90	32	1,8...5,5	13
<i>Л. Гмелина, Шилкинский лесосеменной район</i>						
Александрово-Заводское	8...82	37	9...88	32	2,6...4,6	15
Аргунское	6...71	52	9...72	39	3,0...4,8	15
Балейское	19...75	28	27...75	24	3,1...3,7	6
Беклемишевское	24...74	31	28...74	27	–	–
Верх-Читинское	13...72	34	22...76	27	3,1...4,0	8
Газимуро-Заводское	41...54	13	43...56	11	3,3...3,6	4
Курорт-Ямаровское	7...69	46	15...72	38	–	–
Кыринское	17...80	30	25...81	25	–	–
Могочинское	16...76	34	22...79	24	3,1...5,0	13
Нерчинское	33...70	26	44...74	20	2,9...3,2	7
Оленгуйское	31...63	31	34...79	34	–	–
Петровск-Забайкальское	4...43	50	14...49	37	–	–
Сретенское	23...80	44	32...84	36	3,5...3,8	4
Чернышевское	6...75	47	7...82	42	3,3...3,7	8
Читинское	25...82	23	27...82	20	3,5...4,7	8
Шелопугинское	13...73	48	18...75	36	–	–
Шилкинский	4...87	32	20...88	26	2,6...4,4	13
<i>Л. Чекановского, Южнозабайкальский лесосеменной район</i>						
Кыринское	30...60	23	33...74	19	2,5...6,1	19

Примечание. Lim – пределы min – max; C_v – коэффициент изменчивости.

Масса 1000 семян л. Гмелина, в отличие от энергии прорастания и всхожести семян, характеризуется в большинстве лесничеств очень низким и низким уровнями изменчивости. Лишь семена л. Чекановского из Кыринского лесничества обладают средним уровнем изменчивости массы 1000 семян.

Заключение

Таким образом, посевные качества семян лиственницы существенно отличаются в зависимости от места сбора. В целом семена л. Гмелина из Шилкинского лесосеменного района обладают более высоким качеством по сравнению с семенами из Витимо-Олекминского района.

В Шилкинском лесосеменном районе высокими посевными качествами обладают семена л. Гмелина из Читинского, Шилкинского и Могочинского лесничеств; в Витимо-Олекминском лесосеменном районе по этому показателю семян л. Гмелина лучшим является Тунгокоченское лесничество; в Южно-Забайкальском районе высококачественные семена л. Чекановского можно получить в Кыринском лесничестве.

Относительной стабильностью посевных качеств семян по годам характеризуется л. Гмелина из БалеЙского, Кыринского, Могочинского и Читинского лесничеств Шилкинского лесосеменного района, а также л. Чекановского из Кыринского лесничества Южно-Забайкальского лесосеменного района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евдокименко М.Д.* Лесозоологические последствия пожаров в светлохвойных лесах Забайкалья // *Экология*. 2011. № 3. С. 191–196.
2. *Кольчева З.Н.* Плодоношение и посевные качества даурской лиственницы // *Тр. по лесн. хоз-ву и лесн. пром-сти Забайкалья (Материалы науч.-производ. конф.)*. Вып. 1. Чита, 1960. ЦБТИ Читинского СНХ. С. 117–120.
3. Лесосеменное районирование основных лесообразующих пород в СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 368 с.
4. *Макаров В.П., Бобринев В.П., Милютин Л.И.* Географические культуры лиственницы в Восточном Забайкалье. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского НЦ СО РАН, 2002. 380 с.
5. *Мамаев С.А.* Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1972. 283 с.
6. Сайт лесной службы Забайкальского края. Режим доступа: <http://лесслужба.зabayкальскийкрай.рф> (08.08.2014).

Поступила 15.12.14

UDC 630*165.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.66

Larch Seeds Qualities in Zabaikalsky Krai

V.P. Makarov, Candidate of Biological Sciences, Senior Research Officer

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Nedorezov st., 16A, Chita, Zabaikalsky Krai, 672014, Russian Federation; e-mail: vm2853@mail.ru

As a result of climatic change in Zabaikalsky Krai in the last decade the impact of fires on forest ecosystems has been increased. Large areas, especially of the larch forests require reforestation. The reliable information about the quality of seeds of tree species is important for the cultivation of planting material, artificial reforestation after fires and other anthropogenic impacts. To investigate the quality of larch seeds the data for germinating power, laboratory germination and weight of 1000 seeds were summarized. The Chita forest seed station in the period from 1973 to 2013 obtained the information. The forestry of Zabaikalsky Krai with high larch seeds quality in three seed plantations are established. It was found that Dahurian larch seeds of Chita forestry have the highest germination energy (61 %). Seeds of Baley, Mogochinsk, Nerchinsk and Shilkinsk forest areas also have high germination energy (50 % and more). The seeds of the most forestries of Transbaikalia belong to the 1st class of quality. Chekanovsky larch in the Kyrinsk forestry and Dahurian larch in the Chita and Alexandrov-Zavodskoy forestry are characterized by larger seeds. The levels of variation of larch seeds qualities are established. Germinating power and germinating ability of larch in the most forest areas are characterized by high levels of variation (26...35 and 36...50 % respectively). Weight of 1000 seeds of larch is characterized in most forest areas by low level of variation. The study results will be useful for improving the cultivation of planting material in the forest nurseries of Zabaikalsky Krai according to the seed zoning.

Keywords: larch, forestry, Zabaikalsky Krai, seeds quality, variability.

REFERENCES

1. Evdokimenko M.D. Lesoekologicheskie posledstviya pozharov v svetlokhvoynnykh lesakh Zabaykal'ya [Forestry Ecological Consequences of Fires in the Light Coniferous Forests of Transbaikalia]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2011, no. 3, pp. 191–196.
2. Kolycheva Z.N. Plodonoshenie i posevnye kachestva daurskoy listvennitsy [Fruiting and Sowing Qualities of Daurian Larch]. *Tr. po lesn. khoz-vu i lesn. prom-sti Zabaykal'ya* [Proc. on the Forestry and Forest Industries of Transbaikalia]. Chita, 1960, no.1, pp. 117–120.
3. *Lesosemennoe rayonirovanie osnovnykh lesobrazuyushchikh porod v SSSR* [Seed Zoning of the Basic Tree Species in the USSR]. Moscow, 1982. 368 p.
4. Makarov V.P., Bobrinev V.P., Milyutin L.I. *Geograficheskie kul'tury listvennitsy v Vostochnom Zabaykal'e* [Geographic Cultures of Larch in the East Transbaikalia]. Ulan-Ude, 2002. 380 p.
5. Mamaev S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy* [Forms of Intraspecific Variation of Woody Plants]. Moscow, 1972. 283 p.
6. Lesnaya sluzhba Zabaykal'skogo kraya [State Forestry Service of Zabaikalsky Krai]. Available at: <http://лесслужба.зabayкальскийкрай.рф> (accessed 8.08.2014).

Received on December 15, 2014

УДК 630*566

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.74

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ТАКСАЦИИ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ В АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ*

© *А.П. Богданов, канд. с.-х. наук*

Р.А. Алешко, канд. техн. наук, доц.

К.В. Шошина, ст. преп.

С.А. Демиденко, ст. преп.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: aleksandr_bogd@mail.ru

Сохранение и восстановление лиственницы является важной задачей лесопромышленного комплекса Архангельской области в виду особых качеств древесины. Учитывая сложность таксации и высокую стоимость полевых исследований, в статье проанализирован опыт исследовательской работы по определению лиственницы с использованием данных детальной спутниковой съемки на базе алгоритма бинарной классификации. Для этого в геоинформационной среде QuantumGIS с помощью информации, собранной в полевых условиях, были выделены кроны деревьев, относящихся к лиственнице сибирской. В качестве исходных данных использовали снимки сверхвысокого разрешения GeoEye-1 (пространственное разрешение – до 0,5 м на пиксель; спектральное разрешение – 3 видимых диапазона, ближний – инфракрасный). На снимке было выделено несколько крон деревьев, отмеченных в полевых условиях с использованием приборов глобального позиционирования. На основе выделенных эталонов крон был применен алгоритм бинарной классификации. Несомненным достоинством работы является классификация дешифровочных признаков лиственницы: крона лиственницы окрашена в светло-фиолетовый цвет при комбинации каналов ближний инфракрасный спектр–красный–зеленый; в сомкнутых насаждениях отраженный солнечный свет несет информацию не только о разреженной кроне лиственницы, но и о нижних ярусах растительности, зачастую меняя тон в зависимости от его состава и структуры напочвенного покрова. Результат работы алгоритма – сетка растра, ячейками которого является вероятность принадлежности пикселя к искомому классу. Далее проводилась экспериментальная оценка порогового значения в целях отсека пикселей, для которых мала вероятность принадлежности к классу «лиственница», при этом достаточный порог достоверности – 0,5. Установлено, что эталонные значения контуров лиственницы в большинстве своем совпадают с полученными классифицированными пикселями изображения. Отмечается высокая достоверность полученных данных при сравнении с полевыми исследованиями. Полученная методика автоматизированного дешифрирования лиственницы может быть применена для других пород при инвентаризации лесного фонда Архангельской области.

Ключевые слова: лиственница сибирская (*Larix sibirica*), методика тематического дешифрирования, спутниковые снимки, бинарная классификация.

* Исследование поддержано в рамках внутреннего конкурса САФУ «Выполнение научно-исследовательских и инновационных работ студентами и молодыми учеными по приоритетным направлениям развития университета» 2013 г.

Лиственница сибирская (*Larix sibirica*) является самой распространенной породой в России, но на территории Архангельской области она относится к исчезающей породе, доля участия которой от покрытой лесом площади составляет лишь 0,25 %. Динамику изменения доли от лесопокрытой площади можно проследить по табл. 1 [7].

Таблица 1

Наличие лиственницы в лесах Архангельской области (1906–1998 гг.)

Показатель	1906	1927	1961	1966	1978	1983	1988	1993	1998
Лесопокрытая площадь, тыс. га	–	–	–	81,2	61,1	54,6	54,7	54,0	52,6
Доля участия лиственницы в лесопокрытой площади, %	≈5,0	≈2,0	≈0,80	0,42	0,32	0,29	0,29	0,27	0,25

Сохранение и восстановление лиственницы – актуальная задача лесопромышленного комплекса Архангельской области, что подтверждает правовой акт [3] и исследования экологов [4]. Особенностью и достоинствами данной породы являются быстрый рост, высокие показатели физико-механических свойств древесины, высокая устойчивость к антропогенным нагрузкам [6]. Сложность таксации древостоев сопряжена с достаточной протяженностью Архангельской области, высокой стоимостью лесочетных работ, что служит предпосылками для развития дистанционных методов в целях рационального использования лесных ресурсов. Перед нами стояла задача разработать методику выделения участков лиственницы с использованием детальной спутниковой съемки для их дальнейшего изучения и сохранения.

Цель исследования – создание алгоритма автоматизированного выделения лиственницы на снимках сверхвысокого разрешения территории Емцовского учебно-опытного лесхоза САФУ.

В настоящее время традиционным способом определения лиственницы является визуальное (или аналитическое) дешифрирование, которое основано на глазомерном анализе дешифровщиком особенностей этой породы. Изображение обрабатывается невооруженным глазом путем опознания прямых (тон (цвет), форма, размер, размещение, тени, рисунок (структура) [5]) и косвенных дешифровочных признаков. Лиственница имеет узкую «рыхлую» разреженную крону, хвоя светло-зеленого цвета, верхушечная часть у старых деревьев, как правило, наклонена. На рис. 1 приведен фрагмент спутникового снимка вырубке с оставленными семенниками лиственницы при следующей комбинации каналов: ближний инфракрасный спектр (Nir)–красный (Red)–зеленый (Green).

На рис. 1 можно четко рассмотреть отдельно стоящие деревья семенников. Форма проекции крон в центре космического снимка звездчатая, несимметричная, неправильно округлая. При данной комбинации спектральных каналов крона лиственницы окрашена в светло-фиолетовый цвет.

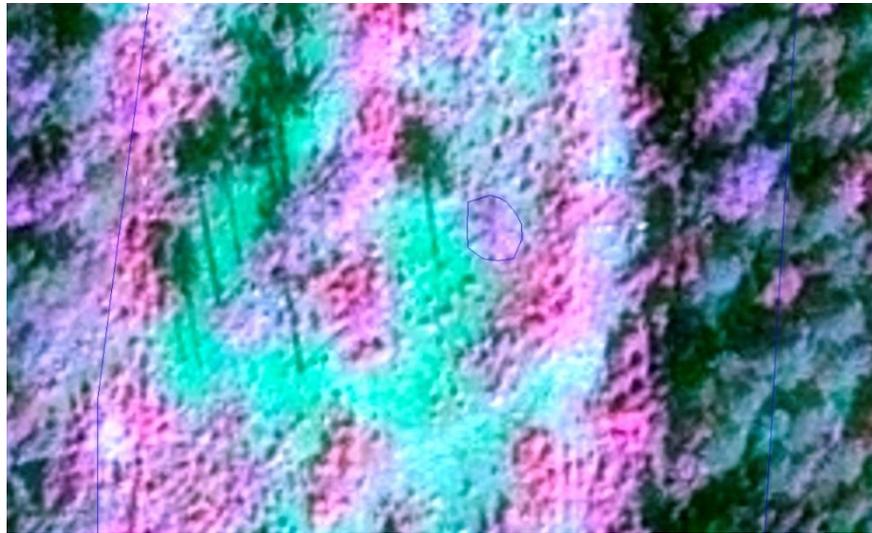


Рис. 1. Спектральный снимок с комбинацией каналов Nir/Red/Green

При распознавании лиственницы в сомкнутых насаждениях (рис. 2) следует обращать внимание на то, что отраженный солнечный свет несет информацию не только о разреженности кроны лиственницы, но и о нижних ярусах растительности, зачастую меняя тон в зависимости от состава и структуры почвенного покрова.

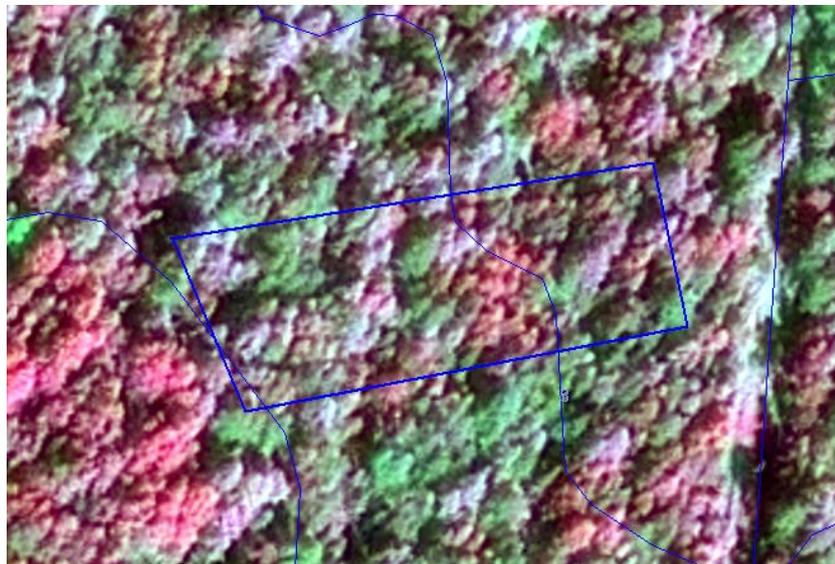


Рис. 2. Фрагмент космического изображения лесного участка на спектральном снимке с нанесенными границами выделов и границами постоянной пробной площади № 13 в квартале 106

При сборе и обработке полевого материала с помощью современного лесотаксационного оборудования была составлена схема расположения крон лиственницы на пробных площадях (ПП). Сбор и обработка полевого материала на ПП осуществлялась согласно общепринятой методике в соответствии с ОСТ 56-69–83 и рекомендациями Н.Н. Соколова от 1978 г. (табл. 2). Обследованные объекты: постоянные ПП, постоянный лесосеменной участок, вырубки различных лет давности с оставленными семенниками лиственницы.

Таблица 2

**Таксационная характеристика насаждений на постоянных ПП
в Обозерском лесничестве Архангельской области**

Номер пробы (площадь)	Год обследования	Бонитет	Состав	Порода	Средние			Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га	
					возраст, лет	высота, м	диаметр, см			растущего	сухого
ПП 12 (0,80 га)	2013	II	5Лц4Е1С ед. Б	Лц	180	30,3	44,9	15,6	0,36	200	10
				Е		18,3	22,9	15,3	0,46	149	6
				С		22,2	37,5	4,1	0,11	42	41
				Б		20,0	26,1	0,9	0,03	5	2
<i>Итого</i>								35,9	0,96	396	59
ПП 13 (0,30 га)	2013	III	3Лц3С3Б1 Е+Ос	Лц	68	18,8	19,8	7,7	0,22	78	–
				С	61	16,9	18,3	9,6	0,30	84	5
				Б		14,4	11,2	4,7	0,19	60	1
				Е		12,1	12,6	6,4	0,27	34	–
				Ос		19,1	20,5	0,9	0,03	8	–
<i>Итого</i>								29,3	1,01	264	6
ПП 16 (0,13 га)	2013	III	5С4Лц1Е ед. Б	Лц	58	15,4	15,2	11,9	0,37	107	–
				С	60	15,4	14,9	18,1	0,59	142	7
				Е		10,6	10,8	3,0	0,14	16	–
				Б		13,5	9,8	1,3	0,07	3	–
<i>Итого</i>								34,3	1,17	268	7

Данные, представленные в табл. 2, указывают на то, что все насаждения с преобладанием лиственницы имеют высокую полноту и продуктивность и являются смешанными.

В геоинформационной среде QuantumGIS на основе информации, собранной в полевых условиях, были выделены кроны деревьев, относящихся к лиственнице сибирской.

В качестве исходных данных были взяты спутниковые снимки сверхвысокого разрешения GeoEye-1 (пространственное разрешение – до 0,5 м на пиксель, спектральное разрешение – 3 видимых диапазона, ближний инфракрасный).

На снимке было выделено несколько крон деревьев, отмеченных (найденных) в полевых условиях с использованием приборов глобального позиционирования (GPS). На основе 27 шт. выделенных эталонов крон был применен алгоритм бинарной классификации. Данный алгоритм хорошо себя зарекомендовал при решении задачи поискового дешифрирования [1, 2].

Классический алгоритм бинарной классификации позволяет выполнить разделение всех входных данных (в данном случае – значений яркости пикселей снимка) всего на 2 класса (0 – не относится к классу; 1 – относится к классу). Как показывает практика, большинство задач классификации может быть сведено к бинарным, при использовании которых удастся упростить модель и снять некоторые ограничения, связанные с большим числом возможных состояний выходных значений. Кроме того, бинарные модели являются более понятными и интерпретируемыми.

На первый взгляд, результаты работы алгоритма сильно ограничены и велика вероятность потери части данных (ввиду неоднородности лесной среды). Но при выполнении бинарной классификации есть возможность расчета вероятности отнесения каждого классифицируемого объекта (пикселя) к целевому классу (рис. 3).

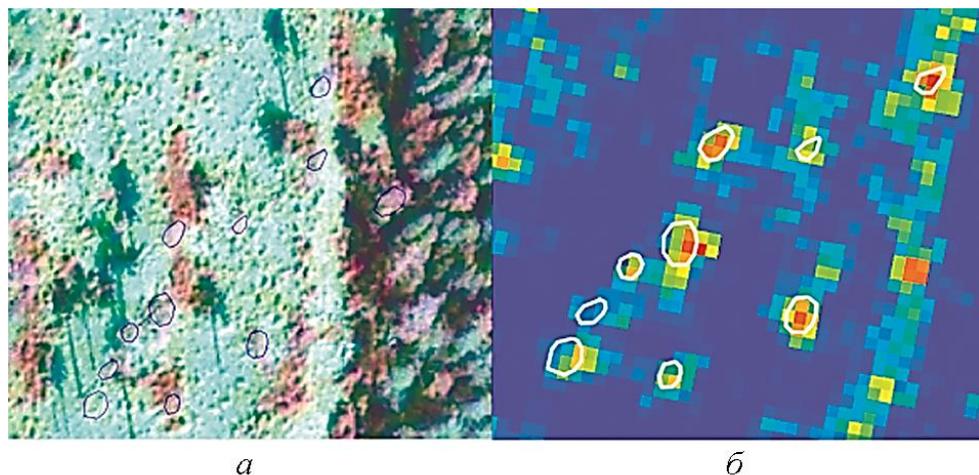


Рис. 3. Исходный снимок (а) и результат бинарной классификации (б)

Результат работы алгоритма – сетка раstra, значениями ячеек которого является вероятность принадлежности пикселя к искомому классу. На следующем этапе выполнялась экспериментальная оценка порогового значения в целях отсека пикселей, для которых мала вероятность принадлежности к классу «лиственница». Данная оценка проводилась вновь с использованием данных, собранных в полевых условиях. Было установлено, что достаточный порог достоверности – 0,5.

Приведенные данные позволяют прогнозировать количество деревьев лиственницы, ранее произраставших на месте сплошной рубки, и соблюдение экологических требований при лесопользовании в местах произрастания редких видов. Данная методика вполне эффективна при использовании спектрональных снимков высокого разрешения при наличии данных о тоне изображения породы на снимке.

На рис. 4 видно, что эталонные значения (контуры с черной границей) в большинстве своем совпадают с полученными классифицированными пикселями изображения (желтые области).

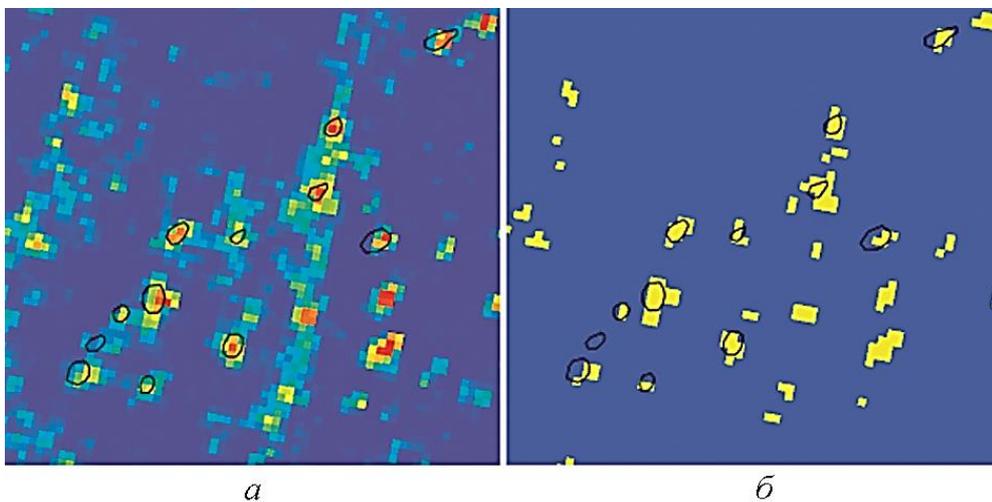


Рис. 4. Результаты бинарной классификации (а) и применения отсечения (б)

Завершающим этапом выполнения алгоритма является векторизация.

На рис. 5 изображены результаты поискового дешифрирования, полученные при разработке методики. На изображении синие контуры – данные покрывной таксации, полученные с применением данных полевых исследований; красные – полученные по разработанной методике. Отмечается высокая достоверность полученных данных по сравнению с результатами полевых исследований.

На основании разработанной методики при проведении дешифрирования данных спутниковой съемки GeoEye-1 территории Емцовского учебно-опытного участкового лесничества была получена карта лиственничных насаждений на исследуемой территории.

Предлагаемые методы исследования могут быть использованы для дешифрирования данных съемки других территорий таежного региона.

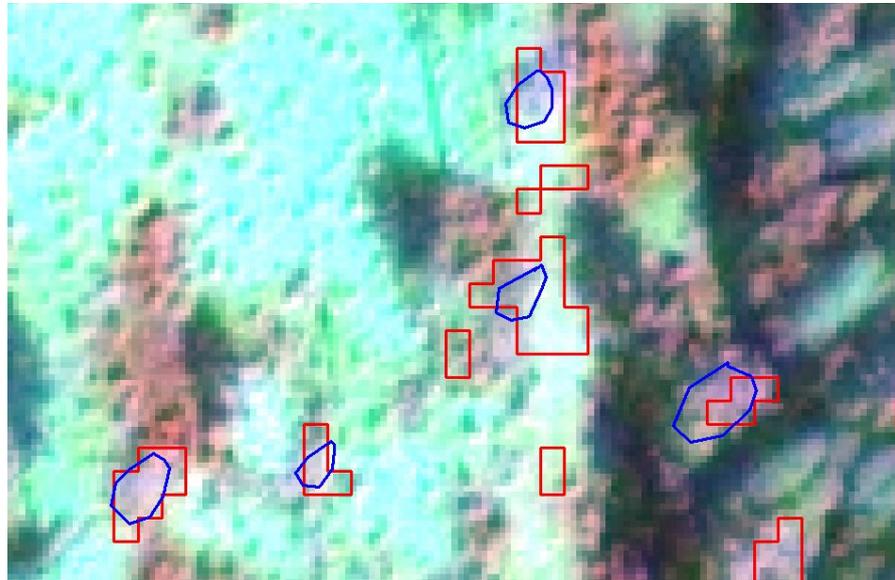


Рис. 5. Результаты поискового дешифрирования

Развитие автоматических методов обработки пространственных данных по спутниковым снимкам позволит сократить затраты на проведение лесоучетных работ. Алгоритм бинарной классификации для дешифрирования лиственницы можно использовать при инвентаризации лиственничных насаждений в Архангельской области для дальнейшего ее выделения и сохранения. Автоматизированный характер методики будет способствовать оперативному обновлению информации о лесных ресурсах, а также может служить основой для создания алгоритмов дешифрирования спутниковых снимков сверхвысокого разрешения применительно к другим древесным породам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешко Р.А., Гурьев А.Т. Методика тематического дешифрирования спутниковых снимков лесных территорий на основе структурных моделей // Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 76–77. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Алешко Р.А., Гурьев А.Т. Структурное моделирование взаимосвязей дешифровочных признаков спутниковых снимков и таксационных параметров лесных насаждений // Тр. СПИИРАН. 2013. № 29. С. 180–189.
3. Приказ Рослесхоза № 516 от 12 декабря 2011 г. «Об утверждении лесоустроительной инструкции».
4. Рай Е.А., Бурова Н.В., Рыкова С.Ю., Сластников С.И., Торхов С.В., Рыков А.М., Пучина Л.В., Чуракова Е.Ю., Корепанов В.И. Методические рекомендации по сохранению биоразнообразия при заготовке древесины в Архангельской области//Всемирный фонд дикой природы (WWF). Архангельск, 2013. С. 63.

5. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. С. 392.

6. Торхов С.В., Трубин Д.В. Лиственница в лесах Архангельской области: состояние, динамика, использование // Лиственничные леса Архангельской области, их использование и воспроизводство: материалы рабочего совещания. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. С. 5–22.

7. Третьяков С.В. Рост лиственницы в смешанных древостоях средней подзоны тайги Европейского Севера // Лиственничные леса Архангельской области, их использование и воспроизводство: материалы рабочего совещания. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. С. 107–110.

Поступила 25.03.15

UDC 630*566

DOI: 10.17238/ISSN0536-1036.2016.1.74

Use of the Materials of Close Mapping Satellite Acquisition for the Siberian Larch Assessment in the Arkhangelsk Region

A.P. Bogdanov, Candidate of Agricultural Sciences

R.A. Aleshko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

K.V. Shoshina, Senior Lecturer

S.A. Demidenko, Senior Lecturer

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya

Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: aleksandr_bogd@mail.ru

Conservation and restoration of larch is an important task of timber industry complex of the Arkhangelsk region because of the special qualities of wood. Taking into consideration the complexity of taxation and the high cost of field research, the paper analyzes the experience of research work on the definition of larch with the use of data of close mapping satellite acquisition based on binary classification algorithm. The crowns of the trees of the Siberian larch were allocated in the geoinformation environment QuantumGIS using the information collected in the field. As the initial data the very fine images GeoEye-1 were used (the spatial resolution – 0.5 m per pixel; the spectral resolution – 3 visible ranges, the nearest is infrared). Several crowns of trees were selected at the image. They were marked in the field with the use of global positioning devices. On the basis of the selected standards of crowns the binary classification algorithm was applied. The apparent advantage of the paper is the classification of decoding signs of larch: a larch crown is of light purple color at a combination of channels the nearest infrared spectrum – red – green; reflected sunlight in the dense stands gives the information not only about a sparse larch crown, but the second tier, often changing the tone in dependence on its composition and the structure of the soil cover. The result of the algorithm is the raster grid. Its cells are the probability of belonging of a pixel to the required class. The experimental estimation of the threshold value was conducted for the cut-off purpose of the pixels for which the probability of belonging to the class of “larch” was low. A sufficient threshold of reliability was 0.5. The reference value of the larch outlines mostly coincides with the obtained classified pixels of the image. There is a high reliability of the obtained data in comparison with the field studies. The resulting technique of automated decoding of larch can be applied for the other species at the forest inventory of the Arkhangelsk region.

Keywords: Siberian larch (*Larix sibirica*), technique of thematic decoding, satellite images, binary classification.

REFERENCES

1. Aleshko R.A., Gur'ev A.T. Metodika tematicheskogo deshifirovaniya sputnikovyykh snimkov lesnykh territoriy na osnove strukturnykh modeley [Technique of Thematic Decoding of Satellite Imagery of Forest Areas Based on the Structural Models]. *Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2013, vol. 56, no. 7, pp. 76–77.
2. Aleshko R.A., Gur'ev A.T. Strukturnoe modelirovanie vzaimosvyazey deshifirovochnykh priznakov sputnikovyykh snimkov i taksatsionnykh parametrov lesnykh nasazhdeniy [Structural Modeling of Interconnections of Deciphering Features of Satellite Images and Taxational Parameters of Forest Stands]. *Tr. SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2013, no. 29, pp. 180–189.
3. *Prikaz Rosleskhoza № 516 ot 12 dekabrya 2011 g. "Ob utverzhdenii lesoustroitel'noy instruktsii"* [The Order of the Federal Forestry Agency of December 12, 2011 No. 516 "On Approval of Forest Management Instructions"].
4. Ray E.A., Burova N.V., Rykova S.Yu., Slastnikov S.I., Torkhov S.V., Rykov A.M., Puchina L.V., Churakov E.U., Korepanov V.I. Metodicheskie rekomendatsii po sokhraneniyu bioraznoobraziya pri zagotovke drevesiny v Arkhangel'skoy oblasti [Guidelines for the Conservation of Biodiversity in the Wood Procurement in Arkhangelsk Region]. *Vsemirnyy fond dikoy prirody* (WWF) [World Wildlife Fund (WWF)]. Arkhangelsk, 2013, p. 63.
5. Sukhikh V.I. *Aerokosmicheskie metody v lesnom khozyaystve i landshaftnom stroitel'stve* [Aerospace Methods in Forestry and Landscape Construction]. Yoshkar-Ola, 2005, p. 392.
6. Torkhov S.V., Trubin D.V. Listvennitsa v lesach Arkhangel'skoy oblasti: sostoyanie, dinamika, ispol'zovanie. *Listvennichnye lesa Arkhangel'skoy oblasti, ikh ispol'zovanie i vosproizvodstvo: materialy rabocheho soveshchaniya* [Larch Forests of Arkhangelsk Region, Their Use and Reproduction: Proc. of the Workshop], 2002, pp. 5–22.
7. Tret'yakov S.V. Rost listvennitsy v smeshannykh drevostoyakh sredney podzony taygi Evropeyskogo Severa [The Growth of Larch in Mixed Stands of the Middle Taiga Subzone of the European North]. *Listvennichnye lesa Arkhangel'skoy oblasti, ikh ispol'zovanie i vosproizvodstvo: materialy rabocheho soveshchaniya* [Larch Forests of Arkhangelsk Region, Their Use and Reproduction: Proc. of the Workshop], 2002, pp. 107–110.

Received on March 25, 2015

УДК 630*232:582.632.2(470.345)
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.83

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ КУЛЬТУРЫ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR* L.) В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ

© С.В. Кириллов¹, канд. с.-х. наук, доц.

А.А. Теплых², канд. биол. наук

В.В. Бочкова², нач. отд.

В.А. Мартынов², инж.

¹Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3,
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: klk@volgatech.net

²Центр защиты леса Республики Марий Эл, ул. Комсомольская, 83, г. Йошкар-Ола,
Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: TeplyhAA@mail.ru

Проанализированы сохранность, высота, диаметр и качество ствола географических культур 22 климатипов дуба черешчатого в Республике Марий Эл, заложенных в 1976 г. в рамках задания Государственного комитета лесного хозяйства Совета Министров СССР. Желуди каждого климатипа дуба высевались в лунки (размещение лунок (1,5×0,75) м) по 14 рядов в блоке ((20×100) м), опыт проводили в двух повторностях. При обследовании географических культур дуба в 2012 г. измеряли высоту и диаметр ствола на высоте 1,3 м у 50 деревьев, отмечали общее число деревьев в блоке площадью 2000 м². Показатели роста потомства дуба разного происхождения существенно различаются как по высоте и диаметру ствола, так и по сохранности деревьев. Средние высоты разных климатипов изменяются от 7,75 до 16,00 м. Изменчивость высоты ствола в пределах климатипа значительная, изменяется от 16,1 до 46,1 %. Высоты деревьев разных повторностей одного климатипа не различаются между собой. Средние диаметры ствола изменяются от 3,90 до 9,00 см. По сравнению с высотой изменчивость диаметров ствола в пределах климатипа выше и составляет от 25,6 до 63,3 %. Диаметры стволов разных повторностей в пределах климатипа различаются между собой. Сохранность деревьев в разных климатипах составила от 0,6 до 12,0 %. Сравнение роста дуба местного происхождения из лесной зоны показало, что высоты, диаметры и сохранность этих потомств из разных лесничеств Республики Марий Эл неодинаковы. Полученные данные показывают, что географическое происхождение оказывает влияние как на основные характеристики ствола, так и на сохранность дуба. Прослеживается зависимость от популяционной принадлежности дуба, а также индивидуальных особенностей. Выявлены климатипы дуба с наилучшими показателями как высоты, диаметра и качества ствола, так и сохранности.

Ключевые слова: дуб черешчатый, географические культуры, климатип.

Дуб – одна из главных лесообразующих пород, имеющих обширный и разнообразный в климатическом и почвенном отношении естественный ареал. На территории России площадь дубовых лесов составляет около 7,2 млн га.

Периодичность плодоношения и большой спрос на семена в неурожайные годы обуславливали в ряде случаев дальние перемещения семенных желудей без учета эдафических, климатических и фенологических разновидно-

стей, что привело к снижению устойчивости, продуктивности и качества насаждений, а иногда и полной гибели культур. В связи с этим для теории и практики лесоводства важное значение имеет изучение географической изменчивости наследственных свойств лесных пород, что позволяет вскрыть эволюционно-генетические закономерности формирования насаждений дуба в разных частях его ареала, выявить возможность сохранения популяций и повысить их продуктивность, разработать лесосеменное районирование. Основным средством для изучения изменчивости наследственных свойств лесных пород, в частности дуба, является создание сети географических культур. Изучению различных показателей дуба черешчатого в географических культурах посвящен целый ряд работ [3–6].

Целью нашей работы являлось изучение географических культур дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) из разных регионов, произрастающих в почвенно-климатических условиях Республики Марий Эл.

Объектом исследования служили географические культуры дуба черешчатого, созданные в 1976 г. под руководством проф. А.С. Яковлева в кварталах 38 и 46, выделах 5, 21-22 Сотнурского участкового лесничества ГКУ РМЭ «Алексеевское лесничество» (56°00'596", 48°31'539") на площади 9,9 га. Географические культуры, состоящие из 22 климатипов, были заложены в рамках задания Государственного комитета лесного хозяйства Совета Министров СССР. Основную часть участка занимала вырубка, превращенная в сенокосные угодья с отдельными группами деревьев дуба. Почва супесчано-сложно-суглинистая на карбонатных породах, тип лесорастительных условий – Д₂, тип леса до вырубки – дубняк кленово-липовый. Лесокультурную площадь подготавливали следующим образом. Пни корчевали корчевателем-собирателем Д-513, затем этим же орудием вычесывали корни с одновременной планировкой участка. Основная обработка почвы произведена ПБК-2-54 на глубину 27 см с последующим дискованием дисковой бороной БДН-2,2. Желуди каждого климатипа дуба высевали в лунки (размещение лунок (1,5×0,75) м) по 14 рядов в блоке ((20×100) м), опыт проводили в двух повторностях.

Географические культуры обследовались в 1979 и 1999 гг. [1, 2, 7]. В июле 2012 г. было произведено очередное обследование. У 50 деревьев дуба черешчатого были измерены высота и диаметр ствола на высоте 1,3 м, отмечено общее число деревьев в блоке. При этом оценивали качество ствола: 5 баллов – прямые одноствольные; 4 балла – прямые двухствольные; 3 балла – слабоискривленные одноствольные; 2 балла – слабоискривленные двухствольные; 1 балл – сильно и многократно искривленные.

Показатели роста потомства разного происхождения существенно различаются как по высоте, так и по диаметру (см. таблицу).

Средние высоты разных климатипов изменяются от 7,75 м (дагестанский) до 16,00 м (витебский). Как показал однофакторный дисперсионный анализ, высоты ствола дуба разных климатипов различаются ($p < 10^{-15}$).

Средние показатели состояния и роста географических культур

Происхождение климатипа (республика, область, лесхоз)	Диаметр, см	C_v диаметра, %	Высота, м	C_v высоты, %	Сохраненность, %	Качество ствола, балл
Новгородский	11,75	39,8	6,70	24,7	3,9	3
Витебский (Беларусь)	16,00	29,7	8,50	21,3	3,9	4
Могилевский (Беларусь)	13,70	29,2	9,00	16,1	6,7	4
Гомельский (Беларусь)	11,95	39,2	8,10	21,0	5,6	4
Белгородский (1)	13,05	25,6	7,05	23,2	1,7	3
Сумской (Украина)	12,75	39,5	7,20	26,1	3,8	4
Дагестанский	7,75	63,6	3,90	46,1	1,2	2
Белгородский (2)	9,15	38,5	7,30	22,8	7,3	3
Курский	10,20	42,3	6,60	23,8	8,8	3
Волгоградский	13,70	43,8	6,00	33,3	0,6	3
Марийский (Руткинский)	13,25	38,8	7,35	20,4	8,4	4
Марийский (Пригородный)	11,20	38,6	6,70	23,8	8,0	3
Марийский (Козьмодемьянский)	9,60	42,7	6,00	27,3	2,1	3
Марийский (НП «Марий Чодра»)	11,20	35,0	6,95	26,4	2,7	4
Тульский	11,35	42,0	7,60	26,5	5,3	4
Башкирский (Башкортостан)	10,80	37,9	8,90	20,4	8,7	4
Свердловский	11,20	40,6	8,90	22,7	9,6	4
Татарский (Татарстан)	9,10	37,3	8,10	23,9	12,0	4
Брянский	11,15	35,5	8,05	20,9	6,2	4
Оренбургский	10,95	36,2	7,25	20,5	3,2	4
Воронежский D ₁	13,50	38,8	7,90	23,6	3,7	4
Воронежский D ₂	12,90	45,3	7,15	28,3	2,3	4

Причем результаты множественного сравнения (Шеффе-тест) показали, что высота ствола дуба дагестанского происхождения достоверно меньше всех остальных климатипов ($p = (0,04...2,8) \cdot 10^{-17}$). Также статистически значимо различаются высоты ствола новгородского климатипа с башкирским, свердловским, могилевским климатипами ($p = 0,03...0,004$), курского с могилевским ($p = 0,0001$), марийского (Пригородный) с могилевским ($p = 0,01$), башкирского с курским, марийским (Пригородный) ($p = 0,01...0,001$), свердловского с курским, марийским (Пригородный) ($p = 0,001...0,002$), марийский (Козьмодемьянский) с могилевским, башкирским ($p = 0,02...0,04$). Высоты деревьев разных повторностей одного климатипа не различаются (двухфакторный дисперсионный анализ, факторы: климатип, повторность, $p = 0,05$), хотя различия у некоторых климатипов (например, татарского, брянского, из национального парка «Марий Чодра») достигают значений более 2,5 м. Изменчивость высоты ствола в пределах климатипа значительна, наименьшее значение коэффициента вариации имеет могилевский климатип (16,1 %), наибольшее – дагестанский (46,1 %).

Диаметры ствола разных климатипов также различаются ($2,1 \cdot 10^{-27}$). По диаметру дерева дагестанского климатипа имеют наименьшие показатели (3,9 см), в то время как лидирующим климатипом по этим показателям являются могилевский (9,0 см), башкирский и свердловский (8,9 см). Однако различия дагестанского климатипа по среднему диаметру ствола выявлены только с витебским, могилевским, гомельским, белгородским, марийским (Руткинский), воронежским ($p = (0,03 \dots 3,3) \cdot 10^{-5}$). Также выявлены различия между следующими климатипами: белгородский (2) – витебский, могилевский, марийский (руткинский), воронежский ($p = 0,01 \dots 0,04$), могилевский – курский ($p = 0,04$), татарский – воронежский ($p = 0,03$).

Диаметры стволов разных повторностей в пределах климатипа различаются ($p = 0,001$), особенно эти различия ярко выражены у сумского (8,8 и 16,7 см), курского (7,7 и 12,7 см), витебского (13,7 и 18,2 см) и дагестанского (5,7 и 9,8 см) климатипов.

Изменчивость диаметров ствола в пределах климатипа значительна, причем эти значения выше по сравнению с высотой ствола. Наименьшее значение коэффициента вариации у белгородского климатипа (25,6 %), наибольшее – у дагестанского (63,3 %). Необходимо отметить, что наибольшие показатели изменчивости как по диаметру ствола, так и по высоте имеет дагестанский климатип.

Сравнение роста дуба местного происхождения из лесной зоны показало, что высоты этих потомств неодинаковы: большая – в Руткинском лесничестве (7,35 м), меньшая – в Национальном парке «Марий Чодра» (6,95 м) и Пригородном лесничестве (6,70 м). Наибольший диаметр ствола также имеет руткинский климатип (13,25 см), ниже этот показатель у климатипа из Национального парка «Марий Чодра» и Пригородного лесничества (11,20 см). Культуры из Козьмодемьянского лесничества зоны широколиственных лесов имеют меньшую высоту (6,00 м) и диаметр (9,60 см) при самой низкой сохранности (2,1 %) среди местных происхождений. Известно, что значительное влияние на рост потомств дуба оказывают эдафические условия роста материнских популяций из одной области [5].

Сохранность деревьев от географического происхождения зависит меньше. В пределах каждой лесорастительной зоны сохранность дубов неодинакова. Очень плохо сохранился дуб из степной зоны (волгоградский климатип – 0,6 %) и горных лесов Северного Кавказа (дагестанский климатип – 1,2 %). Лучшие показатели сохранности у татарского и свердловского климатипов (12,0 % и 9,6 % соответственно). Показатели местных потомств варьируют очень значительно. Так, сохранность дубов из Руткинского и Пригородного лесничеств составила 8,4 % и 8,0 %, соответственно, в то время как из Национального парка «Марий Чодра» и Козьмодемьянского лесничества только 2,7 % и 2,1 %. Низкая сохранность дубов марийского и волгоградского происхождений возможно связана с нерегулярными уходами и более низкими качествами желудей [7]. Сохранность дубов в значительной степени определяется их первоначальным числом и в последующие годы зависит от ряда

других факторов (устойчивости к заморозкам, мучнистой росе и др.), а также от микроклиматических условий. Участок имеет уклон в западном направлении, там скапливается холодный воздух, что может приводить к гибели семян [7] и различиям в диаметрах стволов разных повторностей.

Полученные данные показывают, что географическое происхождение оказывает влияние на основные характеристики ствола и на сохранность дуба. Прослеживается зависимость от популяционной принадлежности дуба, а также индивидуальных особенностей. В результате исследования выявлены климатотипы дуба с наилучшими показателями как высоты, диаметра и качества ствола, так и сохранности.

Очевидно, что данные исследования необходимо проводить периодически в дальнейшем, помимо учитываемых признаков дополнительно оценивать плодоношение разных климатотипов и посевные качества желудей. Также вызывает интерес сравнение полученных результатов исследуемых климатотипов с результатами исследований географических культур в других регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов С.В. Географические культуры дуба в хвойно-широколиственном районе европейской части РФ: автореф. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола, 2008. 28 с.
2. Кириллов С.В., Яковлев А.С. Географические культуры дуба в Республике Марий Эл//Лесн. журн. 2008. № 4. С. 20–25. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Шутяев А.М. Состояние 35-летних географических культур дуба черешчатого в степи Краснодарского края//Лесоведение. 1991. № 4. С. 25–36.
4. Шутяев А.М. Рост и состояние географических культур дуба черешчатого в Курской области//Лесоведение. 2003. № 5. С. 54–60.
5. Шутяев А.М., Кобж П.С. Географические культуры дуба черешчатого в степных условиях Краснодарского края//Лесн. хоз-во. 2008. № 2. С. 38–40.
6. Шутяев А.М., Лаврентьев Д.Д. Географические культуры дуба черешчатого в Чувашской республике//Лесн. хоз-во. 2012. № 5. С. 36–38.
7. Яковлев А.С., Кириллов С.В. Сохранность дуба в географических культурах//Лесн. журн. 2008. № 3. С. 29–33. (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 16.04.15

UDC 630*232:582.632.2(470.345)
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.83

Provenance Trials of English Oak (*Quercus robur* L.) in the Mari El Republic

S.V. Kirillov¹, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

A.A. Teplykh², Candidate of Biological Sciences

V.V. Bochkova², Department Chair

V.A. Martynov², Engineer

¹Volga State University of Technology, Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: klk@volgatech.net

²Forest Protection Center of the Mari El Republic, Komsomolskaya st., 83, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424004, Russian Federation; e-mail: TeplyhAA@mail.ru

The conservation, height, diameter and stem quality of provenance trials of 22 climatic types of English oak in the Mari El Republic were analyzed. The plantations were founded in 1976 by order of the State Forestry Committee of the Council of Ministers of the USSR. The acorns of oak of each climatype were inoculated into the wells (1.5×0.75 m) by 14 rows in the block (20×100 m). The test was conducted in two replications. Investigating the provenance trials of oak in 2012 we defined a height and diameter of 50 tree stems at a height of 1.3 m and total quantity of trees in block at a sample plot of 2000 m². The young growth of oak of different origin varies considerably in height, diameter of a stem and capacity for survival. The average height of the trees of different climatetypes varies from 7.75...16.00 m. The variability of the height of a stem is significant within the climatype. It varies from 16.1 %...46.1 %. The height of the trees of different replications of one climatype does not differ. The average stem diameter varies from 3.9...9.0 cm. The variability of the stem diameter within the climatype is 25.6 %...63.3 %. The diameters of the stems of different replications within climatype differ. Capacity for survival of trees in different climatetypes is from 0.6 %...12.0 %. Comparison of growth of oak of local origin in the forest zone shows that the heights, diameters and capacity for survival of these progenies from different forest areas of the Mari El Republic vary. The results of the study demonstrate the influence of provenance on the main characteristics of stems of oak and on capacity for survival. The dependence on belonging to the oak population and individual peculiarities are found out. The climatetypes of oak with the best features of height, diameter, stem quality and capacity for survival are established.

Keywords: English oak, provenance trials, climatype.

REFERENCES

1. Kirillov S.V. *Geograficheskie kul'tury duba v khvoyno-shirokolistvennom rayone evropeyskoy chasti RF*: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk [Provenance Trials of Oak in the Coniferous-Deciduous Region of the European Part of the Russian Federation: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Yoshkar-Ola, 2008. 28 p.
2. Kirillov S.V, Yakovlev A.S. Geograficheskie kul'tury duba v Respublike Mariy El [Provenance Trials of Oak in the Mari El Republic]. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 4, pp. 20–25.
3. Shutyaev A.M. Sostoyanie 35-letnikh geograficheskikh kul'tur duba chershchatogo v stepi Krasnodarskogo kraya [The Condition of 35-Years Old Provenance Trials of English Oak in the Steppe of the Krasnodar Krai]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1991, no. 4, pp. 25–36.
4. Shutyaev A.M. Rost i sostoyanie geograficheskikh kul'tur duba chershchatogo v Kurskoy oblasti [The growth and Condition of Provenance Trials of English Oak in the Kursk Region]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2003, no. 5, pp. 54–60.
5. Shutyaev A.M., Kobzh R.S. Geograficheskie kul'tury duba chershchatogo v stepnykh usloviyakh Krasnodarskogo kraya [Provenance Trials of English Oak in the Steppe of the Krasnodar Krai]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2008, no. 2, pp. 38–40.
6. Shutyaev A.M., Lavrent'ev D.D. Geograficheskie kul'tury duba chershchatogo v Chuvashskoy respublike [Provenance Trials of English Oak in the Chuvash Republic]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2012, no. 5, pp. 36–38.
7. Yakovlev A.S., Kirillov S.V. Sokhrannost' duba v geograficheskikh kul'turakh [Capacity for Survival of Oak in the Provenance Trials]. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 3, pp. 29–33.

Received on April 16, 2015

УДК 630*232.42+630*236.2
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.89

КАЧЕСТВО ДРЕВЕСИНЫ КУЛЬТУР ЕЛИ ПРИ УСКОРЕННОМ ЛЕСОВЫРАЩИВАНИИ

© *А.Н. Пеккоев, канд. с.-х. наук, науч. сотр.*

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; e-mail: pek-aleksei@list.ru

В настоящее время на Северо-Западе России запасы спелой хвойной древесины истощены. В этих условиях актуален переход к ее интенсивному воспроизводству. Основным из способов ускоренного получения крупномерной и балансовой древесины хвойных пород может служить создание плантационных культур. Ведущими факторами, определяющими темпы роста культур плантационного типа, являются разреживание и применение минеральных удобрений. Цель исследования – оценка качества древесины средневозрастных культур ели при ускоренном режиме выращивания. Культуры ели созданы в черничном типе условий местопрорастания с различной исходной плотностью (1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 тыс. шт./га). В ходе их выращивания применялись разреживания и вносились минеральные удобрения. Установлено, что после разреживания в сочетании с внесением минеральных удобрений (комплексный уход) происходит увеличение ширины годичных колец в зависимости от плотности культур на 14...49 % на протяжении периода действия удобрений. Комплексные уходы наилучшим образом отразились на приросте культур с первоначальной плотностью 3,0 тыс. шт./га. Внесение минеральных удобрений и проведение разреживаний уменьшает плотность древесины ели на 1...10 % в течении 4...7 лет после каждого приема ухода. В 41-летнем возрасте средняя плотность в вариантах с одинаковой первоначальной плотностью не имела существенных отличий и вне зависимости от проведенных мероприятий достигала высоких значений (365...379 кг/м³). По данному показателю древесина культур ели не выходила за пределы средних значений естественно произрастающих еловых древостоев таежной зоны. Культуры ели в 41-летнем возрасте имели следующие качественные характеристики прироста: число годичных слоев в 1 см – 3,4...4,2; средняя ширина годичного слоя – 2,4...2,9 мм; процент поздней древесины – 21...28. Качество древесины при данных показателях можно оценить как высокое.

Ключевые слова: культуры ели, рубки ухода, внесение удобрений, качество древесины, радиальный прирост, плотность.

В связи с сокращением запасов спелой хвойной древесины на Северо-Западе России, где сконцентрированы крупные лесоперерабатывающие предприятия, актуальна проблема интенсификации ее воспроизводства [12, 18]. Основным способом ускоренного получения крупномерной и балансовой древесины хвойных пород может служить создание плантационных культур [24, 25]. Ведущими факторами, определяющими темпы роста культур плантационного типа, являются разреживание и применение минеральных удобрений [13, 16].

Довольно много работ посвящено изучению влияния различных лесоводственных мероприятий на радиальный прирост ельников естественного

происхождения [7, 15 и др.]. Сведения по данному вопросу в искусственно созданных еловых древостоях для условий таежной зоны не многочисленны [2, 14], в основном работы затрагивают культуры, которые еще не достигли 3-го класса возраста, т.е. возраста при котором уже возможно получение балансовой древесины.

При целевом лесовыращивании, наряду с таксационной характеристикой насаждения в целом, необходимо учитывать и его качественную продуктивность, под которой подразумевают товарную структуру древостоя и технические свойства выращенной древесины [3, 6].

На Европейском Севере исследования качественных показателей древесины хвойных пород начаты в 1931 г. в Архангельском лесотехническом институте под руководством И.С. Мелехова, который сформулировал лесоводственную задачу определения и создания оптимальных условий для выращивания древесного сырья с заданными техническими качествами. Известно, что строение и физические свойства древесины определяются рядом факторов: климатические и почвенные условия, возраст древостоя, его густота, проводимые лесоводственные мероприятия [4]. Изучение влияния этих факторов на качество формирующейся древесины важно как с научной, так и с практической точки зрения, и должно в максимальной степени учитываться в зависимости от цели лесовыращивания.

При оценке качества древесины особое внимание следует уделять ее плотности, так как она дает хорошее представление о физико-механических свойствах древесины и качестве получаемых из нее пиломатериалов [11]. Кроме того, И.С. Мелехов [5] подчеркивал, что такие показатели структуры древесного сырья, как содержание поздней древесины, толщина клеточных оболочек, существенно дополняют картину качественной характеристики прироста. Известно, что между плотностью и содержанием поздней древесины существует тесная корреляционная связь. Это может служить наглядным и довольно легко определяемым диагностическим признаком технических свойств древесного сырья. В ряде исследований [1, 3] показано, что у ели и сосны формирование поздней древесины в годичных слоях и плотность древесины находятся под жестким генетическим контролем, что подтверждается высоким значением коэффициента наследуемости. Это может служить основанием для учета данных показателей при селекции на качество древесины.

При проведении лесоводственных мероприятий качество древесного сырья может изменяться. Установлено, что в сосновых насаждениях таежной зоны, в результате применения способов ускорения роста, плотность вновь формируемой древесины снижается на 5...15 % [9–11, 22 и др.]. Работы, посвященные этому вопросу для еловых древостоев, не многочисленны [8, 11, 15], а информация по влиянию лесоводственных мероприятий на плотность и процент поздней древесины носит противоречивый характер. Так, в исследованиях, проведенных Г.А. Чибисовым и С.А. Москалевой [21–23], показано, что в результате разреживаний ельников процент поздних зон и плотность

древесины увеличиваются. А.А. Смирновым [17] выявлена общая тенденция к увеличению плотности древесины как в разреженных, так и в удобренных ельниках. Однако О.И. Полубояринов [11] приводит данные о снижении плотности древесины ели после рубок ухода на 3...8 %. Это указывает на необходимость уточнения вопросов, связанных с изменением плотности древесного сырья под влиянием лесоводственных мероприятий при искусственном лесовосстановлении ели на вырубках.

В основном работы, касающиеся качества древесины ели, затрагивают древостой естественного происхождения. В средневозрастных культурах ели среднетаежной подзоны в настоящее время данный вопрос остается малоизученным, но является довольно важным при обосновании мероприятий по ускоренному лесовыращиванию.

В условиях среднетаежной подзоны Карелии для изучения роста и продуктивности культур ели, выращиваемых в плантационном режиме, в 70-х гг. прошлого столетия Петрозаводской ЛОС ЛенНИИЛХа были заложены опытные объекты, но после ее закрытия в середине 90-х гг. XX в. исследования на них прекратились. В настоящее время культуры достигли 3-го класса возраста. Лабораторией лесовосстановления Института леса КарНЦ РАН опытные участки культур были восстановлены и исследования на них продолжены [18, 19].

Цель данной работы – оценка качества древесины средневозрастных культур ели при ускоренном режиме выращивания.

Культуры ели (рис. 1) созданы в черничном типе условий местопроизрастания с различной исходной плотностью (1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 тыс. шт./га). В ходе их выращивания применялись разреживания и вносились минеральные удобрения [20].



Рис. 1. 41-летние культуры ели в черничном типе лесорастительных условий среднетаежной подзоны Карелии

Для определения годовых приростов по диаметру, процента ранней и поздней древесины методом пропорционального представительства отбирали по 25...30 шт. учетных деревьев, у которых буравом Пресслера перпендикулярно рядам культур в направлении З-В на высоте груди брали керны. Измерения ширины ранней и поздней зон годовых слоев по кернам производили в лабораторных условиях на приборе Э. Шпалте с точностью 0,01 мм. Базисную плотность определяли способом измерения выталкивающей силы по методике О.И. Полубояринова [11] на тех же образцах, которые использовали для измерения радиального прироста. С учетом исходных различий абсолютных величин динамику радиального прироста анализировали в виде индексов, которые определяли как процентное отношение к средней ширине годовичного кольца за 5 лет перед проведением ухода.

В ходе анализа радиального прироста выявлено, что комплексный уход наиболее эффективен в культурах с первоначальной густотой 3,0 тыс. шт./га (рис. 2). При данной густоте внесение полных минеральных удобрений ($N_{100}P_{100}K_{100}$) в 12-летние культуры и такой же дозы удобрений в 17-летние культуры через 2 года после их разреживания способствовало достоверному увеличению радиального прироста в течении 4...5 лет после каждого из приемов ухода. Внесение азотных удобрений (N_{150}) в 21-летние культуры на следующий год после разреживания вызывало увеличение ширины годовичных слоев на протяжении 7 лет. За период эффективного действия лесоводственных уходов, который длился 16 лет, средние значения прироста по диаметру были на 49 % выше, чем до проведения мероприятий.

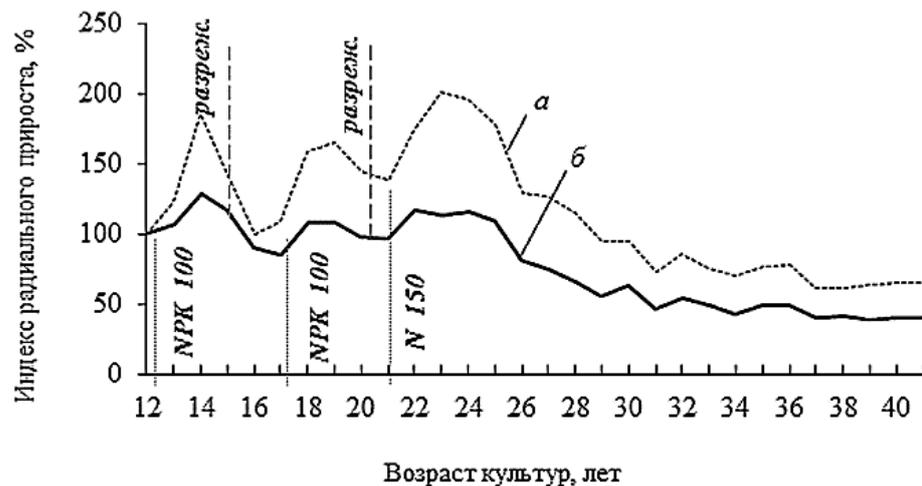


Рис. 2. Динамика радиального прироста 41-летних культур ели после комплексного ухода при различной густоте посадки: кривая *a* – 3,0; *б* – 4,0 тыс. шт./га

В культурах густотой 4,0 тыс. шт./га лесоводственные уходы отразились на приросте в меньшей степени. Так, полное минеральное удобрение ($N_{100}P_{100}K_{100}$) после первой подкормки вызвало 3-летнее увеличение радиального прироста в среднем на 17 %, после второй – 2-летнее на 8 %. Внесение азотных удобрений (N_{150}) в 21-летние культуры на следующий год после разреживания отразилось на приросте по диаметру в течении 4 лет, увеличив его на 13 % по сравнению с периодом до проведения уходов.

В культурах с первоначальной густотой 1,0 и 2,0 тыс. шт./га продолжительность положительного влияния удобрений на прирост наблюдалось на протяжении 13 лет (рис. 3). В этих вариантах за период эффективного действия удобрений радиальный прирост увеличился в среднем на 36 %.

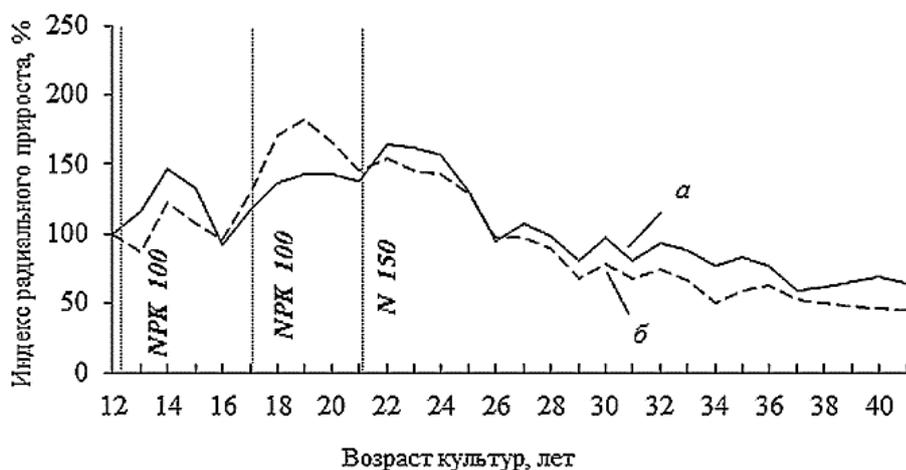


Рис. 3. Динамика радиального прироста 41-летних культур ели после внесения минеральных удобрений при различной густоте посадки: кривая *a* – 1,0; *б* – 2,0 тыс. шт./га

Следует отметить, что снижение радиального прироста в последние 15 лет является следствием того, что действие минеральных удобрений закончилось и без дополнительного воздействия извне биологическая система стала приходить в соответствие с продуктивностью условий местопрорастания [20].

Качественные показатели древесины 41-летних культур ели (табл. 1) зависели в значительной мере от первоначальной густоты культур. При одинаковой густоте в вариантах с уходом и без ухода (контроль) существенных различий по числу годичных слоев в 1 см древесины и их средней ширине не выявлено. Это объясняется уменьшением радиального прироста во всех вариантах с комплексным уходом и внесением удобрений после завершения периода эффективного их действия, вследствие чего на момент исследования средние значения ширины годичных слоев были равны (рис. 4).

Таблица 1

**Качество древесины 41-летних культур ели
в черничном типе лесорастительных условий**

Густота посадки, тыс. шт./га	Вариант опыта	Число годовичных слоев в 1 см	Средняя ширина годовичного слоя, мм	Процент поздней древесины, %
4,0	Контроль	4,2	2,4 ± 0,10	23 ± 0,4
4,0	Комплексный уход	4,2	2,4 ± 0,15	24 ± 0,6
3,0	Контроль	4,2	2,4 ± 0,08	24 ± 0,5
3,0	Комплексный уход	4,0	2,5 ± 0,16	26 ± 0,7
2,0	Контроль	3,8	2,6 ± 0,09	24 ± 0,5
2,0	Удобрения	3,8	2,6 ± 0,18	25 ± 0,7
1,0	Контроль	3,4	2,9 ± 0,10	28 ± 0,8
1,0	Удобрения	3,4	2,9 ± 0,15	21 ± 0,5

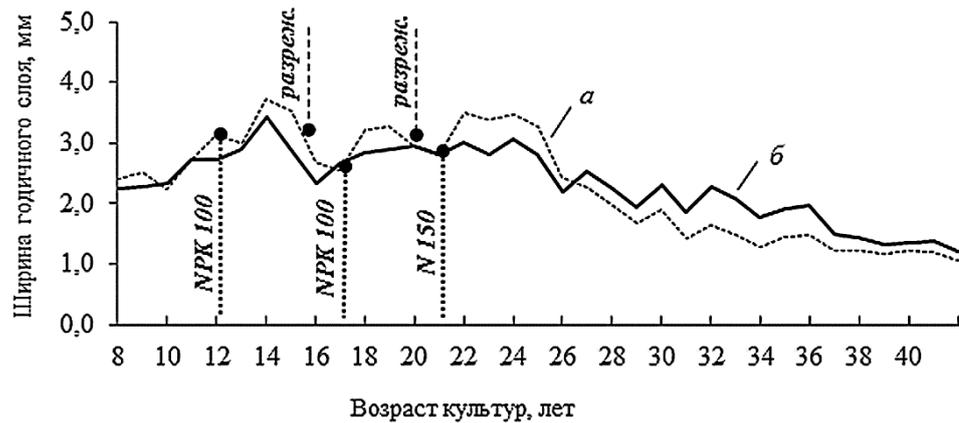


Рис. 4. Динамика ширины годовичного слоя 41-летних культур ели с первоначальной густотой 4,0 тыс. шт./га: кривая *а* – комплексный уход; *б* – контроль

Внесение удобрений и разреживания в культурах ели с первоначальной густотой 2,0...4,0 тыс. шт./га способствовало незначительному (на 1...2 %) увеличению в древесине доли поздних зон (табл. 1). Исключением являлись удобренные культуры с густотой посадки 1,0 тыс. шт./га, где процент поздней древесины снизился на 7 %, по сравнению с вариантом той же густоты без внесения удобрений. Тем не менее, в этом случае данный показатель и после снижения находился на уровне среднего значения для естественно произрастающих ельников европейской части России [3, 11].

При исследовании базисной плотности древесины отмечено, что она после внесения удобрений и комплексного ухода снижалась. Наиболее значимое уменьшение плотности зафиксировано в культурах, первоначальная густота которых составляла 1,0 и 2,0 тыс. шт./га (табл. 2).

Таблица 2

Базисная плотность древесины 41-летних культур ели по возрастным периодам

Густота посадки, тыс. шт./га	Плотность древесины, кг/м ³ , в возрасте культур, лет*						Средняя за период выращивания
	8...11 (до внесения)	12...17 (после 1-го внесения N ₁₀₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀)	18...21 (после 2-го внесения N ₁₀₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀)	22...31 (после 3-го внесения N ₁₅₀)		32...41 (последние 10 лет)	
				1-е пятилетие	2-е пятилетие		
4,0	<u>394 ± 8</u>	<u>365 ± 8</u>	<u>346 ± 7</u>	<u>358 ± 6</u>	<u>367 ± 6</u>	<u>392 ± 7</u>	<u>370 ± 3</u>
	405 ± 8	370 ± 7	366 ± 7	366 ± 6	354 ± 5	376 ± 6	371 ± 3
3,0	<u>419 ± 12</u>	<u>387 ± 11</u>	<u>364 ± 8</u>	<u>341 ± 7</u>	<u>366 ± 8</u>	<u>385 ± 7</u>	<u>373 ± 4</u>
	417 ± 20	385 ± 7	369 ± 6	367 ± 5	358 ± 6	375 ± 7	374 ± 3
2,0**	<u>382 ± 11</u>	<u>352 ± 9</u>	<u>349 ± 10</u>	<u>348 ± 6</u>	<u>372 ± 7</u>	<u>392 ± 7</u>	<u>365 ± 4</u>
	–	376 ± 10	388 ± 12	376 ± 7	366 ± 7	388 ± 7	379 ± 4
1,0	<u>411 ± 9</u>	<u>382 ± 15</u>	<u>355 ± 11</u>	<u>342 ± 6</u>	<u>366 ± 5</u>	<u>384 ± 6</u>	<u>365 ± 4</u>
	–	400 ± 16	387 ± 10	355 ± 7	352 ± 6	360 ± 7	366 ± 4

*Числитель – удобрения (саженцы), знаменатель – контроль (саженцы). **Числитель – удобрения (саженцы), знаменатель – контроль (сеянцы).

Плотность древесины культур с густотой посадки 1,0 тыс. шт./га была ниже, чем на контрольном участке на 4, 8 и 3 % после каждого приема внесения удобрений. Аналогичное, но немного большее снижение на 6, 10 и 7 % по сравнению с контролем отмечено в варианте с первоначальной густотой 2,0 тыс. шт./га. В вариантах с большей густотой (3,0...4,0 тыс. шт./га) плотность после комплексного ухода была на 1...5 % меньше, чем на контрольном участке.

После окончания периодов эффективного действия разреживаний и удобрений, которые в зависимости от густоты длились на протяжении 4...7 лет после каждого приема уходов, наблюдалось постепенное увеличение плотности древесины по сравнению с контрольными участками. Таким образом, в 41-летнем возрасте культур средняя плотность древесины ели в вариантах с одинаковой первоначальной густотой не имела достоверных различий, за исключением варианта с первоначальной густотой 2 тыс. шт./га, где данный показатель в удобренном варианте составлял 365 кг/м³ и был достоверно ниже на 4%, чем в неудобренном (379 кг/м³).

Выводы

1. Внесение минеральных удобрений и разреживания, проведенные в культурах ели, способствовали увеличению радиального прироста на 14...49 % за период эффективного действия мероприятий в зависимости от густоты культур. Комплексные уходы наилучшим образом отразились на приросте культур с первоначальной густотой 3,0 тыс. шт./га.

2. Культуры ели в 41-летнем возрасте имели следующие качественные характеристики прироста: количество годичных слоев в 1 см – 3,4...4,2 шт.; сред-

няя ширина годичного слоя – 2,4...2,9 мм; процент поздней древесины – 21...28. Качество древесины при данных показателях можно оценить как высокое.

3. После внесения минеральных удобрений и проведения разреживаний происходит уменьшение плотности древесины ели на 1...10 % в течении 4...7 лет после каждого приема ухода. В 41-летнем возрасте средняя плотность в вариантах с одинаковой первоначальной густотой не имела существенных отличий и независимо от проведенных мероприятий достигала высоких значений (365...379 кг/м³). По данному показателю древесина культур ели соответствовала средним значениям естественно произрастающих еловых древостоев таежной зоны [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсеньева Т.В., Чавчавадзе Е.С.* Эколого-анатомические аспекты изменчивости древесины сосновых из промышленных районов Европейского Севера. СПб.: Наука, 2001. 109 с.
2. *Бабич Н.А., Гаевский Н.П., Конюшатов О.А.* Культуры ели Вологодской области. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. 160 с.
3. *Корчагов С.А.* Повышение качественной продуктивности насаждений на лесоводственной основе: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2010. 42 с.
4. *Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А.* Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с.
5. *Мелехов И.С.* Значение структуры годичных слоев и ее динамики в лесоводстве и дендроклиматологии // Лесн. журн. 1979. № 4. С. 7–14. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. *Мелехов И.С.* Повышение продуктивности лесов – межотраслевая проблема // Лесн. журн. 1987. № 1. С. 3–14. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Мельников Е.С.* Целевое выращивание еловых древостоев на основе сочетания рубок ухода с внесением удобрений: метод. рекомендации. Л.: ЛенНИИЛХ, 1986. 33 с.
8. *Мельников Е.С., Смирнов А.А.* Влияние комплексного ухода на качество древесины высокопродуктивных ельников // Лесн. журн. 2006. № 4. С. 89–99. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. *Нехайчук О.Г., Москалева В.Е.* Влияние лесохозяйственных факторов на анатомическое строение древесины ели, сосны и лиственницы // Лесоведение. 1979. № 4. С. 38–43.
10. *Пеккоев А.Н.* Влияние лесоводственных уходов на рост культур сосны и качество древесины в подзоне средней тайги // Проблемы лесоведения и лесоводства: материалы всеросс. конф. «Четвертые Мелеховские научные чтения, посвященные 105-летию со дня рождения И.С. Мелехова» (Архангельск, 10–12 ноября 2010 г.). Архангельск: САФУ, 2010. С. 97–101.
11. *Полубояринов О.И.* Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
12. *Редько Г.И., Бабич Н.А.* Лесовосстановление на Европейском Севере России. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1994. 188 с.
13. *Сеннов С.Н.* Рубки ухода за лесом. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 160 с.
14. *Сеннов С.Н., Соколовский Б.Г.* Рубки ухода в культурах ели // Выращивание и формирование высокопродуктивных насаждений в южной подзоне тайги. Л.: ЛенНИИЛХ, 1984. С. 111–117.
15. *Синькевич Т.А., Синькевич С.М.* Комплексный уход в лиственнично-еловых лесах Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1991. 136 с.

16. Сляднев А.П. Комплексный способ выращивания сосновых насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 104 с.
17. Смирнов А.А. Особенности влияния регулярного ухода за лесом на продуктивность древостоев и качество древесины ели: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2007. 20 с.
18. Соколов А.И. Лесовосстановление на Северо-Западе России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 215 с.
19. Соколов А.И., Пеккоев А.Н., Харитонов В.А., Кривенко Т.И. Ускоренное выращивание культур ели в среднетаежной подзоне Карелии // Лесн. журн. 2013. № 5. С. 96–105. (Изв. высш. учеб. заведений).
20. Соколов А.И., Пеккоев А.Н., Харитонов В.А. Результаты первых опытных работ по выращиванию плантационных культур сосны и ели в условиях средней тайги Карелии // Инновации и технологии в лесном хозяйстве: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 6-7 февраля 2012 г.). Ч. 2. СПб: СПбНИИЛХ, 2012. С. 177–181.
21. Чибисов Г.А. Влияние коридорного ухода на качество древесины ели // Лесн. журн. 1968. № 4. С. 137–138. (Изв. высш. учеб. заведений).
22. 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.
23. Чибисов Г.А., Москалева С.А. Влияние рубок ухода на технические свойства ели // Лесн. хоз-во. 1984. № 4. С. 12–14.
24. Штукин С.С. Ускоренное выращивание сосны, ели и лиственницы на лесных плантациях. Минск: ИООО «Право и экономика», 2004. 242 с.
25. Шутов И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А., Полянский Е.В., Бельков В.П., Гладков Е.Г., Головачевский И.Н., Рябинин Б.Н., Морозов В.А., Шиманский П.С. Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). М.: Лесн. пром-сть, 1984. 248 с.

Поступила 20.01.15

УДК 630*232.42 + 630*236.2
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.89

Wood Quality of Spruce Crops under Intensive Growing

A.N. Pekkoev, Candidate of Agricultural Sciences, Research Officer
Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation;
e-mail: pek-aleksei@list.ru

The resources of mature coniferous wood in the Northwest of Russia have been depleted. This fact demands the intensive reproduction of wood. The basic way of the rapid procurement of large-sized and pulpwood deal is the establishment of plantation crops. The leading factors, determining the growth rate of plantation crops, are thinning and fertilizing. The purpose of the research is the wood quality assessment of the middle-aged spruce crops under the intensive rate of growth. The spruce crops were planted in the bilberry site with different initial density (1, 2, 3, and 4 thous. crops / Ha). Thinning and fertilizing were performed in the course of their growth. Thinning in combination with the mineral fertilizers (complex thinning) encouraged

an increase of the annual ring width depending on the density of crops by 14 ... 49 % during the fertilizing period. Complex thinning was best reflected on the growth of crops with the initial density of 3.0 thous. crops / Ha. Fertilizing and thinning reduced the density of the spruce wood by 1 ... 10 % for 4 ... 7 years. The average density of the 41-year-old crops in the variants with the same initial density had no significant differences, and reached high values (365 ... 379 kg / m³). According to that index the wood of spruce crops was not beyond the average values of naturally growing spruce stands of the taiga zone. The spruce crops of 41-years of age had the following qualitative growth rates: the number of annual rings in 1 cm was 3.4 ... 4.2; the average width of the annual ring – 2.4 ... 2.9 mm; the percentage of latewood – 21 ... 28. These indexes characterize the wood quality as high.

Keywords: spruce crops, thinning, fertilization, wood quality, radial increment, density.

REFERENCES

1. Arsen'eva T.V., Chavchavadze E.S. *Ekologo-anatomicheskie aspekty izmenchivosti drevesiny sosnovykh iz promyshlennykh rayonov Evropeyskogo Severa* [Ecological and Anatomical Aspects of the Variability of Pine Wood of the Industrial Areas of the European North]. St. Petersburg, 2001. 109 p.
2. Babich N.A., Gaevskiy N.P., Konyushatov O.A. *Kul'tury eli Vologodskoy oblasti* [Spruce Crops in the Vologda Region]. Arkhangelsk, 2000. 160 p.
3. Korchagov S.A. *Povyshenie kachestvennoy produktivnosti nasazhdeniy na lesovodstvennoy osnove: avtoref. dis. ... dok. s.-kh. nauk* [Improving of Quality Productivity of Plantations on the Silvicultural Basis: Doc. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Arkhangelsk, 2010. 42 p.
4. Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Kachestvo drevesiny sosny v kul'turakh* [The Quality of Pine Wood in Planted Crops]. Arkhangelsk, 2003. 110 p.
5. Melekhov I.S. Znachenie struktury godichnykh sloev i ee dinamiki v lesovodstve i dendroklimatologii [The Value of Annual Rings Structure and Its Dynamics in Forestry and Dendroclimatology]. *Lesnoy zhurnal*, 1979, no. 4, pp. 7–14.
6. Melekhov I.S. Povyshenie produktivnosti lesov – mezhotraslevaya problema [Increasing the Productivity of Forests is the Inter-Industry Problem]. *Lesnoy zhurnal*, 1987, no. 1, pp. 3–14.
7. Mel'nikov E.S. *Tselevoe vyrashchivanie elovykh drevostoev na osnove sochetaniya rubok ukhoda s vneseniem udobreniy: metod. rekomendatsii* [Targeted Cultivation of Spruce Stands on the Basis of Combination of Thinning and Fertilizers: Manual]. Leningrad, 1986. 33 p.
8. Mel'nikov E.S., Smirnov A.A. Vliyanie kompleksnogo ukhoda na kachestvo drevesiny vysokoproduktivnykh el'nikov [The Influence of Thinning on the Wood Quality of High-Yielding Spruce Forests]. *Lesnoy zhurnal*, 2006, no. 4, pp. 89–99.
9. Nekhaychuk O.G., Moskaleva V.E. Vliyanie lesokhozyaystvennykh faktorov na anatomicheskoe stroenie drevesiny eli, sosny i listvennitsy [The Impact of Forest Management Factors on the Anatomical Structure of Wood of Spruce, Pine and Larch]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1979, no. 4, pp. 38–43.
10. Pekkoev A.N. Vliyanie lesovodstvennykh ukhodov na rost kul'tur sosny i kachestvo drevesiny v podzone sredney taygi [The Effect of Silvicultural Thinning on Pine Crop Growth and Quality of Wood in the Middle Taiga Subzone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: materialy vseross. konf. "Chetvertye Melekhovskie nauchnye chteniya, posvyashchennye 105-letiyu so dnya rozhdeniya I.S. Melekhov"* (Arkhangel'sk, 10–12 noyabrya 2010 g.) [Problems of Forestry: Proc. of All-Russian Conf. "The Fourth Melekhov's Scientific Readings, Dedicated to the 105th Anniversary of I.S. Melekhov" (Arkhangelsk, 10–12 November, 2010)]. Arkhangelsk, 2010, pp. 97–101.

11. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Wood Density]. Moscow, 1976. 160 p.
12. Red'ko G.I., Babich N.A. *Lesovosstanovlenie na Evropeyskom Severe Rossii* [Reforestation in the European North of Russia]. Arkhangelsk, 1994. 188 p.
13. Sennov S.N. *Rubki ukhoda za lesom* [Forest Thinnings]. Moscow, 1977. 160 p.
14. Sennov S.N., Sokolovskiy B.G. *Rubki ukhoda v kul'turakh eli* [Thinning in the Spruce Crops]. *Vyrashchivanie i formirovanie vysokoproduktivnykh nasazhdeniy v yuzhnoy podzone taygi* [Growing and Formation of High-Yield Plantations in the Southern Taiga Subzone]. Leningrad, 1984, pp. 111–117.
15. Sin'kevich T.A., Sin'kevich S.M. *Kompleksnyy ukhod v listvenno-elovykh lesakh Karelii* [Complex Thinning in the Deciduous-Spruce Forests of Karelia]. Petrozavodsk, 1991. 136 p.
16. Slyadnev A.P. *Kompleksnyy sposob vyrashchivaniya sosnovykh nasazhdeniy* [An Integrated Method of Growing of Pine Plantations]. Moscow, 1971. 104 p.
17. Smirnov A.A. *Osobennosti vliyaniya regul'yarnogo ukhoda za lesom na produktivnost' drevostoev i kachestvo drevesiny eli*: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk [Features of Influence of Regular Thinning on the Productivity of the Forest Stands and the Quality of Spruce Wood: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Arkhangelsk, 2007. 20 p.
18. Sokolov A.I. *Lesovosstanovlenie na severo-zapade Rossii* [Reforestation in the Northwest of Russia]. Petrozavodsk, 2006. 215 p.
19. Sokolov A.I., Pekkoev A.N., Kharitonov V.A., Krivenko T.I. *Uskorennoe vyrashchivanie kul'tur eli v srednetaezhnoy podzone Karelii* [Fast Growing of Spruce Crops in the Middle Taiga Subzone of Karelia]. *Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 96–105.
20. Sokolov A.I., Pekkoev A.N., Kharitonov V.A. *Rezultaty pervykh opytnykh rabot po vyrashchivaniyu plantatsionnykh kul'tur sosny i eli v usloviyakh sredney taygi Karelii* [The Results of the First Experiments on the Cultivation of Plantation Crops of Pine and Spruce in the Middle Taiga of Karelia]. *Materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaystve"* (Sankt-Peterburg, 6–7 fevralya 2012 g.). Ch. 2. [Proc. of the II Int. Sci. and Pract. Conf. "Innovations and Technology in Forestry" (St. Petersburg, 6–7 February, 2012). Part 2]. St. Petersburg, 2012, pp. 177–181.
21. Chibisov G.A. *Vliyanie koridornogo ukhoda na kachestvo drevesiny eli* [The Impact of Corridor Thinning on the Quality of Spruce Wood]. *Lesnoy zhurnal*, 1968, no. 4, pp. 137–138.
22. Chibisov G.A., Moskaleva S.A. *Vliyanie kompleksnykh ukhodov na anatomicheskie svoystva drevesiny sosny* [The Influence of Thinning on the Anatomical Properties of Spruce]. *Lesovodstvenno-ekonomicheskie voprosy vosproizvodstva lesnykh resursov Evropeyskogo Severa* [Silvicultural and Economic Issues of Reproduction of the Forest Resources of the European North]. Arkhangelsk, 2000, pp. 74–82.
23. Chibisov G.A., Moskaleva S.A. *Vliyanie rubok ukhoda na tekhnicheskie svoystva eli* [The Influence of Thinning on the Technical Properties of Spruce]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1984, no. 4, pp. 12–14.
24. Shtukin S.S. *Uskorennoe vyrashchivanie sosny, eli i listvennitsy na lesnykh plantatsiyakh* [Intensive Growing of Pine, Spruce and Larch in the Forest Plantations]. Minsk, 2004. 242 p.
25. Shutov I.V., Maslakov E.L., Markova I.A., Polyanskiy E.V., Bel'kov V.P., Gladkov E.G., Golovchanskiy I.N., Ryabinin B.N., Morozov V.A., Shimanskiy P.S. *Lesnye plantatsii (uskorennoe vyrashchivanie eli i sosny)* [Forest Plantations (Intensive Cultivation of Spruce and Pine)]. Moscow, 1984. 248 p.

Received on January 20, 2015

УДК 630*161.4:631.811.1
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.100

ВЛИЯНИЕ ПРОРЕЖИВАНИЯ И АЗОТА НА СЕЗОННУЮ ДИНАМИКУ ДЫХАНИЯ КОРНЕЙ СОСНЫ И ЕЛИ

© Л.В. Зарубина¹, канд. с.-х. наук, доц.
В.Н. Коновалов², д-р с.-х. наук, проф.

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; e-mail: Liliva270975@yandex.ru

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

Изучена сезонная динамика дыхания корней сосны и ели в таежных фитоценозах Севера в зависимости от условий светового и азотного питания. Выявлено, что корни древесных пород наиболее активно дышат (по выделению CO₂) в июне–июле (в период роста вегетативных органов), в августе (с окончанием роста побегов), несмотря на благоприятные погодные условия, интенсивность дыхания корневых систем у этих древесных пород снижается. В июле мелкие всасывающие корни сосны в сосняке лишайниковом при температуре 20,0 °С дышат с активностью 1,52 мг CO₂/(г сухой массы хвои·ч), в августе при такой же температуре их дыхание обычно не превышает 1,09 мг CO₂/(г·ч). Выборочные рубки в березняках черничных через 5...8 лет до 25...35 тыс. лк увеличивают освещенность под пологом, на 2 нед. сокращают период прогревания корнеобитаемого слоя почвы до активных для корней температур и в 1,4–1,9 раза усиливают дыхание корней угнетенной ели. Необходимый уровень освещенности, обеспечивающий успешную работу корней угнетенной ели в 53- и 59-летних березняках, достигается при вырубке 50...52 % березы по запасу. Азотные удобрения, вносимые в сосняки лишайниковые и березняки черничные, увеличивают дыхание корней сосны и ели в 1,4–1,7 раза и интенсифицируют физиологическую деятельность всего дерева. Рекомендуемая доза азота, обеспечивающая активную работу корневых систем деревьев, составляет около 180 кг действующего вещества/1 га. Повышенные дозы азота, как и его недостаток, при обычных климатических условиях подавляют энергетическую активность корней, нарушают физиологическую и ростовую активность в надземных частях дерева, в дождливую погоду они повышают выделение CO₂ корнями. Выборочные рубки в березняках черничных усиливают деятельность корневой системы угнетенной ели, незначительно снижая при этом положительное действие на дыхательный метаболизм корней вносимого в древостой азота. Установлено, что по интенсивности дыхания корней, можно реально определить и установить такие параметры разреживания древесного полога и дозы вносимой минеральной подкормки, которые будут соответствовать наибольшему повышению продуктивности насаждения.

Ключевые слова: дыхание корней, сосна, ель, азот, рубки.

Введение

Корни являются не только органом снабжения растения питательными веществами и водой, но и местом синтеза весьма сложных специфических

веществ, таких как, пигменты, некоторые фитогормоны, нуклеопротеиды, фосфолипиды, аминокислоты и др. [2, 8, 15, 17, 24, 25, 30–32]. Транспортируясь вверх по стеблю, эти сложные биологические соединения способны существенно изменять регуляцию метаболических процессов в надземных частях растений. В связи с этим считается, что интенсивность дыхания корней может служить адекватным и достаточно информативным показателем оценки влияния солей на общее состояние растения и его энергетический баланс [15, 25].

Минеральные удобрения, улучшая питательные свойства лесных почв, свое влияние, прежде всего, распространяют на корневые системы растений, воздействуя на их энергетическое состояние, активно включаясь в их метаболизм [13–15]. Установлено, что на внесение минеральных удобрений корни реагируют сразу, как только минеральные соли достигают зоны корня, в то время как надземные органы дерева реагируют на них лишь с некоторым лаг-периодом [7]. Поэтому для понимания механизма действия удобрений на растение важно в первую очередь детально исследовать степень влияния минеральной соли на состояние его корневой системы.

В литературе имеются немногочисленные работы по дыханию корней древесных растений на удобренных почвах [1, 9, 10]. В этих работах показано, что при дефиците питательных элементов у растений падает дыхание корней и поглощение ими из почвы питательных элементов и воды. В самом растении замедляется передвижение продуктов фотосинтеза, в клетках листа происходит разрушение фотосинтетических мембран, нарушаются и др. физиологические процессы [2, 9–11, 15, 23, 25].

Цель данного исследования – изучить особенности сезонной динамики дыхания корней сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* Karst. (*Pinaceae*)) в разных типах леса Севера при различных уровнях азотного и светового питания.

Методы исследования

Объектами исследования служили 25-летние сосняки лишайниковые (состав 10С, Лешуконский район Архангельской области), 53- и 59-летние березняки черничные (8Б1С1Е, Левашское лесничество Архангельской области). В сосняках изучалось влияние разных доз азота (0, N₁₂₀, N₁₈₀, N₂₄₀) на дыхание корней сосны, в березняках – влияние разных доз азота (0, N₁₈₀, N₂₇₀) на дыхание корней ели по фону различной интенсивности рубки (0, 35, 50, 70 %) березы (коридорным способом). Перед опытом высота сосны была 1,8...2,0 м, березы – 14,0...16,0 м, диаметр березы – 12,1...14,2 см. Делянки для внесения удобрений (каждая размером 40×50 м, повторность 2–3-кратная) заложены на равнинных участках древостоев. Азотные удобрения в виде мочевины внесены в почву перед началом вегетации (1–9 июня) в сосняки лишайниковые в 1981 г., в 53-летние березняки – в 1992 г., в 59-летние березняки – в 2002 г. Контролем служили аналогичные соседние неудобренные участки насаждений.

Интенсивность дыхания определяли по скорости выделения CO_2 в темноте [4] на отделенных от дерева корнях, используя метод, описанный нами ранее [5, 12]. Ряд авторов подчеркивают, что эндогенный ритм дыхания в соответствии с условиями местопроизрастания сохраняется в течение длительного времени и у корней, отделенных от дерева. При этом не отмечается высокого травматического дыхания даже при сильном поранении корней [16]. Перед подготовкой опыта корни осторожно откапывали, очищали от комочков почвы. В целях недопущения пересыхания корни до отделения их от дерева и помещения в колбы осторожно присыпали свежевыкопанной почвой. При выделении фракций корней пользовались классификацией А.Я. Орлова, С.П. Кошелькова [20]. Во фракцию мелких корней были включены все сосущие корни диаметром до 1,5 мм, во фракцию проводящих корней – ростовые и проводящие диаметром 1,5...3,0 мм. Для каждой фракции составляли среднюю пробу от 2-3 деревьев. Повторность каждого определения 2–3-кратная. Для измерения температуры в камеру с колбами были вмонтированы 2 термометра. Экспозиция корней в колбах составляла 1 ч. Интенсивность дыхания корней рассчитывали в миллиграммах углекислого газа (CO_2) на единицу массы в абс. сухом состоянии за 1 ч.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных по дыханию корней сосны в 25-летнем сосняке лишайниковом в контроле по ходу вегетации показал, что у сосны наиболее интенсивное дыхание корней происходит в первой половине вегетационного периода во время роста молодых побегов (табл. 1). Согласно литературным данным у древесных растений в этот период наблюдается также интенсивный рост корней [26] и наиболее активное поглощение ими из почвы минеральных солей [3, 22, 25, 27]. Поэтому для успешной деятельности всего растения корни в этот период должны быть максимально обеспечены основными факторами жизни, а именно: достаточным количеством минерального питания и влагой, а также углеводами, поступающими из кроны, как основным энергетическим материалом, используемым при их работе [10, 11].

В конце лета, когда рост побегов завершается, дыхание корней, несмотря на теплую погоду, значительно ослабевает. Так, 15 июня (табл. 1) мелкие всасывающие корни при температуре 20 °С дышали с активностью 1,52 мг CO_2 /(г·ч), а 20 августа при такой же температуре интенсивность дыхания их была заметно ниже и не превышала 1,09 мг CO_2 /(г·ч). Эта закономерность сезонной динамики дыхания корней у хвойных растений подтверждена также нашими наблюдениями в заполярных лишайниковых борах бассейна р. Нижняя Пёша (66°45' с.ш.) [12].

Повышение уровня азотного питания путем внесения азотных удобрений привело к существенной перестройке дыхательной активности корней сосны. При этом разные дозы азота вызывали неодинаковый эффект.

Таблица 1

Влияние дозы азота на дыхание мелких (числитель) и проводящих (знаменатель) корней сосны (мг CO₂/(г·ч)) в 25-летнем сосняке лишайниковом на второй год после внесения (1982 г.)

Дата наблюдения	Температура воздуха в камере, °С	Контроль	Опыт		
			N ₁₂₀	N ₁₈₀	N ₂₄₀
13.VI	14,0	<u>1,1</u>	<u>1,2</u>	<u>1,5</u>	<u>1,4</u>
–	15,2	0,7	0,8	1,0	0,9
		<u>1,2</u>	<u>1,4</u>	<u>1,6</u>	<u>1,5</u>
15.VI	20,0	0,8	0,9	1,0	1,0
		<u>1,5</u>	<u>2,0</u>	<u>2,2</u>	<u>2,4</u>
16.VI	19,2	1,1	1,2	1,3	1,4
		<u>1,4</u>	<u>1,8</u>	<u>2,0</u>	<u>2,3</u>
4.VIII	17,6	1,0	1,4	1,2	1,2
		<u>1,3</u>	<u>1,6</u>	<u>1,8</u>	<u>2,2</u>
10.VIII	24,0	0,8	0,9	1,1	1,2
		<u>1,4</u>	<u>2,0</u>	<u>2,3</u>	<u>2,5</u>
20.VIII	20,8	0,8	1,4	1,5	1,5
		<u>1,1</u>	<u>1,7</u>	<u>1,8</u>	<u>1,9</u>
		0,7	1,0	1,0	1,2
<i>Среднее:</i>					
мг CO ₂ /(г·ч)		<u>1,23</u>	<u>1,67</u>	<u>1,90</u>	<u>2,05</u>
%		0,84	1,09	1,16	1,20
		<u>100</u>	<u>136</u>	<u>154</u>	<u>166</u>
		100	130	138	143

В первый год (1981 г.) наибольшее положительное действие на дыхание оказала доза N₁₈₀. У сосен этого варианта количество выделившегося при дыхании корней углекислого газа составляло 1,9...2,3 мг CO₂/(г·ч), что в 1,4 раза больше, чем в контроле. Самое низкое дыхание отмечалось на участках с дозой N₁₂₀, при температуре 20,6 °С оно не превышало 1,9...2,3 мг CO₂/(г·ч), в контроле – 1,5 мг CO₂/(г·ч). Внесение удвоенной дозы удобрения (N₂₄₀) в начале периода вегетации ингибировало дыхание корней (количество выделившейся CO₂ здесь было на 14...21 % меньше, чем в контроле), а в конце периода оно слабо влияло на этот процесс. На участке с этой дозой замечено побурение и частичное отмирание светлых корневых окончаний. Следует отметить, что явление повреждения и даже гибели корней у хвойных пород при внесении повышенных доз удобрений характерно для многих древостоев [1, 3, 12, 27–29]. Нарушения в корнях часто служили основной причиной усыхания древостоев ели [1]. Наряду с гибелью корней эта доза азота почти на 30 % снизила, по сравнению с контролем, приток к корням ¹⁴C-ассимилятов – основного дыхательного материала [10]. К 23 июля средняя интенсивность дыхания мелких корней на контрольной делянке составляла 1,5±0,08, на опытных участках (N₁₂₀, N₁₈₀, N₂₄₀) – соответственно 1,9±0,16; 2,1±0,28; 1,6±0,25 мг CO₂/(г·ч).

Статистическая проверка по критерию Стьюдента ($t_{\text{факт}}$) подтвердила достоверность различий по этому показателю между экспериментальными значениями и контролем лишь для N_{120} и N_{180} ($t_{\text{факт}} = 4,0; 5,9$ при $t_{\text{ст},0,95} = 2,4$). Для варианта N_{240} эти различия оказались недостоверными ($t_{\text{ст},0,95} = 0,2$).

На второй год (1982 г.) все дозы азота усилили выделение CO_2 корнями. Уже в начале вегетационного периода дыхание корней сосны на делянках с азотом оказалось значительно выше, чем в контроле. Наиболее активное дыхание наблюдалось на делянках с N_{180} и N_{240} и превышало контроль в 1,3–1,7 раза. За сезон средняя интенсивность дыхания мелких корней в контроле и на опытных делянках (N_{120} , N_{180} , N_{240}) составляла соответственно $1,3 \pm 0,06$; $1,7 \pm 0,13$; $1,9 \pm 0,12$; $2,1 \pm 0,17$ мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$. Различия существенны и достоверны ($t_{\text{факт}} = 3,0 \dots 4,5$).

Данные эксперимента в 53-летнем березняке черничном показали (табл. 2), что выделение корнями CO_2 у угнетенной ели заметно активизируется сразу, как только удобрение достигает расположения корней. В березняке, как и у сосны в сосняке, разные дозы азота на дыхании корней ели сказались неоднозначно.

Таблица 2

Влияние мочевины и выборочной рубки на дыхание корней (мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$) подростя ели в 53-летнем березняке черничном в зависимости от сроков вегетационного периода (1992 г.)

Дата наблюдения	Температура воздуха, °С	Интенсивность рубки, %					
		0			70		
		Контроль	N_{180}	N_{270}	Контроль	N_{180}	N_{270}
24.VI	14,7	0,41	0,56	0,44	0,68	0,87	0,60
12.VII	17,2	0,59	1,00	0,61	0,74	0,94	0,64
28.VII	19,1	0,66	1,22	0,72	0,88	1,16	0,90
20.VIII	17,8	0,50	0,96	0,59	0,73	0,94	0,90
<i>Среднее:</i>							
мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$		0,53	0,94	0,59	0,77	0,98	0,76
%		100	177	111	100	129	99

В первый год (1992 г.) из всех применяемых в опыте доз азота наиболее сильное положительное действие на дыхание корневой системы ели оказал азот в количестве 180 кг/га. У подпологовой ели в данном варианте неразрезанной секции количество выделяющегося при дыхании корней CO_2 превышало контроль на 77 %, на секции с рубкой (70 %) – на 29 %. А.Я. Орлов [19] считает, что основной причиной высокого дыхания корней у ели в условиях затенения на тех участках, где был внесен азот, является ослабление корневой конкуренции этим элементом и более активное поглощение его корнями из почвы, чем на вырубках. Одна выборочная рубка в зависимости от ее интенсивности (35, 50, 70 %) усиливала дыхание корней ели на 23...85 % [6].

Внесение повышенной дозы азота (N_{270}) в начале вегетационного периода нарушило нормальное дыхание корней ели. В разреженной секции на

делянках с этой дозой количество выделяемого корнями CO_2 в отдельные дни было на 11...13 % меньше, чем в контроле. В контрольной секции (без рубки) эта доза азота также слабо влияла на данный процесс. На делянках с повышенной дозой (N_{270}) дыхание корней было выше контроля лишь на 11 %. По данным раскопок обнаружилось, что на делянках с повышенной дозой азота корни не росли, фактически почти все светлые корневые окончания у них отмерли. Однако в конце вегетации и эта доза азота также усиливала дыхание, но очень слабо. Количество выделяемого корнями CO_2 в этот период превышало контроль лишь на 18...22 %.

Одной из возможных причин ослабления дыхания корней под действием высокой дозы азота вполне могло явиться нарушение работы корневых оксидаз [15, 18] и ослабленный приток к корням ассимилятов [6, 10]. Наши опыты с применением меченого углерода (^{14}C) показали, что на максимально разреженной секции в расчете на 1 г абс. сухой массы за 8 сут в корни контрольных растений поступило 223...381 имп./мин сложных радионуклидных соединений, а на участке с N_{180} этой же секции – 519...746 имп./мин. За счет действия одного азота к корням из кроны за этот период притекло 296...365 имп./мин. На делянках, в которых была внесена повышенная доза удобрения (N_{270}), количество поступивших в корни ели меченых ассимилятов, оказалось таким же, как и у неудобренных растений – 211...391 имп./мин [6].

К 28 июля средняя интенсивность дыхания мелких корней ели на контрольной площадке неразрезанной секции при температуре 19,1 °С в среднем составляла $0,66 \pm 0,08$, на опытных площадках (N_{180} , N_{270}) соответственно $1,22 \pm 0,16$ и $0,72 \pm 0,06$ мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$. Расчетные значения t-критерия Стьюдента при числе степеней свободы $\nu = 4$ и уровне значимости $P = 5\%$ превысили критический уровень ($t_{\text{ст},0,95} = 2,8$) лишь для варианта N_{180} ($t_{\text{факт}} = 4,7$). Для варианта N_{270} значения этого показателя оказались недостоверными ($t_{\text{факт}} = 0,3$). Для среднего подростка ели на интенсивно разреженной секции (70 %, полнота 0,2) значения этого показателя в контроле и в вариантах N_{180} , N_{270} при такой же температуре составили соответственно $0,88 \pm 0,07$; $1,16 \pm 0,13$; $0,90 \pm 0,17$ мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$ при $t_{\text{факт}}$ с контролем = 3,2 и 0,2.

На второй год (1983 г.) все дозы азота усилили выделение CO_2 корнями ели. В июне–августе дыхание корней среднего подростка на удобренных площадках превышало дыхание корней контрольных растений на 17...78 % и значительно превосходило необходимый доверительный уровень (табл. 3). Наибольшее положительное действие на дыхание оказала доза удобрения N_{180} . Как и в первый год, наиболее интенсивное выделение CO_2 корнями под действием азота наблюдалось на площадках неразрезанной секции, где превышало контроль на 67...78 %.

Разная интенсивность рубки (табл. 3) и на второй год определенным образом сказалась на эффективности действия внесенного удобрения на дыхание корней. Увеличение интенсивности рубки от 50 до 70 % повысило дыхание корней молодой ели лишь на 4 %, но при этом оно несколько снизило действие

Таблица 3

**Влияние выборочной рубки и дозы азота на дыхание (мг CO₂/(г·ч))
корней подроста ели в 53-летнем березняке черничном (1993 г.)**

Интенсивность рубки, %	Контроль	N ₁₈₀				N ₂₇₀		
	<i>M±m</i>	<i>M±m</i>	<i>t</i> _{факт}	%	<i>M±m</i>	<i>t</i> _{факт}	%	
0	0,41±0,01	0,68±0,01	6,4	167	0,73±0,01	3,6	178	
50	0,66±0,02	0,79±0,03	2,7	120	0,84±0,03	3,3	127	
70	0,71±0,04	0,83±0,02	2,4	117	0,88±0,01	3,3	124	

Примечание. Здесь и далее, в табл. 4, *M±m* – среднее статистическое значение и стандартная ошибка; *t*_{факт} – достоверность различий между средними значениями; % – процент от контроля.

азота на дыхание корней по отношению к общему контролю. Дисперсионный анализ выявил более существенное влияние на дыхание корней выборочной рубки, чем влияние внесенного в насаждение азота. Расчеты показали, что на второй год (1993 г.) на секции с интенсивностью рубки 70 % положительное влияние рубки на дыхание корней ели составило 64 %, действие одного азота – 36 %; на секции с интенсивностью рубки 50 % при дозе N₁₈₀ – соответственно 66 и 34 %, при дозе N₂₇₀ – 58 и 42 %.

В другой серии опытов с минеральным азотом, которая была заложена в 59-летнем березняке черничном на участке промышленной рубки березы, нами был отмечен несколько отличный от предыдущего опыта характер действия повышенной дозы азота на дыхание корней ели (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние мочевины на дыхание мелких (числитель) и проводящих (знаменатель)
корней подроста ели (мг CO₂/(г·ч)) в 59-летнем березняке черничном
на участке промышленной рубки (2002 г.)**

Интенсивность рубки, %	Температура воздуха, °С	N ₀ *	N ₁₈₀				N ₂₇₀		
		<i>M±m</i>	<i>M±m</i>	<i>t</i> _{факт}	%	<i>M±m</i>	<i>t</i> _{факт}	%	
0	18,2	<u>0,71±0,12</u>	<u>0,99±0,09</u>	<u>3,4</u>	<u>139</u>	<u>1,12±0,17</u>	<u>3,6</u>	<u>158</u>	
		0,39±0,05	0,58±0,07	3,7	149	0,66±0,06	4,4	169	
52	20,6	<u>1,08±0,13</u>	<u>1,39±0,14</u>	<u>2,9</u>	<u>129</u>	<u>1,46±0,18</u>	<u>3,3</u>	<u>136</u>	
		0,67±0,03	0,80±0,06	3,1	119	0,89±0,13	3,5	133	

*Без внесения удобрений.

Анализ результатов исследований показал, что уже в первый год (2002 г.) обе дозы азота значительно усилили выделение CO₂ корнями угнетенного подроста ели, причем более существенно дыхание корней повысилось в неухоженном насаждении, значительно в меньшей мере – на участке с рубкой. Под влиянием азота интенсивность дыхания мелких корней в неразрезанном насаждении возросла в 1,4–1,6 раза, проводящих – в 1,5–1,7 раза. Наиболее существенно

дыхание повысилось под влиянием N_{270} кг/га, а не дозы N_{180} , как это первоначально предполагалось по аналогии с предыдущими опытами. Возможно, что снятию негативного действия повышенной дозы азота на корни в этот год могли способствовать частые ливневые дожди, начавшиеся сразу же после внесения удобрений в почву и значительно промочившие ее. Это обеспечило быстрое растворение удобрений и возможную миграцию их части за пределы корнеобитаемого слоя, что понизило концентрацию азота в зоне корней. Разница средних значений дыхания мелких корней между контрольными и опытными площадками здесь оказалась достаточно высокой и по критерию Стьюдента для обоих вариантов опыта (N_{180} и N_{270}) значительно превышала необходимый доверительный уровень ($t_{\text{факт}} = 3,4$ и $3,6$ соответственно).

Внесение азота в почву разреженной секции и в этом опыте оказалось менее эффективным мероприятием, чем его действие в контрольной секции. Корни осветленного и удобренного азотом подроста дышали лишь на 19...36 % интенсивнее, чем корни осветленных, но не удобренных растений. За сезон средняя интенсивность дыхания мелких корней в контроле и на опытных делянках (N_{180} , N_{270}) неразрезанной секции составляла соответственно $0,71 \pm 0,12$; $0,99 \pm 0,09$; $1,12 \pm 0,17$; на секции с рубкой – $1,08 \pm 0,13$; $1,39 \pm 0,14$; $1,46 \pm 0,18$ мг $\text{CO}_2/(\text{г}\cdot\text{ч})$. В обоих случаях различия существенны и достоверны ($t_{\text{факт}} = 2,9 \dots 3,6$). Дисперсионный анализ данных показал, что в варианте с дозой азота 180 кг/га влияние рубки на дыхание мелких корней составило 54 %, влияние одного азота – 46 %, в варианте с дозой 270 кг/га – 49 и 51 % соответственно. Для проводящих корней получены следующие показатели: в варианте N_{180} – 68 и 32 %, в варианте N_{270} – 56 и 44 %. На второй год азот также продолжал оказывать положительное действие на дыхание корней подпологовой ели.

Под действием комплексного ухода (рубка + азот) эффект оказался более значительным, чем при раздельном действии каждого из указанных экологических факторов. Интенсивность дыхания корней у елового подростка на удобренных делянках разреженной секции по отношению к общему контролю, где рубка березы и внесение удобрений не проводили, была в 1,9–2,3 раза выше.

Таким образом, вносимые в сосновые молодняки и березняки азотные удобрения существенно повышают энергетическую активность корней сосны и ели. Главной причиной активизации дыхания корней у опытных растений явилось лучшее обеспечение их энергетическим материалом из кроны [6, 10]. Усиление дыхания вполне могло быть обусловлено также активизацией под действием азота корневых оксидаз [18]. С повышением температуры воздуха в камере выделение CO_2 корнями усиливается, особенно на делянках с удобрениями. Следует отметить, что интенсивность дыхания мелких корней значительно выше, чем проводящих.

Полученные нами результаты исследований показали, что на Севере корни сосны и ели наиболее интенсивно дышат в июне–июле, в период роста вегетативных органов. В августе с окончанием роста побегов, несмотря

на благоприятные погодные условия, дыхание корней ослабевает. Недостаток света в березняках черничных ингибирует дыхание корней угнетенной ели, снижая их энергетический потенциал. При выборочных рубках дыхательная активность корней подпологовой ели напрямую зависит от степени разреживания листового полога. Необходимый уровень освещенности, обеспечивающий успешную работу корней ели в березняках, достигается при вырубке 50...52 % березы по запасу.

Бедность лесных почв азотом существенно снижает работоспособность корневых систем у сосны и ели, ограничивает выработку ими CO_2 , уменьшая их энергетический потенциал. С помощью азотных удобрений удается значительно повышать их энергетическое состояние. Главной причиной активизации дыхания корней у опытных растений является лучшее обеспечение их энергетическим материалом, притекающим из кроны в виде активных углеродных метаболитов [6, 10, 11]. Усиление дыхания вполне могло быть обусловлено также активизацией корневых оксидаз под действием азота [18]. С усилением дыхания в корнях активизируется также деятельность ферментов, связанных с усвоением элементов минерального питания [21]. Однако внесение в сосновые и березовые насаждения высоких доз минеральных солей нарушает физиологические функции и рост корневых систем. Это, в свою очередь, приводит к снижению обеспеченности корней ассимилятами [1, 11], ухудшению работы ассимиляционного аппарата в результате недопоставки в надземные органы питательных солей и воды [13, 14], затовариванию фотосинтезирующих клеток крахмалом, снижению роста и продуктивности растений [15, 20]. Повышенные дозы удобрений вызывают достаточно быстрое и значительное снижение интенсивности роста всех органов растения [7, 11]. Выборочные рубки в березняках черничных, уменьшая корневую конкуренцию, приводят к некоторому ослаблению положительного действия вносимого азота на дыхательный метаболизм корней. Доза азота, позволяющая обеспечивать активную работу корней ели в разреженных березняках черничных составляет около 180 кг действующего вещества (д.в.)/1 га.

Выводы

1. Корни сосны и ели наиболее интенсивно дышат в июне–июле, в период роста вегетативных органов. С окончанием их роста в августе, несмотря на благоприятные погодные условия, интенсивность дыхания корней ослабевает.

2. Недостаток света у сосны и ели ингибирует дыхание корней, снижая их энергетический потенциал. Выборочные рубки в березняках черничных через 5...8 лет в 3–5 раз увеличивают поступление под полог солнечной энергии и в 1,4–1,9 раз активизируют дыхательный метаболизм в корнях угнетенной ели. Это способствует усилению поступления в дерево элементов минерального питания и воды.

3. При выборочных рубках в березняках черничных дыхательная активность корней подпологовой ели напрямую зависит от степени разреживания

лиственного полога. Необходимый уровень освещенности, обеспечивающий успешную работу корней ели, достигается при вырубке 50...52 % березы по запасу.

4. Бедность лесных почв азотом отрицательно влияет на дыхание корней хвойных пород. Азотные удобрения, вносимые в сосняки и березняки, значительно повышают дыхательную активность корневых систем деревьев. В свою очередь, активизация дыхания под действием азота должна вызывать усиление ряда других функций корневых систем, таких как поглощающая, проводящая, синтетическая, повышать интенсивность фотосинтеза, активизировать донорно-акцепторные взаимодействия между органами, тем самым интенсифицируя физиолого-биохимическую деятельность во всем дереве. Рекомендуемая доза азота, обеспечивающая активную работу корневой системы сосны и ели в северо-таежных сосняках и березняках, составляет около 180 кг д.в./га.

5. Повышенные дозы азота, как и его недостаток, подавляют энергетическую деятельность корней, нарушают физиологическую и ростовую активность в надземных частях дерева.

6. Выборочные рубки в березняках черничных в результате уменьшения корневой конкуренции несколько снижают положительное действие вносимого азота на дыхательный метаболизм корней. В этих условиях рекомендуемая доза азота, позволяющая обеспечивать активную работу корней осветленной ели, составляет около 270 кг д.в./га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абражко М.А. Влияние азотных удобрений на изменение массы и фракционный состав корней ели // Лесоведение. 1986. № 6. С. 75–80.
2. Андреева Т.Ф. Фотосинтез и азотный обмен растений // Физиология фотосинтеза. М.: Наука, 1982. С. 89–104.
3. Банева Н.А. Реакция мелких корней на азотное удобрение // Лесоведение. 1990. № 2. С. 62–71.
4. Вальтер О.А., Пиневиц Л.М., Варасова Н.Н. Практикум по физиологии растений с основами биохимии. М.; Л.: Сельхозиздат, 1957. 341 с.
5. Веретенников А.В., Коновалов В.Н. Влияние осушения на интенсивность дыхания корней *Picea abies* (*Pinacea abies* Karst. (Pinaceae)) в ельнике осоково-сфагновом северной подзоны тайги // Бот. журн. 1979. Т. 64. С. 252–254.
6. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Влияние рубок на фотосинтез и отток ¹⁴C-ассимилятов у подростка ели в березняках черничных // Вестн. Поморского ун-та. 2011. № 3. С. 49–54.
7. Захарин А.А. Метод регистрации быстрой кинетики роста корней и надземных органов проростков // Физиология растений. 1993. Т. 40, № 6. С. 940–946.
8. Колосов И.И. Поглощительная деятельность корневых систем растений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 182 с.
9. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Биологические особенности подростка ели в березняках черничных после выборочных рубок // Вестник КрасГАУ. 2011. № 8. С. 99–104.

10. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Влияние дозы азота при подкормках на отток ^{14}C -ассимилятов у сосны в сосняках лишайниковых // Лесн. журн. 2012. № 1. С. 7–13. (Изв. высш. учеб. заведений).
11. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах. Архангельск: Изд-во САФУ, 2011. 338 с.
12. Коновалов В.Н., Листов А.А. Влияние условий минерального питания на дыхание корней сосны обыкновенной // Лесн. журн. 1989. № 4. С. 15–19. (Изв. высш. учеб. заведений).
13. Кулаева О.Н. К вопросу о влиянии корневой системы на обмен веществ // Роль минеральных элементов в обмене веществ и продуктивности растений. М.: Наука, 1964. С. 224–229.
14. Кулаева О.Н. Гормональная регуляция физиологических процессов у растений на уровне синтеза РНК и белка // 41-е Тимирязевское чтение. М.: Наука, 1982. 82 с.
15. Курсанов А.Л. Транспорт ассимилятов в растении. М.: Наука, 1976. 647 с.
16. Мамаев В.В. Суточные изменения интенсивности выделения CO_2 у корневых мочек сосны и березы в природных условиях // Лесоведение. 1983. № 3. С. 33–38.
17. Меняйло Л.Н. Гормональная регуляция ксилогенеза хвойных. Новосибирск: Наука СО, 1987. 185 с.
18. Обручева Н.В. Физиологическая характеристика зон корня // Роль минеральных элементов в обмене веществ и продуктивности растений. М.: Наука, 1964. С. 259–265.
19. Орлов А.Я., Кошельков С.П., Петров-Спиридонов А.А. Применение азотных удобрений для ускорения роста елового подроста на вырубках // Лесоведение. 1987. № 5. С. 20–28.
20. Орлов А.Я., Кошельков С.П. Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с.
21. Пешкова А.А. Ассимиляция азота в корнях и листьях проростков кукурузы в темноте и на свету // Физиология растений. 1991. Т. 38, № 1. С. 86–93.
22. Рахтеенко И.Н. Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений. Минск: Изд-во АН БССР, 1963. 254 с.
23. Репка И., Сарыч М., Марек Й. Влияние недостатка макроэлементов на структуру хлоропластов и продуктивность фотосинтеза у растений кукурузы // Физиология растений. 1971. Т. 18, вып. 6. С. 1107–1112.
24. Рубин А.Б., Германова В.Ф. О синтезе пигментов в корнях // ДАН СССР. 1959. Т. 124, № 4. С. 940–943.
25. Сабинин Д.А. Физиологические основы питания растений. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 474 с.
26. Смирнов В.В. Сезонный рост главных древесных пород. М.: Наука, 1964. 167 с.
27. Чернобровкина Н.П. Экофизиологическая характеристика использования азота сосной обыкновенной. СПб.: Наука, 2001. 175 с.
28. Щербаков А.П. Калий как регулятор ферментативных процессов в растениях. Сообщение 1 // Тр. ИФР АН СССР. 1946. Т. 1, вып. 2. С. 116–128.
29. Щербаков А.П. Калий как регулятор ферментативных процессов в растениях. Сообщение 2 // Тр. ИФР АН СССР. 1948. Т. 1, вып. 1. С. 180–192.
30. Mannerkoski H., Miyazawa T. Growth disturbances and needle and soil nutrient contents on a NPK – fertilized scots pine plantation on a drained small-sedge bog // Commun. Inst. Forestry. 1983. N 116. P. 85–91.

31. *Michniewicz M., Stopinska J.* The effect of nitrogen nutrition on growth and on plant hormones content in scots pine (*Pinus silvestris* L.) seedlings grown under light of different intensity//Acta Soc. Bot. Pol. 1980. Vol. 45. N 3. P. 221–234.

32. *Michniewicz M., Stopinska J.* The effect potassium nutrition on growth and on plant hormones content in scots pine (*Pinus silvestris* L.) seedlings grown under light of different intensity//Acta Soc. Bot. Pol. 1980. Vol. 49. N 3. P. 235–244.

Поступила 15.10.14

UDC 630*161.4:631.811.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.100

Impact of Thinning and Nitrogen on Seasonal Dynamics of Pine and Spruce Root Respiration

L.V. Zarubina¹, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

V.N. Konovalov², Doctor of Agricultural Sciences, Professor

¹Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, Schmidt st., 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: Liliva270975@yandex.ru

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

The paper studies the seasonal dynamics of pine and spruce root respiration in the northern taiga plant communities, depending on the light conditions and nitrogenous nutrition. The highest respiration rate (releasing CO₂) of roots of woody plants is observed in June and July in the period of the growth of the vegetative organs. In August when the shoot growth is completed, the intensity of pine and spruce root respiration rate decreases in spite of the favorable weather conditions. In July the respiration rate of absorbing pine roots in a lichen pine forest at the temperature of 20.0 °C is 1.52 mg CO₂ per g needle dry weight. In August the respiration rate at the same temperature does not normally exceed 1.09 mg CO₂. Selective cutting in the bilberry birch forests increases in 5–8 years the illumination under the canopy by 25–35 thous. lx, reduces the warming-up period of a soil root zone up to the root active temperature by 2 weeks, intensifies the root respiration rate of the overtopped spruce by 1.4–1.9 times. The illumination necessary for the efficient root activity of the overtopped spruce in the 53-, 59-years-old birch forests is reached by cutting of 50–52 % of birch growing stock. Nitrogen fertilizers, applied in the lichen pine forests and bilberry birch forests, increase the root respiration rate of pine and spruce by 1.4–1.7 times and intensify physiological activity of a tree. The nitrogen dosage necessary for the efficient activity of the tree root systems is approximately 180 kg of the primary nutrient per 1 ha. Both the increase and deficiency of a nitrogen dosage under the normal climate conditions reduce the energy rate of pine and spruce roots, disturb the physiological activity and growth rate in the aboveground tree portions. In the rainy conditions they intensify CO₂ releasing rate by the roots. Selective cutting in the bilberry birch forests intensifies the root activity of the overtopped spruce. Positive influence of nitrogen applied in the forest stands on the root respiratory metabolism as a result of the root competition for food is slightly reduced. According to the intensity of roots breathing, it is possible to define and set the parameters of thinning out of wood canopy and a dose of mineral feed for the highest productivity of plantings.

Keywords: root respiration, pine, spruce, nitrogen, cutting.

REFERENCES

1. Abrazhko M.A. Abrazhko M.A. Vliyanie azotnykh udobreniy na izmenenie massy i fraktsionnyy sostav korney eli [Effect of Nitrogen Fertilizer on the Change in Mass and Fractional Composition of Spruce Roots]. *Lesovedenie*, 1986, no. 6, pp. 75–80.
2. Andreeva T.F. Andreeva T.F. Fotosintez i azotnyy obmen rasteniy [Photosynthesis and Nitrogen Metabolism of Plants]. *Fiziologiya fotosinteza*, 1982, pp. 89–104.
3. Baneva N.A. Reaktsiya melkikh korney na azotnoe udobrenie [The Response of Fine Roots on the Nitrogen Fertilizer]. *Lesovedenie*, 1990, no. 2, pp. 62–71.
4. Walter O.A., Pinevich L.M., Varasova N.N. *Praktikum po fiziologii rasteniy s osnovami biokhimii* [Practical Course of Plant Physiology with the Principles of Biochemistry]. Moscow; Leningrad, 1957. 341 p.
5. Veretennikov A.V., Konovalov V.N. Vliyanie osusheniya na intensivnost' dykhaniya korney *Picea abies* (*Pinacea abies* Karst. (Pinaceae)) v el'nike osokovo-sfagnovom severnoy podzony taygi [The Influence of Drainage on the Respiration Rate of the Roots of *Picea abies* (*Pinacea abies* Karst. (Pinaceae)) in the Sedge-Sphagnum Spruce Forest of the Northern Taiga Subzone]. *Botanicheskiy zhurnal*, 1979, vol. 64, pp. 252–254.
6. Zarubina L.V., Konovalov V.N. Vliyanie rubok na fotosintez i ottok ^{14}C -assimilyatov u podrosta eli v bereznyakakh chernichnykh [Effect of Cutting on the Photosynthesis and the ^{14}C -Assimilates Outflow in Spruce Undergrowth in the Bilberry Birch Forests]. *Vestnik Pomorskogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 49–54.
7. Zakharin A.A. Metod registratsii bystroy kinetiki rosta korney i nadzemnykh organov prorstkov [The Method of Recording of Fast Kinetics of Roots Growth and Overground Seedlings]. *Fiziologiya rasteniy*, 1993, vol. 40, no. 6, pp. 940–946.
8. Kolosov I.I. *Poglotitel'naya deyatelnost' kornevykh sistem rasteniy* [The Absorbing Activity of the Root Systems of Plants]. Moscow, 1962. 182 p.
9. Konovalov V.N., Zarubina L.V. Biologicheskie osobennosti podrosta eli v bereznyakakh chernichnykh posle vyborochnykh rubok [Biological Features of Spruce Undergrowth in the Bilberry Birch Forests after Selective Cuttings]. *Vestnik KrasGAU*, 2011, no. 8, pp. 99–104.
10. Konovalov V.N., Zarubina L.V. Vliyanie dozy azota pri podkormkakh na ottok ^{14}C -assimilyatov u sosny v sosnyakh lishaynikovyykh [Impact of Nitrogen Dose on the ^{14}C -Assimilates Outflow in Pine Trees at the Lichen Pine Forests]. *Lesnoy zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 7–13.
11. Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ekologo-fiziologicheskie osobennosti khvoynyykh na udobrennykh pochvakh* [Ecological and Physiological Features of Coniferous at the Fertilized Soils]. Arkhangelsk, 2011. 338 p.
12. Konovalov V.N., Listov A.A. Vliyanie usloviy mineral'nogo pitaniya na dykhanie korney sosny obyknovnoy [The Influence of Mineral Nutrition Conditions on Root Respiration of Scots Pine]. *Lesnoy zhurnal*, 1989, no. 4, pp. 15–19.
13. Kulaeva O.N. K voprosu o vliyaniy kornevoy sistemy na obmen veshchestv [On the Effect of the Root System on the Metabolism]. *Rol' mineral'nykh elementov v obmene veshchestv i produktivnosti rasteniy* [The Role of Mineral Elements in Metabolism and Plant Productivity]. Moscow, 1964, pp. 224–229.

14. Kulaeva O.N. Gormonal'naya regulyatsiya fiziologicheskikh protsessov u rasteniy na urovne sinteza RNK i belka [Hormonal Regulation of Physiological Processes in Plants at the RNA Level and Protein Synthesis]. *41-e Timiryazevskoe chtenie* [The 41st Timiryazev Reading]. Moscow, 1982. 82 p.

15. Kursanov A.L. *Transport assimilyatov v rastenii* [Assimilate Transport in Plants]. Moscow, 1976. 647 p.

16. Mamaev V.V. Sutochnye izmeneniya intensivnosti vydeleniya CO₂ u kornevykh mochek sosny i berezy v prirodnykh usloviyakh [Daily Variations in Intensity of CO₂ Emissions from Root Fibrils of Pine and Birch Trees in Natural Conditions]. *Lesovedenie*, 1983, no. 3, pp. 33–38.

17. Menyaylo L.N. *Gormonal'naya regulyatsiya ksilogeneza khvoynykh* [Hormonal Regulation of Xylogenesis in Conifers]. Novosibirsk, 1987. 185p.

18. Obrucheva N.V. Fiziologicheskaya kharakteristika zon kornya [Physiological Characteristic of the Root Zones]. *Rol' mineral'nykh elementov v obmene veshchestv i produktivnosti rasteniy* [The Role of Mineral Elements in Metabolism and Plant Productivity]. Moscow, 1964, pp. 259–265.

19. Orlov A.Ya., Koshel'kov S.P., Petrov-Spiridonov A.A. Primenenie azotnykh udobreniy dlya uskoreniya rosta elovogo podrosta na vyrubkakh [The Use of Nitrogen Fertilizers to Accelerate the Growth of Spruce Young Growth in the Cuttings]. *Lesovedenie*, 1987, no. 5, pp. 20–28.

20. Orlov A.Ya., Koshel'kov S.P. *Pochvennaya ekologiya sosny* [Soil Ecology of Pine Trees]. Moscow, 1971. 323 p.

21. Peshkova A.A. Assimilyatsiya azota v kornyakh i list'yakh prorostkov kukuruzy v temnote i na svetu [Assimilation of Nitrogen in the Roots and Leaves of Maize Seedlings in the Dark and the Light]. *Fiziologiya rasteniy*, 1991, vol. 38, no. 1, pp. 86–93.

22. Rakhtenko I.N. *Rost i vzaimodeystvie kornevykh sistem drevesnykh rasteniy* [The Growth and Interaction of the Root Systems of Woody Plants]. Minsk, 1963. 254 p.

23. Repka I., Sarych M., Marek Y. Vliyanie nedostatka makroelementov na strukturu khloroplastov i produktivnost' fotosinteza u rasteniy kukuruzy [Effect of Lack of Macronutrients on the Chloroplast Structure and Productivity of Photosynthesis in Maize Plants]. *Fiziologiya rasteniy*, 1971, vol. 18, no. 6, pp. 1107–1112.

24. Rubin A.B., Germanova V.F. O sinteze pigmentov v kornyakh [On the Pigment Synthesis in the Roots]. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1959, vol. 124, no. 4, pp. 940–943.

25. Sabinin D.A. *Fiziologicheskie osnovy pitaniya rasteniy* [Physiological Bases of Plant Nutrition]. Moscow, 1955. 474 p.

26. Smirnov V.V. *Sezonnyy rost glavneyshikh drevesnykh porod* [Seasonal Growth of the Main Tree Species]. Moscow, 1964. 167 p.

27. Chernobrovkina N.P. *Ekofiziologicheskaya kharakteristika ispol'zovaniya azota sosnoy obyknovnoy* [Ecophysiological Characteristic of Nitrogen Use by Scots Pine]. St. Petersburg, 2001. 175 p.

28. Shcherbakov A.P. Kaliy kak regulyator fermentativnykh protsessov v rasteniyakh. Soobshchenie 1 [Potassium as a Regulator of Fermentative Processes in Plants. Report 1].

Tr. IFR AN SSSR [Proc. of the Institute of Plant Physiology of the Academy of Sciences of the USSR], 1946, vol. 1, iss. 2, pp. 116–128.

29. Shcherbakov A.P. Kaliy kak regulyator fermentativnykh protsessov v rasteniyakh. Soobshchenie 2 [Potassium as a Regulator of Fermentative Processes in Plants. Report 2]. *Tr. IFR AN SSSR* [Proc. of the Institute of Plant Physiology of the Academy of Sciences of the USSR], 1948, vol. 1, iss. 1, pp. 180–192.

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

31. Michniewicz M., Stopinska J. The Effect of Nitrogen Nutrition on Growth and on Plant Hormones Content in Scots Pine (*Pinus silvestris* L.) Seedlings Grown Under Light of Different Intensity. *Acta Soc. Bot. Pol.*, 1980, vol. 45, no. 3, pp. 221–234.

32. Michniewicz M., Stopinska J. The Effect of Potassium Nutrition on Growth and on Plant Hormones Content in Scots Pine (*Pinus silvestris* L.) Seedlings Grown Under Light of Different Intensity. *Acta Soc. Bot. Pol.*, 1980, vol. 49, no. 3, pp. 235–244.

Received on October 15, 2014



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 624.011

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.115

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ДЕРЕВЯННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

© *В.В. Стоянов, д-р техн. наук, проф.*

Ш. Жгалли, асп.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дитрихсона, 4,
г. Одесса, Украина, 65029; e-mail: mdipk@yandex.ru

В работе показана возможность повышения несущей способности изгибаемых деревянных конструкций за счет использования особенных приемов модификации древесины или новых методов послойного армирования. Известно, что древесина как природный полимер состоит из целлюлозы в виде системы трубчатых волокон. Целлюлозные цепочки в стенках трубчатых волокон частично группируются в виде кристаллических областей мицелл, где цепи параллельно ориентированы и прочно удерживаются межмолекулярными силами. Остальная часть так называемой аморфной целлюлозы состоит из неориентированных областей, где нет полной взаимонасыщаемости цепей и где довольно легко может происходить взаимодействие целлюлозы с другими веществами. Очевидно, что в части пластического характера работы древесины на сжатие, когда потеря устойчивости одного волокна вызывает догружение рядом расположенных волокон, далее этот процесс увеличивает сжатую зону по высоте сечения. Резюмируя физику этого процесса, необходимо отметить, что аморфная часть целлюлозы, обеспечивая пластический характер деформаций сжатия, является причиной уменьшения не только зоны деформаций сжатия, но и растяжения. Это приводит к перегрузке критических растянутых волокон и их разрыву. Такова схема развития нормальных напряжений сжатия и растяжения в деревянной балке при поперечном изгибе. В случае усиления только сжатой зоны древесины путем модификации аморфной части целлюлозы происходит заполнение объема между пучками фибрилл и вовлечение ее в механическую работу. Способов модификации древесины много, они отработаны и используются для повышения прочности и жесткости древесины. Известно, что модифицированная фенолоспиртами древесина сосны при сжатии набирает прочность, близкую к пределу прочности на растяжение немодифицированной древесины сосны. Это означает, что их условные пределы пропорциональности почти совпадают, существенно нарастают нормальные напряжения в балке с модифицированной сжатым слоем. Другим способом является послойное армирование. Однако существующий известный способ армирования древесины отдельными стержнями эффективен с технологической точки зрения, но весьма затратен с экономической. В процессе изготовления клеодощатых балок послойного армирования между слоями досок устанавливают металлические сетки или углепластиковые хол-

сты из высокомодульных материалов. Для того, чтобы повысить изгибную прочность и жесткость рассматриваемой балки, необходимо увеличить ее геометрические характеристики. В этой связи модуль упругости высокомодульных материалов (металла и углепластика) должен быть не менее чем в 21 раз больше модуля упругости древесины. Металлическая сетка весьма удобна для применения. Основное требование, предъявляемое к ней: толщина сетки должна находиться в пределах 1 мм, что обеспечивает вдавливание сетки в склеиваемые между собой доски при минимальном давлении.

Ключевые слова: деревянные конструкции, модификация древесины, поперечные трещины, высокомодульные материалы.

Метод модификации аморфной целлюлозы в сжатой зоне древесины

Традиционный расчет балок при поперечном изгибе обычно основан на гипотезе плоских сечений. Появление при этом виде напряженного состояния, наряду с нормальными, касательных напряжений вызывает некоторый перекокс сечений, которым обычно пренебрегают. Влияние касательных напряжений в деревянных балках весьма заметно только в коротких цельнодеревянных элементах, когда их длина не превышает шести высот сечения. В дальнейшем будем оперировать только нормальными напряжениями, полагая, что это ни в коей мере не указывает на мало-значимость касательных напряжений в напряженно-деформированном состоянии конструкций.

Распределение краевых нормальных напряжений изгиба (σ_n) соответствует линейному характеру их распределения по высоте, но только в пределах невысоких значений σ_n , когда $\sigma_c = \sigma_p$ (рис. 1).

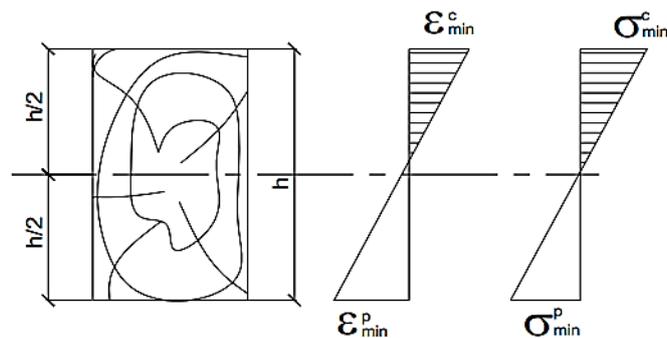
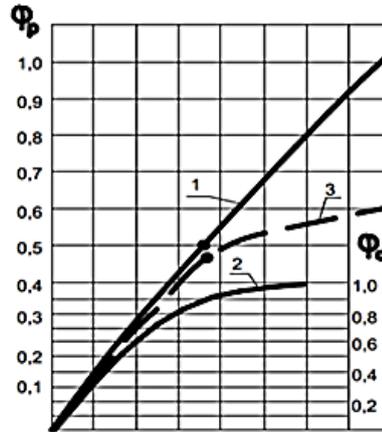


Рис. 1. Линейное распределение нормальных напряжений изгиба при низких значениях загрузки $\sigma_c = \sigma_p$ (ϵ_{min} – относительная деформация; σ_p и σ_c – нормальные напряжения волокон, растянутых в нижней и сжатых в верхней зонах)

Рис. 2. Приведенная диаграмма работы сосны: 1 – при растяжении, 2 – при сжатии, 3 – при сжатии для модифицированной древесины сосны (φ – относительные напряжения (в долях от предельной прочности))



Анализ диаграммы работы древесины на растяжение и сжатие (рис. 2), показал, что такой характер распределения нормальных напряжений может иметь место при относительной деформации $\epsilon_{\min} = 0,001$, когда нормальные напряжения $\sigma_c = \sigma_p \approx 10$ МПа. Для сжатия при деформации $\epsilon_c = 0,0015$ установлен условный предел пропорциональности ($\Phi_c = 0,5$), после которого наблюдается резкий изгиб прямой приведенной оси абсцисс до наступления критических деформаций $\epsilon_{пр}$. Для растянутых волокон в нижней зоне условный предел пропорциональности наступает при относительной деформации $\epsilon_p = 0,0035$.

Рассмотрим динамику распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте сечения (рис. 3).

При достижении условного предела пропорциональности при сжатии ($\epsilon_c = 0,0015$) эпюра нормальных напряжений сжатия S_c начинает приобретать криволинейный характер, для условного предела пропорциональности при растяжении ($\epsilon_p = 0,0035$) эпюра напряжений сжатия имеет четко обозначенный криволинейный характер при одновременном смещении нейтральной оси в растянутую зону (рис. 3).

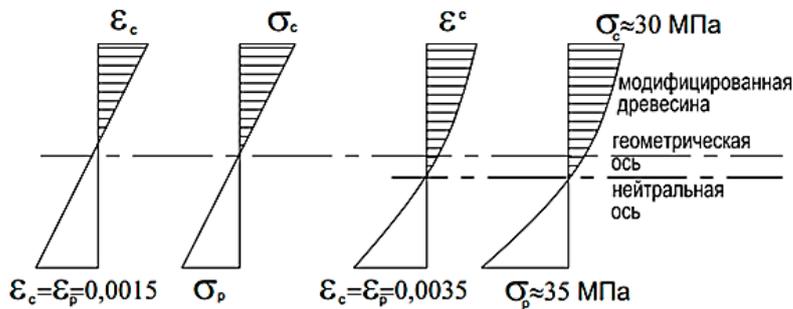


Рис. 3. Динамика распределения нормальных напряжений в момент условного предела пропорциональности при сжатии и растяжении

Констатируя динамику развития нормальных напряжений по высоте сечения в изгибаемом элементе, отмечаем, что именно нарастание объема напряжений сжатия и смещения нейтральной оси приводит к перегрузке волокон растянутой зоны.

В связи с этим рассмотрим физику этого процесса.

Известно, что древесина как природный полимер состоит из целлюлозы в виде системы трубчатых волокон. Целлюлозные цепочки в стенках трубчатых волокон частично (около 40 %) группируются в виде кристаллических областей – мицелл, где цепи ориентированы параллельно и прочно удерживаются межмолекулярными силами. Остальная часть (около 60%) так называемой аморфной целлюлозы состоит из неориентированных областей, где нет полной взаимонасыщаемости цепей и где довольно легко может происходить взаимодействие целлюлозы с другими веществами [7]. Очевидно, что в пластическом характере работы древесины на сжатие определяющую роль играет аморфная часть целлюлозных волокон, когда потеря устойчивости одного волокна вызывает догружение рядом расположенных волокон. Далее этот процесс увеличивает сжатую зону по высоте сечения. Резюмируя отметим, что аморфная часть целлюлозы, обеспечивая пластический характер деформаций сжатия, вместе с тем является причиной уменьшения зоны деформаций растяжения. Это приводит к перегрузке критических растянутых волокон и их разрыву.

Такова схема развития нормальных напряжений сжатия и растяжения в деревянной балке при поперечном изгибе.

Обратимся к поставленной в работе задаче повышения несущей способности балки с учетом специфики работы на изгиб и анизотропии древесины. Отметим несколько направлений: армирование древесины отдельными стержнями [2] или послойное армирование высокомодульными сетками [3, 4]. Надо признать, что оба способа очень эффективны, но и весьма затратны.

Другим, пока нереализованным способом, может стать усиление сжатой зоны древесины путем модификации аморфной части целлюлозы [1, 6]. При этом модификатор – полимер, попав в стенку клетки, способствует вовлечению в механическую работу аморфной части целлюлозы, заполняя объем между пучками фибрилл (в аморфной части целлюлозы) и мицелл [7]. Это приводит к утолщению клетки и повышению ее прочности и жесткости.

Способов модификации древесины много, они отработаны и используются для повышения прочности и жесткости древесины [3]. Например, в работе [5] приводятся сведения о пределе прочности при сжатии модифицированной фенолоспиртами древесины сосны, который составил 92 МПа. Это значение весьма близко к пределу прочности на растяжение немодифицированной древесины сосны, т. е. их условные пределы пропорциональности почти совпадают (см. рис. 2) и существенно изменяется динамика нарастания нормальных напряжений в балке с модифицированным сжатым слоем.

Действительно, до относительной деформации $\varepsilon = 0,0035$ эпюра краевых напряжений сжатия и растяжения сохраняет линейный характер (рис. 3) и лишь далее (при продолжении загрузки) картина нарастания деформаций напряжения будет соответствовать ранее описанному принципу.

Модификация сжатой зоны клеодошчатых балок может осуществляться при регламентируемой норме модификации отдельных досок. Здесь имеется в виду переход от глубокой модификации крайних элементов и постепенного перехода к немодифицированной части средних слоев.

Предлагаемый способ усиления базируется на хорошо известных способах и приемах конструирования и изготовления деревянных конструкций и может быть использован при производстве клееных сжато-изогнутых деревянных элементов на современных заводах клееных конструкций. Экономическая эффективность будет определяться оптимальным выбором способа модификации, а также рациональным выбором клееного пакета балочного элемента.

Достоинством клеодошчатых балок со слоем определенной толщины из модифицированной древесины является повышенная способность волокон сопротивляться потере устойчивости при сжатии.

Метод послойного армирования

В процессе изготовления клеодошчатых балок послойного армирования [5] между слоями досок устанавливают металлические сетки или углепластиковые холсты из высокомодульных материалов толщиной не более 1 мм (рис. 4).

Для повышения изгибной прочности и жесткости рассматриваемой балки необходимо увеличить приведенные геометрические характеристики (площадь, моменты сопротивления и инерции). В этой связи модуль упругости высокомодульных материалов (металла или углепластика) должен быть не менее чем в 21 раз больше модуля упругости древесины.

Учитывая, что металлическая сетка весьма удобна для применения, отметим требование, предъявляемое к ней: толщина металлической сетки должна находиться в пределах 1 мм, что обеспечивает вдавливание сетки в склеиваемые между собой доски при минимальном давлении – 0,7 МПа.

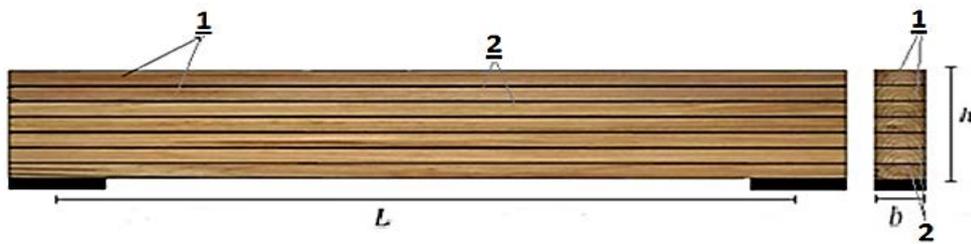


Рис. 4. Клеодошчатые балки с послойным армированием: 1 – слой досок, 2 – сетка или холст из высокомодульных материалов

На заводах, производящих клеодощатые конструкции, используются меламино-мочевинные клеи с отвердителем, агрессивно воздействующим на черный металл, что требует его анодирования для исключения коррозии.

Достоинства клеодощатых балок с послойным армированием, наряду с повышенной прочностью и жесткостью, позволяют обеспечить заводское изготовление конструкций и одновременно способствуют изгибу поперечных трещин вблизи границы армирования за счет наличия высокомодульных сеток, направляемых вдоль досок.

Выводы

1. Особенность строения древесины (наличие аморфной части целлюлозы) позволяет при модифицировании сжатой зоны балки добиваться улучшения ее деформативности.

2. Применение послойного армирования в клеодощатых конструкциях с использованием меламино-мочевинных клеев, широко используемых в условиях производства, способствует повышению несущей способности конструкций и исключает возможность развития поперечных трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные пространственные конструкции. Оболочки в виде гиперболического параболоида. М.: Высш. шк., 1991. 540 с.
2. *Стоянов В.В.* Клеефанерная оболочка типа гиперболического параболоида // Общие вопросы строительства. Отечественный опыт. М.: ЦНИИСК, 1974. Вып. 10.
3. *Стоянов В.В.* Сборные клефанерные гиперболические оболочки. К.: Штице, 1981. 78 с.
4. *Стоянов В.В.* Конструирование сборных гиперболических покрытий. Одесса: ОГАСА, 2000. 164 с.
5. *Стоянов В.В.* Термовлажностные воздействия в пространственных покрытиях. Одесса: ВРС, 2004. 87 с.
6. *Стоянов В.В.* Особенность деревянных изгибаемых элементов // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Одесса: ОГАСА, 2006. 183 с.
7. *Стоянов В.В.* и др. Деревянная балка: пат. на изобретение UA №87286. Оpubл. 10. 07. 2007. Бюл. №13.

Поступила 22.05.15

UDK 624.011

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.115

Load Bearing Capacity of Wooden Bending Elements

V.V. Stoyanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

Sh. Zhgalli, Postgraduate Student

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, Odessa, 65029, Ukraine; e-mail: mdipk@yandex.ru

The paper presents the increasing possibility of load bearing capacity of bending wood structures through some special methods of wood modification or stratified reinforcement. Wood as a natural polymer is composed of cellulose in the form of hollow fibers. The cellu-

lose chains in the walls of hollow fibers are grouped in the form of crystalline particles of micelles, where the chains are oriented parallel and held firmly by intermolecular forces. The rest of the so-called amorphous cellulose is composed of the unoriented regions. There is no complete chain intersaturability, and the interaction of cellulose with other materials can easily occur. As for the plastic nature of timber behavior in compression the loss of stability of one fiber causes the additional loading of adjacent fibers, and this process increases the compressed zone cross-sectional height along. The amorphous part of cellulose provides the plastic nature of deformation of compression, and causes the decrease the deformation zone of compression and the tensile deformation. This leads to the overloading of extended fibers and their rupture. This is the scheme of normal stresses of compression and tensile in a wooden beam under transverse bending. In case of reinforcement of only compressed timber zone by modifying the amorphous part of cellulose there occurs the volume filling between the bundles of fibrils and engaging it into the mechanical work. There are a lot of methods of wood modification. They are used to increase the wood strength and stiffness. Pine wood modified by phenolic alcohols in compression strengthens at close range to the tensile strength of unmodified pine wood. This means that their proportional limits are almost identical; the normal stresses in a beam with a modified compressed layer increase essentially. Another method is a stratified reinforcement. However, the known method of wood reinforcing by the separate rods is efficient from a technological point of view, but rather cost-based. In the process of manufacturing of glued board beams of stratified reinforcement the metal meshes or carbon fiber webs of high modulus materials are installed between the layers of boards. In order to increase the bending strength and rigidity of a beam, it is necessary to increase its geometrical characteristics. In this regard, the modulus of elasticity of high modulus materials (metal or CFRP) should be not less than 21 times greater than the modulus of wood elasticity. The metal mesh is very convenient to use. Its thickness should be in the range of 1 mm, which provides the indentation of the mesh into the adherend boards with minimal pressure.

Keywords: wood structure, wood modification, transverse crack, high modulus materials.

REFERENCES

1. *Sovremennye prostranstvennyye konstruksii. Obolochki v vide giperbolicheskogo paraboloida* [The Modern Space Structures. Hypar Shells]. Moscow, 1991. 540 p.
2. Stoyanov V.V. Kleefanernaya obolochka tipa giperbolicheskogo paraboloida [A Glued Plywood Shell of the Hyperbolic Paraboloid Type]. *Obshchie voprosy stroitel'stva. Otechestvennyy opyt* [General Construction Issues. Domestic Experience]. Moscow, 1974, iss. 10.
3. Stoyanov V.V. *Sbornye kleefanernye giperbolicheskie obolochki* [Precast Glued Plywood Hyperbolic Shells]. Kishinev, 1981. 78 p.
4. Stoyanov V.V. *Konstruirovaniye sbornykh giperbolicheskikh pokrytiy* [Construction of the Precast Hyperbolic Panels]. Odessa, 2000. 164 p.
5. Stoyanov V.V. *Termovlazhnostnyye vozdeystviya v prostranstvennykh pokrytiyakh* [Hydrothermal Effects in the Space Panels]. Odessa, 2004. 87 p.
6. Stoyanov V.V. Osobennost' derevyannykh izgibaemykh elementov [Features of the Wooden Bending Elements]. *Sovremennyye stroitel'nyye konstruksii iz metalla i drevesiny* [Modern Constructions of Metal and Wood]. Odessa, 2006. 183 p.
7. Stoyanov V.V., et al. *Derevyannaya balka* [A Wooden Beam]. Patent of Ukraine, no. UA 87286, 2007.

Received on May 22, 2015

УДК 674.047:66.047.354

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.122

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В СВЧ-ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА

© *В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.*

В.А. Шульгин, ст. преп.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.shulgin@agtu.ru

Сушка древесины является важнейшей составляющей технологического процесса ее переработки, во многом определяющей качество конечного продукта, поэтому совершенствованию технологии сушки пиломатериалов придается большое значение. Из существующих в настоящее время методов представляет интерес сушка пиломатериалов с применением электромагнитной энергии. В связи с этим появилась необходимость в разработке высокотехнологичных устройств для сушки древесины в сверхвысокочастотном поле, работающих в автоматическом режиме с учетом особенностей энергетических характеристик резонатора сушильной камеры. Это возможно выполнить с помощью систем технического контроля и управления процессом сушки с применением соответствующего программного обеспечения. Для создания таких систем необходимо разработать измерительное устройство, которое должно учитывать взаимозависимость энергетических параметров резонатора. В статье рассмотрен научно обоснованный подход к решению задачи автоматического контроля за процессом сушки древесины в микроволновой лесосушильной камере резонаторного типа. Представлена математическая модель определяющей части системы бесконтактного контроля – функционального измерителя влажности древесины, основанного на взаимосвязи энергетических параметров резонатора сушильной камеры. Объектом настоящего исследования является процесс сушки древесины сверхвысокочастотным электромагнитным полем в экспериментальной сушильной установке резонаторного типа. Цель исследования – создание системы измерительного контроля за процессом сушки древесины с применением средств термовлагодетрирования пиломатериалов, основанной на определении энергетических параметров резонатора сушильной камеры. Для решения поставленной задачи предложен способ сушки древесины в микроволновой лесосушильной камере.

Ключевые слова: СВЧ-сушка древесины, резонатор, добротность резонансной камеры, тангенс угла диэлектрических потерь, энергия электромагнитного поля, удельные диэлектрические потери, первичный измерительный преобразователь, подводенная мощность.

В отличие от сушки пиломатериала в конвективных установках процесс в СВЧ-сушильных камерах резонаторного типа сопровождается резонансными электрофизическими явлениями, которые могут быть рассмотрены на основе базовых положений электродинамики [1, 2, 4, 5, 7, 8, 10–12].

Для повышения качества сушки древесины в микроволновой сушильной камере необходимо в обязательном порядке осуществлять измерительный контроль градиентов влажности и температуры древесины.

В настоящее время для решения комплекса задач влагометрии в радиоволновом диапазоне излучения токов высоких (ТВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот известны следующие электродинамические методы:

свободного пространства с использованием проходящей и отраженной волн (в этих модификациях измеряемой характеристикой могут служить затухание (модуль коэффициента передачи или коэффициент отражения), изменение амплитуды или фазы волны);

резонансные;
волноводные;
зондовые.

Возможность применения радиоволновых методов для определения влажности материалов основывается на физических явлениях поглощения и рассеяния радиоволн материалом. Однако в настоящее время не существует микроволновых методов и устройств, способных одновременно решать комплекс существующих задач влагометрии, т. е. их сочетание при соблюдении адеструктивности.

Традиционные способы контроля влажности древесины в процессе сушки материала в СВЧ-сушильной камере резонаторного типа (весовой и кондуктометрический) не позволяют осуществлять непрерывный измерительный контроль влажности древесины в электромагнитном поле резонатора из-за особенностей его воздействия на разные материалы (диэлектрики, ферромагнетики, парамагнетики). По П.С. Серговскому, А.И. Расеву [6, с. 191], «для контроля текущей влажности пиломатериалов в СВЧ-сушильных камерах в процессе сушки эти способы в их чистом виде не применимы».

Для определения и контроля влажности пиломатериала может быть использован один из резонансных методов – метод стоячей волны, который позволяет на основе функциональной зависимости измерять интегральную влажность древесины в зоне взаимодействия электромагнитного поля с материалом.

На измерительную характеристику влажности древесины существенное влияние оказывают виды и формы связи влаги с веществом. Основываясь на классификации видов и форм связи влаги [3], можно отметить, что существенной является определяемая величина энергии связи E для коллоидных капиллярно-пористых тел, к которым относится древесина. Большинство литературных источников и нормативных документов, применяемых на практике (стандарты, технологические инструкции и т.п.), рассматривают процесс СВЧ-сушки древесины с учетом удаления только свободной влаги (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 80,0$), в то время как химически связанная влага имеет значительно меньшую ($\epsilon_{\text{хсв}} = 4,5...5,8$) [9].

Объектами настоящего исследования являются процесс сушки древесины электромагнитным полем СВЧ в экспериментальной сушильной установке

резонаторного типа и создание системы измерительного контроля процесса сушки древесины с применением средств термовлагометрии пиломатериалов, основанной на определении энергетических параметров резонатора сушильной камеры.

Исследование отдельных вопросов проблемы сушки пиломатериалов в камерах СВЧ проводили В.П. Галкин [1], Ф.Х. Гареев [2] и др. Анализ состояния вопроса во влагометрии и сушке древесины, выполненный на основании патентной базы по рассматриваемой тематике и ознакомлении с научными публикациями [2, 5], позволяет сделать вывод о необходимости проведения специальных исследований по повышению точности измерения и контроля влажности древесины в поле СВЧ.

В ходе исследований выполнено теоретическое обоснование и проведена экспериментальная проверка применяемого метода стоячей волны в резонансной камере для сушки древесины в поле СВЧ, доказана возможность безконтактного измерения и контроля влажности древесины в камерах СВЧ при одновременном контроле параметров агента сушки и материала, базирующемся на основе функционально связанных энергетических характеристик резонатора лесосушильной камеры и упрощении аппаратной реализации.

В рассматриваемом случае контроль влажности древесины осуществляется постоянно в течение процесса сушки. Высушиваемые пиломатериалы, уложенные в сушильный штабель, помещают в замкнутую металлическую полость – резонатор лесосушильной камеры. Возбуждается СВЧ электромагнитное поле. Размеры резонатора лесосушильной камеры выбирают много больше длины волны (λ) питающего генератора СВЧ, чтобы обеспечить возможность возбуждения в ненагруженном состоянии в резонаторе множества колебаний разной пространственной структуры при постоянной мощности питающего генератора и фиксированном времени взаимодействия исследуемого влажного материала с полем многих мод (мода – наибольшее значение функции распределения случайной величины). Измеряют температуру подвергающегося воздействию электромагнитной энергии материала до помещения в замкнутую металлическую полость и после воздействия электромагнитного поля многих мод, по разности температур определяют калориметрическим способом поглощаемую мощность $P_{\text{полг}}$.

Основываясь на энергетических параметрах резонатора, добротности ненагруженного резонатора (холостого хода) Q и затухания d (величина обратная добротности $d = 1/Q$), находим затухание резонатора, исходя из следующего энергетического соотношения:

$$Q = \omega_p \frac{W_k}{P_{\text{п}\Sigma}}, \quad (1)$$

где ω_p – резонансная угловая частота;

W_k – энергия, запасенная в колебательной системе;

$P_{\text{п}\Sigma}$ – мощность потерь холостого хода в резонаторе.

Нагрузкой является влага, содержащаяся в древесине. Если резонатор нагружен, то к средней мощности потерь в резонаторе $P_{\text{пс}} = P_{\text{г}}$ ($P_{\text{г}}$ – подводенная мощность генератора) следует прибавить среднюю мощность, отдаваемую резонатором в нагрузку (расходуемую на нагрев древесины в сушильной камере) $P_{\text{н}} = P_{\text{погл}}$. Запишем выражения для добротности и затухания нагруженного резонатора:

$$Q_{\text{н}} = Q \frac{1}{1 + P_{\text{н}}/P_{\text{г}}}; \quad (2)$$

$$d_{\text{н}} = \frac{1}{Q} = d(1 + P_{\text{н}}/P_{\text{г}}). \quad (3)$$

По приведенному соотношению (3) для затухания $d_{\text{н}}$ находим интегральное значение средней влажности материала в сушильной камере, вычисленное по формуле для поглощенной мощности $P_{\text{погл}}$ калориметрическим способом. Поскольку влажность древесины пропорциональна потерям передаточной функции, т. е. вносимому в резонатор затуханию A при отсутствии согласования в тракте передачи, имеем

$$A = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{г}}}. \quad (4)$$

Текущая влажность древесины W устанавливается по функции затухания $d_{\text{н}}$ калибровкой измерителя:

$$W = [(M - M_0)/M_0]100\%, \quad (5)$$

где M – масса влажной древесины;

M_0 – масса абс. сухой древесины.

Особенностью сушки древесины резонансным методом стоячей волны является рассогласование нагрузки с генератором вследствие уменьшения мощности удельных потерь нагрузки в технологическом процессе сушки и, как следствие, увеличение добротности резонатора сушильной камеры. Необходимо с заданной дискретностью времени уменьшать мощность питающего генератора в соответствии с соотношением для затухания $d_{\text{н}}$.

Для осуществления контроля процесса сушки древесины необходимо выполнять алгоритм процесса сушки для функции затухания первичного измерительного преобразователя (ПИП), вычисляя мощность генератора СВЧ (или генераторов) $P_{\text{г}}$ на каждом дискретном шаге с соответствующей регулировкой мощности.

Рассмотрим примеры реализации предлагаемого способа контроля для различной подводенной мощности.

Пример 1. При фиксированной выходной мощности питающего генератора СВЧ ($P_{\text{вых}} = 15$ кВт) задается время взаимодействия t высушиваемой древесины с полем многих мод в резонансной камере. Измеряя температуру исследуемого материала перед помещением в замкнутый объем (T_1 , °С), а затем температуру материала после взаимодействия (T_2 , °С) находим их разность $\Delta T = T_2 - T_1$, используя калориметрический способ измерения поглощенной мощности:

$$P_{\text{погл}} \frac{cv\Delta T}{0,24t} \approx 4,18 \cdot 10^3 \frac{v}{t} \Delta T, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость;
 v – объем жидкости.

Для энергетического параметра резонатора затухания d_n получена зависимость затухания (3), в которую подставляем значение практической добротности резонатора сушильной камеры на холостом ходу: $Q_{xx} \approx 100$; $P_{пз} \approx P_r$. Поэтому для мощности магнетрона (генератора) $P_r = 15$ кВт получаем:

$$d_n = \frac{1}{Q} = W = 0,01(1 + P_n/15)100 \%. \quad (7)$$

Здесь $P_r = P_{\text{погл}}$ – переменная, P_r – параметр, который в процессе высушивания материала уменьшается в соответствии с изменением влажности.

Градуировочная характеристика ПИП для измерителя влажности после калибровки затухания резонатора сушильной камеры по формуле (5) приведена на рис. 1.

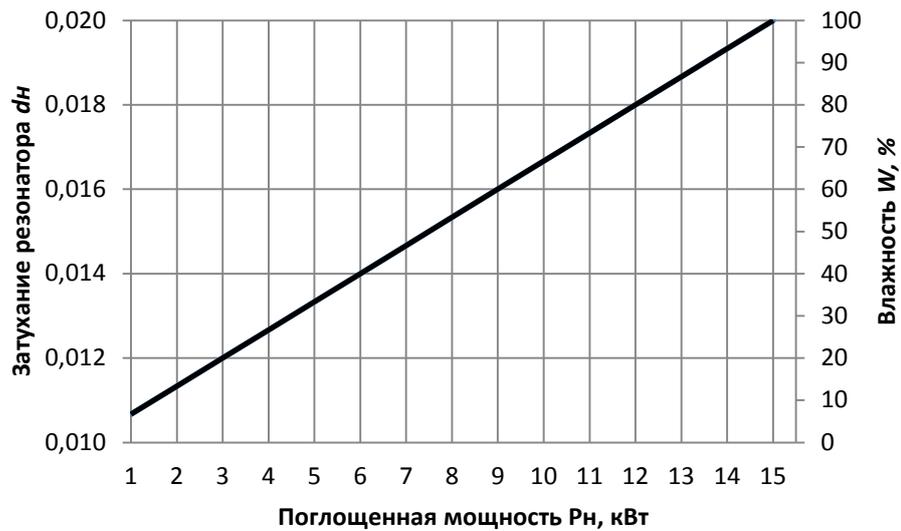


Рис. 1. Градуировочная характеристика ПИП измерителя влажности ($P_r = 15$ кВт)

Например, при шаге измерения влажности 10 % получаем характеристику (рис. 2) при регулировке мощности в процессе контроля технологического процесса сушки.

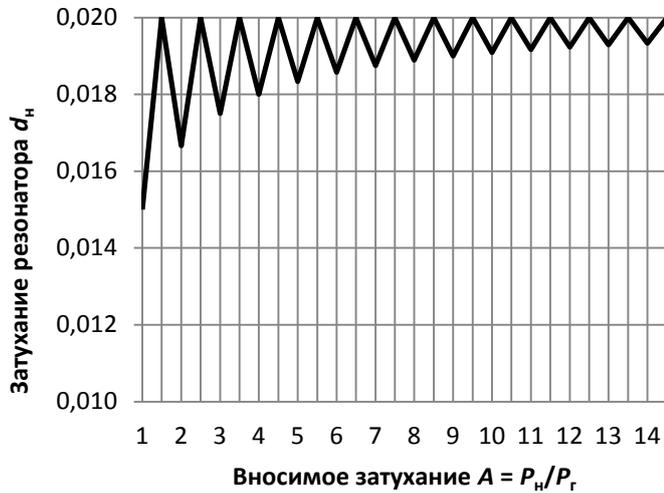


Рис. 2. Характеристика регулировки затухания резонатора в процессе сушки древесины ($P_r = 15$ кВт)

Пример 2. При выходной мощности питающего генератора $P_{\text{вых}} = 1$ кВт при начальной влажности древесины 100 %, применяя calorиметрический способ измерения поглощенной мощности, для энергетического параметра резонатора (затухания d_n) получаем график зависимости затухания, откалиброванный в единицах влажности (рис. 3). Процесс протекает идентично приведенному в примере 1:

$$d_n = \frac{1}{Q} = d(1 + P_{\text{погл}}/1).$$



Рис. 3. Градуировочная характеристика ПИП измерителя влажности ($P_r = 1$ кВт)

Тогда в процессе сушки при шаге измерения влажности 10 % параметр, которым является выходная мощность генератора, принимает следующие значения: 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 кВт. Характеристика контроля процесса сушки древесины для выходной мощности сушильной установки $P_{г}$, откалиброванная на 100 % влажности материала при максимальной поглощаемой мощности, приведена на рис. 4.

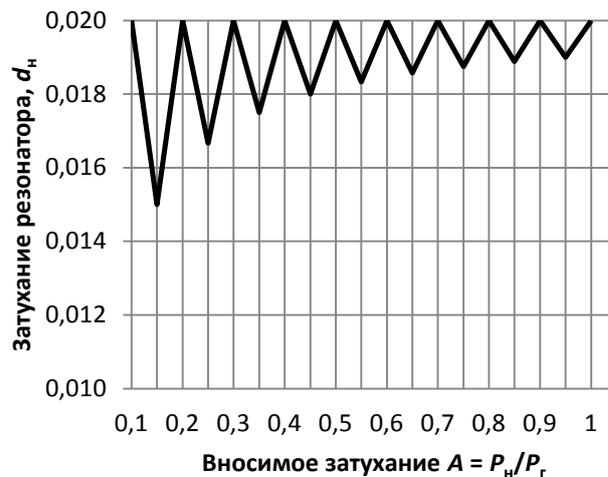


Рис. 4. Характеристика регулировки затухания резонатора в процессе сушки древесины ($P_r = 1$ кВт)

Таким образом, измерительный контроль процесса сушки пиломатериала в микроволновой лесосушильной камере резонансным методом стоячей волны позволяет обеспечить: непрерывное определение градиентов влажности и температуры; регулирование подводимой мощности; повышение точности определения влажности древесины; упрощение аппаратной реализации. Выполненное согласование мощности генератора и поглощенной в нагрузку мощности (в сушильном штабеле) дает возможность поддерживать оптимальный режим процесса сушки и получать высокое качество высушиваемой древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин В.П. Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 238 с.
2. Гареев Ф.Х. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // Журн. ЛПИ. 2004. № 1. С. 50–52.
3. Казанский М.Ф. Анализ форм связи и состояние влаги, поглощенной дисперсным телом, с помощью кинетических кривых сушки // ДАН СССР. 1960. № 5. С. 89–92.

4. Мелехов В.И., Шульгин В.А. Резонансные явления в процессе СВЧ-сушки древесины // Лесн. журн. 2015. № 5. С. 135–145. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Недорезова Е.В. Совершенствование технологии и оборудования для сушки древесины электромагнитной энергией СВЧ: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002. 154 с.
6. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
7. Торговников Г.И., Кодеба С.Д. Сушка древесной стружки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле // Лесн. журн. 1984. № 2. С. 75–78. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Торговников Г.И., Котов Ю.В., Мануйлов Н.А., Савин В.Б. Диэлектрические свойства древесины на сверхвысоких частотах // Лесн. журн. 1977. № 1. С. 89–95. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Чудинов Б.С. Вода в древесине: моногр. Новосибирск: Наука, 1984. 263 с.
10. Шульгин В.А. Измерительные аспекты инновационной технологии сушки древесины // Грамота. 2011. №4. С. 95–96. (Альманах современной науки и образования).
11. Шульгин В.А. Особенности сушки древесины // Грамота. 2013. № 3. С. 215–218. (Альманах современной науки и образования).
12. Шульгин В.А. Особенности сушки древесины (возникновение электрического пробоя) // Грамота. 2013. №3. С. 219–222. (Альманах современной науки и образования).

Поступила 07.02.14

UDC 674.047:66.047.354

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.122

Control of Lumber Drying Process in the Microwave Cavity-Type Wood-Drying Kiln

V.I. Melekhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

V.A. Shul'gin, Senior Lecturer

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

Wood drying is the most important component of the technological wood processing, largely determines the quality of the final product. Development of lumber drying technology is of great importance. Drying lumber with the use of electromagnetic energy is of great interest among the currently existing methods of drying of wood. In this regard, there is a need to develop high-tech devices for drying of wood in the microwave field, working in automatic mode taking into account the energy characteristics of the cavity of a kiln. It can be done with the help of technical control systems and drying process management with the use of appropriate computer software. To create such systems it is necessary to develop a measuring unit, which can take into account the interdependence of the cavity energy parameters. The article describes the scientifically grounded method of solving the problem of automatic control of the process of wood drying in a microwave cavity-type wood-drying kiln. A mathematical model of a defined component part of the noncontact inspection system – the functional wood moisture meter based on the interconnection of energy parameters of the cavity of a wood-drying kiln is represented. The results of the research of wood drying

process in MW electromagnetic field in a cavity-type wood-drying kiln are demonstrated. The measuring control system of drying process with the use of water content measurements resources of wood is considered.

Keywords: microwave drying of wood, cavity, Q-factor of the resonance chamber, dielectric loss tangent, electromagnetic energy, specific dielectric losses, primary transducer, power delivered.

REFERENCES

1. Galkin V.P. *Drevesinovedcheskie aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny* [Wood Technology Aspects of Innovative Wood Drying]. Moscow, 2010. 238 p.
2. Gareev F.Kh. Problemy i perspektivy SVCh-sushki drevesiny [Problems and Prospects of Microwave Drying of Wood]. *Zhurnal LesPromInform*, 2004, no. 1, pp. 50–52.
3. Kazanskiy M.F. Analiz form svyazi i sostoyanie vlagi, pogloshchennoy dispersnym telom, s pomoshch'yu kineticheskikh krivykh sushki [Analysis of the Forms of Communication and State of Moisture Absorbed by the Dispersed Body with Kinetic Curves of Drying]. *Doklad Akademii nauk SSSR* [Report of the Academy of Sciences of the USSR], 1960, no. 5, pp. 89–92.
4. Melekhov V.I., Shul'gin V.A. Rezonansnye yavleniya v protsesse SVCh-sushki drevesiny [Resonance Phenomena in the Microwave Drying of Wood]. *Lesnoy zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 89–95.
5. Nedorezova E.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya dlya sushki drevesiny elektromagnitnoy energiy SVCh: dis... kand. tehn. nauk* [Improving the Technology and Equipment for Wood Drying by Microwave Electromagnetic Energy: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Voronezh, 2002. 154 p.
6. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood]. Moscow, 1987. 360 p.
7. Torgovnikov G.I., Kodeba S.D. Sushka drevesnoy struzhki v sverkhvysokochastotnom elektromagnitnom pole [Drying of Wood Chips in the Microwave Electromagnetic Field]. *Lesnoy zhurnal*, 1984, no. 2, pp. 75–78.
8. Torgovnikov G.I., Kotov Yu.V., Manuylov N.A., Savin V.B. Dielektricheskie svoystva drevesiny na sverkhvysokikh chastotakh [Dielectric Properties of Wood at Microwave Frequencies]. *Lesnoy zhurnal*, 1977, no. 1, pp. 89–95.
9. Chudinov B.S. *Voda v drevesine* [Water in Wood]. Novosibirsk, 1984. 263 p.
10. Shul'gin V.A. Izmeritel'nye aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny [Measuring Aspects of Innovative Wood Drying]. *Gramota*, 2011, no. 4, pp. 95–96.
11. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny [Features of Wood Drying]. *Gramota*, 2013, no. 3, pp. 215–218.
12. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny (vozniknovenie elektricheskogo proboya) [Features of Wood Drying (Occurrence of Electrical Breakdown)]. *Gramota*, 2013, no. 3, pp. 219–222.

Received on February 07, 2014

УДК 674.053:621.933

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.131

НОВЫЕ ЛЕСОПИЛЬНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛЕСОПИЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

© *Г.Ф. Прокофьев, д-р техн. наук*

Н.Ю. Микловцик, канд. техн. наук, доц.

А.М. Тюрин, канд. техн. наук, преп.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: g.prokofjev@narfu.ru, n.miklovtsik@narfu.ru, alexejtyrin@rambler.ru

Наибольшего экономического и социального эффекта в лесопилении можно достигнуть при глубокой переработке сырья, используя интенсивный путь развития производства, при котором максимальный выпуск продукции высокого потребительского качества получается при минимальном расходе сырья, энергии, материалов и человеческих ресурсов. В гибких автоматизированных лесопильных линиях, соответствующих третьему уровню интенсификации лесопильного производства (применение высоких технологий), в качестве лесопильного оборудования могут быть использованы лесопильные, ленточнопильные и круглопильные станки, включающие пильные модули с возможностью их позиционирования на некотором расстоянии друг от друга в зависимости от плана раскроя сырья. Для обеспечения высокой эффективности работы линий пильные модули должны обладать высокой надежностью, обеспечивать требуемую точность пиления и малый расход древесины в опилки, иметь малые габариты и металлоемкость. Это может быть достигнуто при создании лесопильных модулей с аэростатическими направляющими для пил. На кафедре технического инжиниринга института энергетики и транспорта Северного (Арктического) федерального университета под руководством проф. Г.Ф. Прокофьева инициативно ведутся работы по созданию новых лесопильных модулей, предложена, научно обоснована и технически проработана конструкция лесопильного станка с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим направляющим. Станок относится к ресурсосберегающему лесопильному оборудованию. Оригинальность технических решений подтверждается авторскими свидетельствами. Создан не имеющий зарубежных аналогов экспериментальный лесопильный станок с полосовыми нерастянутыми пилами, совершающими возвратно-поступательное движение в аэростатических направляющих. Станок, в отличие от лесопильной рамы, не имеет пильной рамки, захватов для натяжения пил и межпильных прокладок. Испытание станка в условиях, близких к производственным, дало положительные результаты. Ведутся работы по созданию круглопильного станка с кольцевой пилой. Описание одного из вариантов такого станка также рассмотрено в работе. Распиливаемый материал проходит через центральную часть пилы, поэтому ее диаметр меньше, чем у станков традиционной конструкции с пильным валом. Уменьшается температурный перепад по радиусу диска пилы, что приводит к повышению устойчивости пилы и точности пиления. Опорный диск, на который насажена кольцевая пила, выполняет функцию направляющего ножа.

Ключевые слова: новые технологии, гибкие автоматизированные лесопильные линии, лесопильные модули, ленточнопильный станок с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим опорам, лесопильный станок с нерастянутыми полосовыми пилами, круглопильный станок с кольцевой пилой.

Перед российским лесопилением стоит задача перехода на интенсивный путь развития, при котором во все возрастающих объемах производится продукция высокого потребительского качества при минимальных расходах сырья, энергии, материалов и человеческих ресурсов.

Интенсификация производства может быть реализована за счет создания техники нового поколения и на ее базе – новых высоких технологий. Создание гибких автоматизированных лесопильных линий (ГАЛЛ) соответствует третьему уровню интенсификации лесопильного производства [5, 6].

Особенность ГАЛЛ заключается в том, что планы и режимы раскроя пиловочного сырья изменяются автоматически в зависимости от его размерно-качественных характеристик.

Новая технология (основанная на применении ГАЛЛ) по сравнению с существующей имеет следующие достоинства:

1. Рост производительности труда при производстве пиломатериалов за счет значительного сокращения операций на складах сырья и пиломатериалов и автоматического выбора оптимальных режимов пиления древесины на лесопильных модулях.
2. Увеличение выхода пиломатериалов за счет выбора рациональных планов раскроя сырья с учетом размерно-качественных характеристик каждого поступающего на распиловку бревна.
3. Повышение качества пиления древесины за счет автоматического контроля качества получаемых пиломатериалов и автоматической корректировки режимов пиления.
4. Удешевление изготовления и эксплуатации оборудования за счет использования унифицированных лесопильных модулей.
5. Сокращение численности работающих путем автоматизации основных производственных операций.

Одной из главных задач, стоящих при разработке отечественных ГАЛЛ, является создание лесопильных модулей, обладающих малыми габаритными размерами и металлоемкостью, высокой надежностью и точностью пиления.

В данной статье дается краткая характеристика новых лесопильных модулей для ГАЛЛ, создаваемых в САФУ имени М.В. Ломоносова на основании большого объема исследований, изобретательской деятельности и конструкторских работ.

Проф. Г.Ф. Прокофьевым предложена, научно обоснована и технически проработана конструкция ленточнопильного станка с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим направляющим (рис. 1), общий вид его приведен на рис. 2. Станок не имеет зарубежных аналогов. Технические решения, использованные при его создании, защищены шестью авторскими свидетельствами.

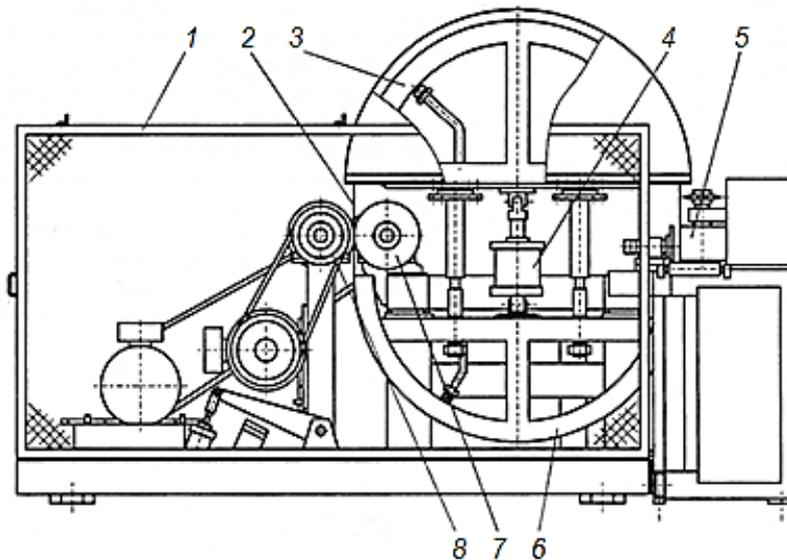


Рис. 1. Конструкция ленточнопильного станка с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим направляющим: 1 – ограждение; 2 – пила; 3, 6 – верхняя и нижняя криволинейные аэростатические направляющие; 4 – механизм натяжения пилы; 5 – механизм подачи; 7, 8 – приводные фрикционные колеса

Ленточнопильный станок с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим направляющим, относится к ресурсосберегающему лесопильному оборудованию, так как при его использовании возрастает выход пиломатериалов на 2...3 %, снижаются энергозатраты на 10...15 %, уменьшаются габаритные размеры и металлоемкость на 30...50 %, повышается долговечность пил более чем в 20 раз и открывается возможность использовать ленточные пилы с зубьями, оснащенными твердым сплавом.

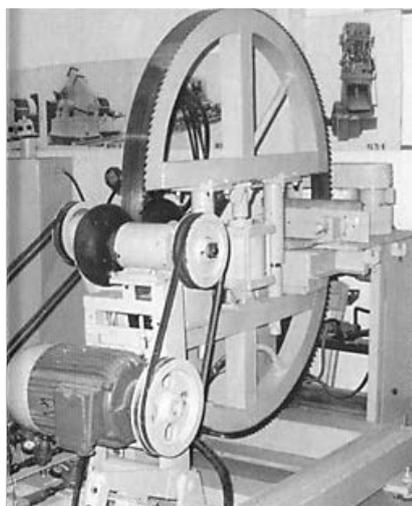


Рис. 2. Общий вид ленточнопильного станка с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим направляющим

Станок такой конструкции можно использовать в качестве однопильного делительного и лесопильного модуля в многопильных ленточнопильных станках первого ряда в ГАЛЛ.

Дальнейшее совершенствование ленточнопильного станка может идти за счет применения в его конструкции линейного электродвигателя [2, 4]. В этом случае еще в большей степени уменьшаются габариты станка и повышается надежность его работы.

При активном участии аспиранта А.М. Тюрина создан новый лесопильный станок с полосовыми нерастянутыми пилами, совершающими возвратно-поступательное движение в аэростатических направляющих, который в отличие от лесопильной рамы не имеет пильной рамки, захватов для натяжения пил и межпильных прокладок. За рубежом ему нет аналогов. Использованные в станке технические решения защищены тремя авторскими свидетельствами и тремя патентами на изобретения. Станок предназначен для распиловки брусьев высотой до 200 мм и может быть использован в качестве многопильного станка второго ряда в ГАЛЛ. Общий вид узла резания спереди приведен на рис. 3.

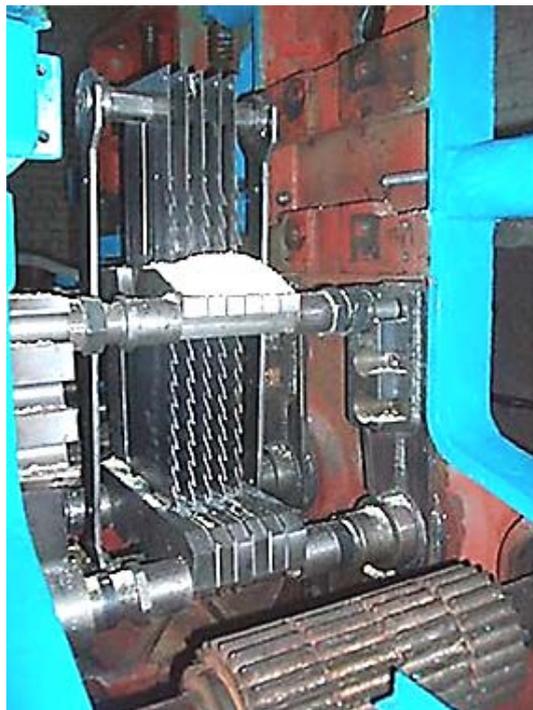


Рис. 3. Общий вид узла резания лесопильного станка с полосовыми нерастянутыми пилами, совершающими движение в аэростатических направляющих

В условиях, близких к производственным, было исследовано качество пиломатериалов, выпиленных на экспериментальном лесопильном станке [7]. При распиловке брусьев были получены доски с высокой точностью – поле рассеяния толщин досок было почти в 3 раза меньше поля допуска. Такая высокая точность пиломатериалов объясняется следующим: точность движения ползунов нижней поперечины в направляющих не влияет на точность движения пил, так как пилы выполнены «плавающими» и точность их движения определяется точностью установки аэростатических направляющих; направляющие ножи обеспечивают высокую точность распиливаемого материала.

Высокое качество по шероховатости получаемых пиломатериалов (глубина неровностей не превышала 0,4 мм) объясняется отсутствием кинематических неровностей в виде рисок, благодаря высокой точности движения пил, распиливаемого материала и подготовки пил.

На основании авторских свидетельств [1] и [3] в настоящее время ведутся работы по созданию круглопильного станка с кольцевой пилой. Один из вариантов узла резания круглопильного станка с кольцевой пилой показан на рис. 4.

На станине закреплен опорный диск толщиной более толщины кольцевой пилы, но меньше ширины пропила. С помощью электромагнитов кольцевая пила прижимается к приводным колесам. Распиливаемый материал проходит через центральную часть пилы, поэтому требуется меньший диаметр пилы, чем у станков традиционной конструкции с пильным валом. Следовательно, уменьшается толщина пилы и расход древесины в опилки, снижается температурный перепад по радиусу диска пилы и повышается ее устойчивость и точность пиления. Опорный диск, выполняя функцию направляющего ножа, позволяет повысить точность подачи распиливаемого материала.

Станки с кольцевыми пилами могут быть использованы в ГАЛЛ в качестве многопильных станков первого ряда.

Выводы

1. Для интенсификации лесопильного производства необходимо проводить работы по созданию отечественных ГАЛЛ и доведению их до промышленного производства.

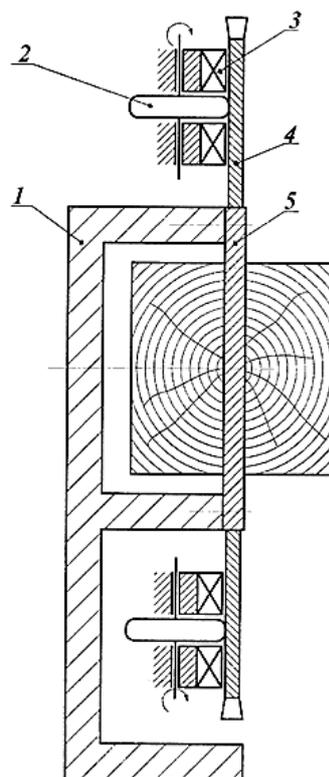


Рис. 4. Конструкция узла резания с кольцевой пилой: 1 – станина; 2 – приводной ролик; 3 – магнит; 4 – кольцевая пила; 5 – опорный диск

2. Создаваемые в САФУ лесопильные модули для ГАЛЛ, обладающие малыми габаритными размерами и металлоемкостью, высокой надежностью и точностью пиления, могут быть использованы при автоматизации технологических процессов в новых лесопильных линиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 485865, МКИ В 5/14. Круглопильный станок / Прокофьев Г.Ф., Грачев А.В., Стахийев Ю.М., Фефилов Л.А., Настенко А.А. № 1987978/30-15; заявл. 16.01.74; опубл. 30.09.75, Бюл. № 36. 4 с.
2. А.с. 818862 СССР, МКИ В 27 В 15/00. Ленточнопильный станок / Г.Ф. Прокофьев. № 2610721/29-15; заявл. 04.05.78; опубл. 07.04.81, Бюл. № 13. 4 с.
3. А.с. 874335 СССР, МКИ В 27 В 5/14. Узел резания круглопильного станка / Ю.В. Васкан, Г.Ф. Прокофьев. № 2934660/29-15; заявл. 29.05.80; опубл. 23.10.81, Бюл. № 39. 4 с.
4. Пат. 2487013 Российская Федерация, МПК В 27 В 15/00. Ленточнопильный станок / Г.Ф. Прокофьев, Н.В. Коряковская. № 2012106003/13; заявл. 20.02.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. №19. 4 с.
5. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 1991. 439 с.
6. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И. Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках: моногр. / Под ред. Г.Ф. Прокофьева. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2009. 380 с.
7. Тюрин А.М. Определение основных эксплуатационных показателей лесопильного станка с полосовыми нерастянутыми пилами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2013. 20 с.

Поступила 09.04.15

UDC 674.053:621.933

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.131

New Sawmill Modules for the Flexible Automated Sawmill Lines

G.F. Prokof'ev, Doctor of Engineering Sciences

N.Yu. Miklovtsik, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

A.M. Tyurin, Candidate of Engineering Sciences, Lekturer

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya

Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail:

g.prokofiev@narfu.ru; n.miklovtsik@narfu.ru; alexejtyrin@rambler.ru

The greatest economic and social impact in the sawmilling can be achieved by deep processing of raw materials, using the intensive development of production, at which the maximum output of high consumer quality is achieved with the minimal consumption of raw materials, energy and human resources. The flexible automated sawing lines (FASL), corresponding to the third level of the sawmill intensification (application of high technologies), can use as the sawmill equipment the sawmills, band and circular saws, including the

sawing modules with the possibility of their positioning at a distance from each other, depending on the plan for cutting materials. To ensure the high efficiency of the FASL the saw modules should possess high reliability, provide the required precision of cutting and low loss in kerf, have small sizes and metal consumption. This can be achieved by creating the sawmill modules with the saw aerostatic guides. At the Department of Technical Engineering of the Institute of Energy and Transport of the Northern (Arctic) Federal University under the guidance of professor G. Prokofiev the new sawmill modules for FASL are created. A design of a band saw with a saw moving along the curvilinear aerostatic bearing is offered, scientifically grounded and technically well-developed. The machine refers to the resource-saving sawmill equipment. The certificates of authorship support the originality of technical solutions. A development sawing machine with the bandpass unstretched saws, reciprocating in the aerostatic guides, is created. This machine does not have any foreign analogs. As distinct from a saw frame it does not have any swing frame, tensioning grapples and saw blade gauges. Testing of the machine under near-production conditions has yielded the positive results. Work is in progress to create a circular saw machine with a cylinder saw. The paper also describes one embodiment of such machine. The sawing material passes through the central portion of a saw, so its diameter is smaller than that of the arbour traditional design machines. The temperature difference along the radius of the saw blade is reduced, that increases the saw stability and sawing accuracy. A cylinder saw is put on a platter with the function of a steering disk.

Keywords: new technologies, flexible automated sawing line, sawmills module, band saw with a saw moving along the curvilinear aerostatic bearing, timber saw with the unstretched bandpass saws, circular saw machine with a cylinder saw.

REFERENCES

1. Prokof'ev G.F., Grachev A.V., Stakhiev Yu.M., Fefilov L.A., Nastenko A.A. *Kruglopil'nyy stanok* [A Circular Saw]. Certificate of Authorship, no. 485865, 1975.
2. Prokof'ev G.F. *Lentochnopil'nyy stanok* [A Band Saw]. Certificate of Authorship, no. 818862, 1981.
3. Vaskan Yu.V., Prokof'ev G.F. *Uzel rezaniya kruglopil'nogo stanka* [The Cutting Unit of a Circular Saw]. Certificate of Authorship, no. 874335, 1981.
4. Prokof'ev G.F., Koryakovskaya N.V. *Lentochno-pil'nyy stanok* [A Band Saw]. Patent RF, no. 2487013, 2013.
5. Prokof'ev G.F. *Intensifikatsiya pileniya drevesiny ramnymi i lentochnymi pilami: dis. ... d-ra tehn. nauk* [Intensification of Wood Sawing by Web and Band Saws: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Arkhangelsk, 1991. 439 p.
6. Prokof'ev G.F., Ivankin I.I. *Povyshenie effektivnosti pileniya drevesiny na lesopil'nykh ramakh i lentochnopil'nykh stankakh: monogr.* [Improving the Efficiency of Wood Sawing in Saw Frames and Band Saws: Monograph]. Arkhangelsk, 2009. 380 p.
7. Tyurin A.M. *Opredelenie osnovnykh ekspluatatsionnykh pokazateley lesopil'nogo stanka s polosovymi nerastyanutymi pilami: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk* [Identification of the Basic Operational Indicators of a Sawing Machine with the Bandpass Unstretched Saws: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Arkhangelsk, 2013. 20 p.

Received on April 09, 2015

УДК 674.093

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.138

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ БРУСЬЕВ
И ДОСОК ПРИ РАСКРОЕ ПИЛОВОЧНИКА
БРУСОВО-СЕГМЕНТНЫМ СПОСОБОМ
С УЧЕТОМ ШИРИНЫ ПРОПИЛА**

© *А.И. Агапов, д-р техн. наук, проф.*

Вятский государственный университет, ул. Московская, 36, г. Киров, Россия, 610000;
e-mail: agapov_ai.34@mail.ru

Рассматривается задача оптимизации раскроя пиловочника брусом-сегментным способом с выпиливанием двухкантного бруса и двух сегментов, из которых затем выпиливаются трехкантные полубрусья и трехкантные боковые доски. При раскрое сегмента толщина трехкантного полубруса равна толщине двухкантного бруса. Из трехкантного полубруса выпиливаются обрезные доски и трехкантные заготовки с необработанной пластью. Эти заготовки распиливаются на две равные части, сушатся, затем у них необработанные пласти фрезеруются наклонно и по сбегу. Далее полученные заготовки трапециевидного сечения склеиваются между собой по этим наклонным поверхностям с разворотом одной из них по пласти и по длине на 180° . В качестве критерия оптимальности выбран объем получаемой пилопродукции. Целевая функция представлена в виде двух сумм площадей поперечных сечений пиломатериалов, получаемых из двухкантного бруса и двух сегментов с учетом ширины пропила. Уравнения связи устанавливают взаимосвязь между диаметром пиловочника в вершинном торце с размерами брусьев и досок, получаемых при раскрое двухкантного бруса и двух сегментов. Для удобства решения данной задачи целевая функция представлена в относительных единицах, диаметр пиловочника в вершинном торце принят за единицу. Для отыскания максимального значения целевой функции, находим первую производную по толщине двухкантного бруса и приравняем ее к нулю. Отыскание максимума целевой функции осуществлено путем приближенного вычисления. Для проверки адекватности решения задачи оптимизации путем дифференцирования целевой функции составлен алгоритм решения задачи в относительных единицах. На основании полученного алгоритма решения задачи оптимизации такого способа раскроя пиловочника (с учетом ширины пропила и использованием численного метода) определены оптимальные размеры брусьев и досок, а также значения целевой функции. Результаты показали, что оптимальная относительная толщина двухкантного бруса, полученная путем расчета алгоритма решения задачи, совпадает с оптимальной относительной толщиной двухкантного бруса, полученной аналитически, путем дифференцирования целевой функции. Установлено, что с увеличением ширины пропила толщина двухкантного бруса возрастает, а размеры боковых досок, получаемых из сегмента, уменьшаются.

Ключевые слова: раскрой пиловочника, двухкантный брус, сегмент, трехкантный полубрус, трехкантные заготовки, оптимизация, целевая функция, уравнения связи, критерий оптимальности, алгоритм решения задачи.

Постановка задачи

При раскросе пиловочника малых и средних размеров (диаметр 14...40 см) обычно используются развальный и брусово-развальный способы распиловки. Рекомендуется также осуществлять раскрой пиловочника брусово-сегментным способом [4, 6] с дальнейшей распиловкой сегментов на радиальные доски. Такой способ раскроса пиловочника пока мало используется в промышленности. Одной из причин подобного положения является недостаточная изученность особенностей этого способа раскроса пиловочника и, прежде всего, отсутствие технологического обеспечения. Рассмотрим вариант брусово-сегментного способа раскроса пиловочника средних размеров (20...40 см) с выпиливанием при первом проходе одного двухкантного бруса и двух сегментов (рис. 1).

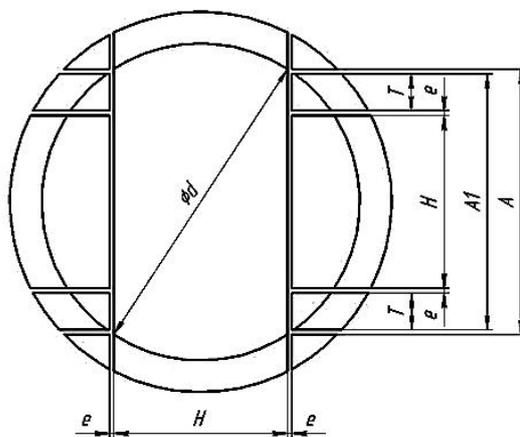


Рис. 1. Схема брусово-сегментного способа раскроса пиловочника с выпиливанием одного бруса и двух сегментов

Далее двухкантный брус распиливается на обрезные доски и боковые трехкантные заготовки, которые затем раскраиваются на две равные части и сушатся. У полученных трехкантных заготовок необработанная пласть фрезеруется наклонно и по сбегу, а затем они склеиваются вместе в блоки по наклонной пласти с разворотом одной из заготовок по пласти и по длине на 180° [5].

Сегменты распиливаются на трехкантный полубрус, трехкантные доски и рейки. Из трехкантного полубруса выпиливаются обрезные доски и трехкантные заготовки с необработанной пластью. Эти заготовки распиливаются на две равные части, сушатся, а затем у них необработанные пласти фрезеруются наклонно и по сбегу. Далее полученные заготовки трапециевидного сечения склеиваются между собой по этим наклонным поверхностям с разворотом одной из них по пласти и по длине на 180° .

Трехкантные полуобрезные доски сушатся и необрезные кромки у них фрезеруются наклонно к пласти и по сбегу, затем склеиваются между собой в доски

по наклонным кромкам с поворотом одной из них по пласти и по длине на 180° . При таком варианте раскря пиловочника увеличивается выход пилопродукции, так как используется периферийная и сбеговая зоны бревна. Кроме того, обрезные доски получаются как из двухкантного бруса, так и из трехкантных полубрусьев, выпиленных из сегмента.

Составление математической модели

При раскря пиловочника по такой схеме прежде всего необходимо знать оптимальные размеры выпиленных брусьев и досок. Задачу оптимизации данной схемы раскря пиловочника решаем следующим образом. В качестве критерия оптимальности выбираем объем пилопродукции [1]. Целевую функцию представляем в виде двух сумм площадей поперечных сечений пиломатериалов, получаемых из двухкантного бруса и двух сегментов [2]:

$$Z = Z_{бр} + Z_c, \quad (1)$$

где $Z_{бр}$ – площадь поперечного сечения пиломатериалов, получаемых при раскря двухкантного бруса;

Z_c – площадь поперечных сечений пиломатериалов, получаемых при раскря двух сегментов.

Постановка данной задачи оптимизации основывается на предположении, что с увеличением толщины двухкантного бруса площадь поперечного сечения этого бруса возрастает, площадь поперечных сечений пиломатериалов, получаемых при раскря сегментов, уменьшается. Очевидно имеется такое сочетание этих площадей поперечных сечений, при которых целевая функция (сумма этих площадей поперечных сечений) принимает максимальное значение. Это и будет искомым вариантом решения задачи оптимизации.

Площадь поперечного сечения двухкантного бруса можно определить по формуле

$$Z_{бр} = 0,5H(d + A), \quad (2)$$

где H – толщина выпиленного двухкантного бруса;

d – диаметр бревна в вершинном торце;

A – ширина пласти двухкантного бруса.

Площадь поперечного сечения пиломатериалов, получаемых при раскря сегментов, представляем как сумму поперечных сечений двух центральных трехкантных полубрусьев и боковых трехкантных досок:

$$Z_c = Z_{сб} + Z_{сд}, \quad (3)$$

где $Z_{сб}$ – площадь поперечных сечений центральных трехкантных полубрусьев, получаемых при раскря сегментов,

$$Z_{сб} = 0,5H(d + A) - H(H + 2e); \quad (4)$$

e – ширина пропила;

$Z_{сд}$ – площадь поперечных сечений трехкантных досок, получаемых при раскря сегментов,

$$Z_{сд} = 2T^2; \quad (5)$$

T – толщина боковой трехкантной доски.

Тогда площадь поперечного сечения пиломатериалов, получаемых при раскрое сегментов, можно определить по следующей формуле

$$Z_c = 0,5H(d + A) - H(H + 2e) + 2T^2. \quad (6)$$

Целевая функция

$$Z = H(d + A) - H(H + 2e) + 2T^2. \quad (7)$$

Уравнения связи можно составить, используя теорему Пифагора. Взаимосвязь между диаметром пиловочника в вершинном торце с размерами брусьев и досок можно представить следующими равенствами.

Ширина пласти двухкантного бруса

$$A = \sqrt{d^2 - H^2}. \quad (8)$$

Толщина боковой трехкантной доски, получаемой при раскрое сегмента,

$$T = 0,5(A_1 - (H + 2e)), \quad (9)$$

где A_1 – ширина основания сегмента,

$$A_1 = \sqrt{d^2 - (H + 2e)^2}. \quad (10)$$

С учетом формулы (10) сумма площадей поперечных сечений боковых трехкантных досок, выпиливаемых из сегментов, определяем по формуле

$$Z_{сд} = 2T^2 = 0,5(A_1^2 - (H + 2e) + (H + 2e)^2), \quad (11)$$

где $A_1^2 = d^2 - (H + 2e)^2$.

С учетом этого равенства формула (11) примет следующий вид:

$$Z_{сд} = 0,5d^2 - A_1(H + 2e). \quad (12)$$

Тогда площади поперечных сечений пиломатериалов, получаемых при раскрое сегментов,

$$Z_c = 0,5d^2 + 0,5H(d + A) - H(H + 2e) - A_1(H + 2e). \quad (13)$$

С учетом равенства (12) представим целевую функцию в виде

$$Z = 0,5d^2 + dH + HA - (A_1 + H)(H + 2e). \quad (14)$$

Полагаем, что математическая модель задачи оптимизации составлена.

Решение математической модели

Для удобства решения данной задачи целевую функцию представляем в относительных единицах, полагая $m_H = H/d$. Тогда целевая функция (14) будет иметь следующий вид:

$$Z = 0,5 + m_H + m_H m_A - (m_{A_1} + m_H)(m_H + 2m_e). \quad (15)$$

В формулу (15) подставляем равенства (8) и (10):

$$Z = 0,5 + m_H + m_H \sqrt{1 - m_H^2} - (m_H + 2m_e) \sqrt{1 - (m_H + 2m_e)^2} - m_H(m_H + 2m_e). \quad (16)$$

Для отыскания максимального значения целевой функции находим первую производную по m_H и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dZ}{dm_H} = 1 + \frac{1 - 2m_H^2}{\sqrt{1 - m_H^2}} - \frac{1 - 2(m_H + 2m_e)^2}{\sqrt{1 - (m_H + 2m_e)^2}} - 2(m_H + m_e) = 0, \quad (17)$$

где m_e – ширина пропила.

Решая уравнение (17) при $m_e = 0$, получаем $m_H = 0,5$. Таким образом, определена оптимальная толщина выпиливаемого бруса $m_H = 0,5$, при которой целевая функция принимает экстремальное значение для варианта, когда ширина пропила равна нулю.

Для других результатов исследования относительных ширин пропила оптимальные относительные толщины бруса представлены в табл. 1, данные в которой получены путем приближенного решения уравнения (17).

Таблица 1

Оптимальные относительные толщины бруса для различной ширины пропилов

m_e	0	0,01	0,02	0,03	0,04
m_H	0,500	0,510	0,524	0,543	0,572

Результаты табл. 1 показывают, что с увеличением относительной ширины пропила относительная толщина бруса возрастает, а следовательно, размеры сегментов и досок должны уменьшаться.

Проверка адекватности решения задачи

Для проверки правильности решения данной задачи выполняем расчеты целевой функции, а также производим определение размеров брусьев и сегментов, принимая относительную толщину двухкантного бруса в определенном диапазоне вблизи оптимальной толщины его в соответствии с табл. 1.

Размеры брусьев и боковых досок, а также площади их поперечных сечений предлагается определять в относительных единицах. Тогда алгоритм решения задачи будет представлять следующую последовательность формул, которая написана на основании ранее полученных равенств.

Относительная ширина пласти двухкантного бруса на основании равенства (8):

$$m_A = \sqrt{1 - m_H^2}. \quad (18)$$

Относительная ширина основания сегмента на основании равенства (10):

$$m_{A_1} = \sqrt{1 - (m_H + 2m_e)^2}. \quad (19)$$

Относительная толщина боковой трехкантной доски по равенству (9):

$$m_T = 0,5(m_{A_1} - (m_H + 2m_e)). \quad (20)$$

Относительная площадь поперечного сечения двухкантного бруса на основании (2):

$$Z_{бр} = 0,5m_H(1 + m_A). \quad (21)$$

Относительная площадь поперечных сечений боковых трехкантных досок, получаемых при раскрое сегментов, по (12):

$$Z_{сд} = 0,5 - m_{A_1}(m_H + 2m_e). \quad (22)$$

Относительная площадь поперечных сечений трехкантных полубрусьев, получаемых при раскрое сегментов:

$$Z_{сб} = 0,5m_H(1 + m_A) - m_H(m_H + 2m_e). \quad (23)$$

Относительная площадь поперечных пиломатериалов, получаемых при раскросе сегментов, по (13):

$$Z_c = 0,5 + 0,5m_H(1 + m_A) - m_H(m_H + 2m_e) - m_{A_1}(m_H + 2m_e). \quad (24)$$

Суммарную относительную площадь поперечных сечений пиломатериалов, получаемых при раскросе двухкантного бруса и двух сегментов, определим по формуле (1).

Расчеты произведены для различных значений относительной ширины пропила в следующей последовательности [3]. Зададим относительную ширину пропила m_e и изменим относительную толщину двухкантного бруса m_H в определенных пределах. Затем определим по алгоритму остальные относительные размеры брусьев и сегментов, а также площади их поперечных сечений. По результатам расчетов отыщем максимальные значения целевой функции. Этот результат и будет являться искомым решением данной задачи оптимизации. Результаты расчетов представлены в табл. 2, где жирным шрифтом выделен оптимальный вариант расчета, при котором целевая функция Z принимает максимальное (оптимальное) значение.

Таблица 2

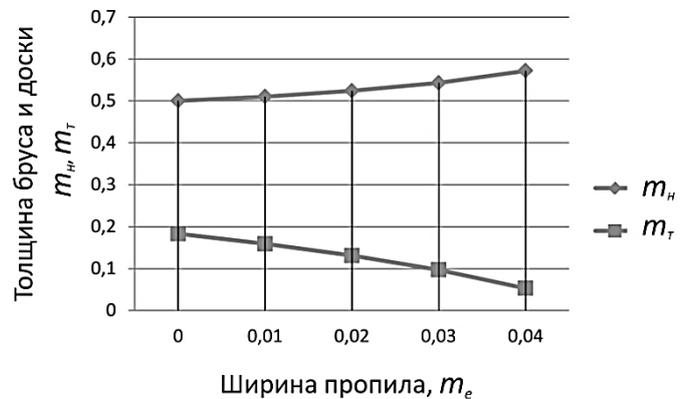
Относительные размеры брусьев и боковых досок, а также площади их поперечных сечений для различной относительной ширины пропила

m_e	m_H	m_A	m_{A_1}	$Z_{бр}$	m_T	$Z_{сб}$	$Z_{сд}$	Z_c	Z
0	0,480	0,877	0,8773	0,4505	0,1986	0,2201	0,0789	0,2991	0,74960000
	0,490	0,872	0,8717	0,4586	0,1909	0,2185	0,0729	0,2913	0,74990000
	0,500	0,866	0,8660	0,4665	0,1830	0,2165	0,0670	0,2835	0,75000000
	0,510	0,860	0,8602	0,4743	0,1751	0,2142	0,0613	0,2756	0,74990000
0,01	0,520	0,854	0,8542	0,4821	0,1671	0,2117	0,0558	0,2675	0,74960000
	0,490	0,872	0,8602	0,4586	0,1751	0,2087	0,0613	0,2700	0,72855505
	0,500	0,866	0,8542	0,4665	0,1671	0,2065	0,0558	0,2623	0,72884625
	0,510	0,860	0,8480	0,4743	0,1590	0,2040	0,0506	0,2546	0,72895019
	0,520	0,854	0,8417	0,4821	0,1508	0,2013	0,0455	0,2468	0,72886735
	0,530	0,848	0,8352	0,4897	0,1426	0,1982	0,0407	0,2389	0,72859819
	0,521	0,854	0,8278	0,4829	0,1334	0,1906	0,0356	0,2262	0,70901736
	0,522	0,853	0,8271	0,4836	0,1326	0,1903	0,0351	0,2254	0,70902242
	0,523	0,852	0,8265	0,4844	0,1317	0,1899	0,0347	0,2246	0,70902576
	0,524	0,852	0,8258	0,4852	0,1309	0,1896	0,0343	0,2239	0,70902739
	0,525	0,851	0,8251	0,4859	0,1300	0,1893	0,0338	0,2231	0,70902731
	0,526	0,850	0,8244	0,4867	0,1292	0,1890	0,0334	0,2223	0,70902552
0,527	0,850	0,8237	0,4874	0,1284	0,1886	0,033	0,2216	0,70902202	
0,03	0,541	0,841	0,7992	0,4980	0,0991	0,1729	0,0197	0,1925	0,69050356
	0,542	0,840	0,7985	0,4987	0,0982	0,1725	0,0193	0,1918	0,69050649
	0,543	0,840	0,7977	0,4995	0,0974	0,1721	0,0190	0,1910	0,69050792
	0,544	0,839	0,7970	0,5002	0,0965	0,1717	0,0186	0,1903	0,69050783
0,04	0,545	0,838	0,7962	0,501	0,0956	0,1712	0,0183	0,1895	0,69050623
	0,570	0,822	0,7599	0,5192	0,0550	0,1487	0,0060	0,1547	0,67388024
	0,571	0,821	0,7591	0,5199	0,0540	0,1482	0,0058	0,1540	0,67388188
	0,572	0,820	0,7582	0,5206	0,0531	0,1476	0,0056	0,1533	0,67388230
	0,573	0,820	0,7574	0,5213	0,0522	0,1471	0,0054	0,1526	0,67388151
0,574	0,819	0,7565	0,5220	0,0512	0,1466	0,0053	0,1519	0,67387951	

Анализ результатов

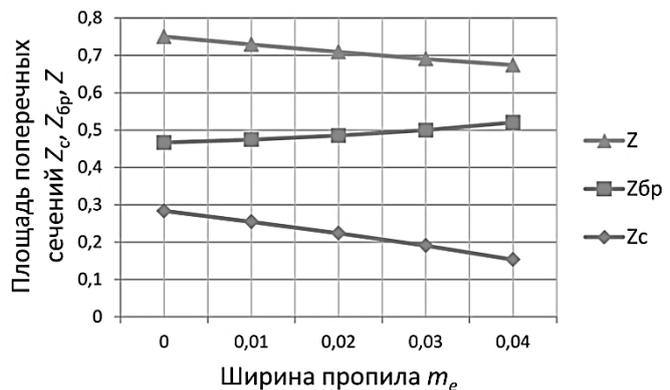
Сравнивая результаты табл. 1 и 2, следует отметить, что оптимальная относительная толщина двухкантного бруса, полученная путем расчета алгоритма решения задачи, совпадает с оптимальной относительной толщиной двухкантного бруса, полученной аналитически – путем дифференцирования целевой функции. С увеличением относительной ширины пропила оптимальная относительная толщина двухкантного бруса возрастает, а размеры сегмента уменьшаются. При этом с увеличением относительной ширины пропила оптимальная относительная толщина боковых досок, получаемых из сегментов, уменьшается ускоренно (рис. 2).

Рис. 2. Влияние относительной ширины пропила на оптимальные относительные толщины двухкантного бруса и боковых досок, получаемых из сегментов



С увеличением относительной ширины пропила величина целевой функции уменьшается (рис. 3), причем объем двухкантного бруса возрастает, а объем сегментов при этом уменьшается.

Рис. 3. Влияние относительной ширины пропила на оптимальные площади поперечных сечений пиломатериалов, получаемой из двухкантного бруса и сегментов



Результаты расчетов, представленных в табл. 2, подтверждают правильность ранее сделанного предположения о том, что с увеличением относительной толщины бруса m_n , площадь поперечного сечения пиломатериалов, получаемых из брусьев, возрастает, а площадь поперечного сечения пиломатериалов, получаемых

при раскросе сегментов, уменьшается. Самое главное – сумма этих площадей поперечных сечений (величина целевой функции) пиломатериалов принимает максимальное значение только при определенном значении m_H . Расчеты показали, что величина целевой функции принимает максимальное значение, совпадающее с экстремальным значением, полученным аналитическим методом дифференцирования целевой функции.

Анализ результатов табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что целевая функция при изменении толщины двухкантного бруса вблизи экстремума изменяется плавно и незначительно. Следовательно, при расчете и составлении поставок размеры брусьев и досок можно выбирать с небольшим отклонением от оптимального варианта целевой функции. В этом случае будет наблюдаться незначительное уменьшение выхода пиломатериалов от максимального (оптимального) значения, но при этом можно выпиливать спецификационные (стандартные) пиломатериалы.

Таким образом, впервые рассмотрена и решена задача оптимизации раскроса пиловочника брусом-сегментным способом с учетом ширины пропила при первом проходе, для которой найдены оптимальные толщины бруса в зависимости от относительной ширины пропила и предложен алгоритм для расчета остальных оптимальных размеров брусьев и досок. Данный алгоритм решения задачи предлагается использовать при расчете и составлении поставок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агапов А.И.* Оптимизация технологических процессов деревообработки: учеб. пособие. Киров: ВятГУ, 2012. 81 с.
2. *Агапов А.И.* Раскрой пиловочника средних размеров с выпиливанием одного бруса и двух сегментов // Сб. материалов Всероссийской ежегодной науч.-практ. конф. «Общество, наука, инновации» (НПК-2013), 15–26 апр., 2013 г. Киров: Вятский гос. ун-т, 2013. (Электронный ресурс).
3. *Агапов А.И.* Оптимизация раскроса пиловочника больших размеров с выпиливанием трех брусьев и двух пар боковых досок // Лесн. журн. 2015. №1. С. 108–116. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Аксенов П.П.* Технология пиломатериалов. М., 1963. 579 с.
5. Пат. 2530997 РФ, МПК В 27 В 1/00. Способ изготовления обрезных пиломатериалов из пиловочника / Агапов А.И. № 2013123320; заявл. 21.05.2013.
6. *Уласовец В.Г.* Технологические основы производства пиломатериалов: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. 510 с.

Поступила 20.01.2015

UDC 674.093

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.138

Setting of Optimal Sizes of the Square-Sawn Beams and Boards at Sawlog Cutting by Beam-Segment Method Considering the Cut Width

A.I. Agapov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

Vyatka State University, Moskovskaya str., 36, Kirov, 610000, Russian Federation;

e-mail: agapov_ai.34@mail.ru

The paper considers the problem of sawlog sawing optimization with beam-segment method by sawing a two-edged cant and two segments, which into three-edged half-bars and three-edged sideboards are cut. When cutting the segment the thickness of the three-edged half-bar is equal to the thickness of the two-edged cant. The edging boards and three-edged pieces with a rough surface are cut from the three-edged half-bar. These pieces are cut into two equal parts, dried, and then their rough faces are milled obliquely along a rise. The resulting parts of trapezoidal cross section are glued together on these inclined surfaces with a turn of one of them on the plate and a length of 180 degrees. The optimality criterion is a volume of sawn timber. The objective function is represented as two sums of squares of the cross sections of lumber derived from a two-edged cant and two segments according to the cutting width. The equations of connection establish the relationship between the top diameter of logs with dimensions of bars and boards, obtained by cutting a two-edged cant and two segments. The objective function is represented in relative units, taking the top diameter of sawlogs as the unit. To get the maximum value of the objective function, we find the first derivative of the thickness of a two-edged cant and equate it to zero. Finding the maximum of the objective function was carried out by an approximate calculation. To check the approximation of the solution of the optimization problem by differentiating the objective function the problem algorithm in relative units is compiled. Based on the obtained optimization problem algorithm of the method of cutting logs (including cutting width and using a numerical method) the optimum sizes of boards and beams, as well as the values of the objective function are determined. The results showed that the optimal relative thickness of the two-sided beam, derived by calculating the problem algorithm coincided with the optimal relative thickness of the two-sided beam, derived analytically by differentiating the objective function. It is established that with increase of the cutting width the thickness of the two-edged cant beam increased and the dimensions of the side boards, obtained from the segment, decreased.

Keywords: sawlog cutting, two-edged cant, segment, three-edged half-beam, three-edged blanks, optimization, objective function, optimality criterion, problem algorithm.

REFERENCES

1. Agapov A.I. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov derevoobrabotki: ucheb. posobie* [Optimization of Technological Processes in Woodworking]. Kirov, 2012. 81 p.
2. Agapov A.I. Raskroy pilovochnika srednikh razmerov s vypilivaniem odnogo brusa i dvukh segmentov [Cutting of Medium-Sized Sawlog with Sawing Out of One Square Beam and Two Segments]. *Sb. materialov Vserossiyskoy ezhegodnoy nauch.-prakt. konf. "Obshchestvo, nauka, innovatsii" (NPK-2013), 15–26 apr., 2013 g.* [Proc. All-Russian Annual Sci. and Prac. Conf. "Society, Science, Innovation", 15–26 April, 2013]. Kirov, 2013.
3. Agapov A.I. Optimizatsiya raskroya pilovochnika bol'shikh razmerov s vypilivaniem trekh brus'ev i dvukh par bokovykh dosok [Optimization of Cutting of Large-Sized Sawlog with Sawing Out of Three Square Beams and Two Pairs of Side Boards]. *Lesnoy zhurnal*, 2015, no. 1, pp. 108–116.
4. Aksenov P.P. *Tekhnologiya pilomaterialov* [Technology of Sawn Wood]. Moscow, 1963. 579 p.
5. Agapov A.I. *Sposob izgotovleniya obreznykh pilomaterialov iz pilovochnika* [Methods of Manufacturing of Square-Edged Sawn Wood from Logs]. Patent RF, no. 2530997, 2014.
6. Ulasovets V.G. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva pilomaterialov: ucheb. posobie* [Technological Bases of Sawn Wood Production]. Yekaterinburg, 2002. 510 p.

Received on January 20, 2015



УДК 539.1:[676.017+630*811]
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.147

СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ В ДРЕВЕСИНЕ И БУМАГЕ

© *Е.И. Иванова*¹, канд. физ.-мат. наук., доц.

*С.М. Герасюта*¹, д-р физ.-мат. наук, проф.

*В.И. Иванов-Омский*², д-р физ.-мат. наук, проф.

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: elen.ivom@gmail.com

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, РАН, Политехническая ул. 26, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: elen.ivom@gmail.com

Методами Фурье инфракрасной спектроскопии произведено сравнение систем водородных связей (Н-связей) в высококачественной бумаге и в образцах хвойной древесины (ель спелая и заболонь) и лиственной древесины (заболонь липы). Интервал исследованных частот 3000...3700 см⁻¹ ограничен областью поглощения гидроксильными ОН-группами, частоты которых наиболее чувствительны к возникновению Н-связей. Отличительная особенность данного исследования состоит в том, что все измерения производились на спилах натуральной древесины. Уменьшение пропускания вдали от полос поглощения связывалось с рассеянием излучения на естественной неоднородности древесного материала, которое благодаря высокому качеству спилов оказалось достаточно малым, чтобы препятствовать детальному исследованию спектров поглощения. Для оценки параметров Н-связей производилась деконволюция полос поглощения ОН-групп гауссовыми компонентами. Для корректного выделения поглощения гидроксильными группами первоначально деконволюции подвергается весь фрагмент, включающий в себя полосы поглощения как метиленовыми, так и гидроксильными группами. В дальнейшем анализировались только параметры контуров деконволюции, относящиеся к гидроксильным группам. Принималось, что каждая компонента деконволюции может быть ассоциирована с определенным типом Н-связи. Определялся сдвиг частот компонент деконволюции относительно собственной частоты колебаний изолированной гидроксильной группы, не охваченной по этой причине Н-связью. Для определения энергии Н-связей использовались литературные данные по корреляции энергии Н-связи с частотным сдвигом. Относительная плотность Н-связей оценивалась по отношению площадей контуров деконволюции. Оказалось, что энергии Н-связей всех исследованных образцов для всех типов Н-связей совпадают или весьма близки друг к другу, однако их плотности различаются. Наиболее близко совпадают распределения плотностей связей по энергиям в конденсаторной бумаге и спелой ели. Оказалось, что плотности наиболее сильных межмолекулярных водородных связей в древесине лиственных пород отличаются от их энергии в

древесине хвойной. Оценка величин водородных связей позволяет различать гидроксильные группы глюкозы и адсорбированной воды.

Ключевые слова: Фурье ИК-спектроскопия, водородная связь, ель, липа, бумага.

Введение

С тех пор, как появилась работа [5], ставшая наиболее цитируемой в литературе по ИК-спектроскопии древесины, внимание к изучению спектров поглощения гидроксильными группами существенно возросло. Особенно когда было показано, что спектр поглощения гидроксильной группой чувствителен к образованию водородных связей, чтобы обеспечить их диагностику в широком круге материалов. Руководствуясь этими соображениями, было выполнено сравнение систем водородных связей (Н-связей) в высококачественной бумаге и древесине некоторых пород в целях выяснения степени их индивидуальности и пригодности для количественного и качественного анализа. Для демонстрации этих возможностей исследовали спектры ИК-поглощения образцов древесины хвойной (спелая древесина и заболонь ели обыкновенной) и лиственной (липа) пород, а также конденсаторной бумаги (ГОСТ 1908–88). Исследования ограничивались областью частот поглощения валентными колебаниями гидроксильных групп, максимально чувствительных к состоянию Н-связей [1, 6].

В работе используется метод Фурье ИК-спектроскопии, завоевавший прочное место в ряду средств диагностики целлюлозосодержащих материалов, в первую очередь древесины [6].

Метод исследования и результаты

Образцы древесины для исследований ИК-спектров отбирали в виде тангентальных срезов из спилов ели обыкновенной (*Picea abies*) и липы (*Tilia Cordata*), из которых микротомным устройством изготавливали пластинки толщиной 80...100 мкм. Исследованию подвергали две зоны спила ели (заболонь и спелая древесина) и для сравнения зону заболони древесины липы в шести повторностях для каждой. Использовали образцы, высушенные при температуре 105 °С в сушильном шкафу в течение 10 мин. Образцы конденсаторной бумаги имели толщину порядка 10 мкм. Измерения выполняли с помощью Фурье-спектрометра Shimadzu FTIR-8400S с разрешением 4 см⁻¹ при 20 сканах. Учитывая, что в формировании бумаги и ее прочностных характеристик значительная роль принадлежит межволоконным Н-связям, измерения ограничивались областью частот поглощения валентными колебаниями гидроксильных групп, спектр которых подвержен наибольшему влиянию водородных связей. По этой причине спектроскопическое исследование структуры полос поглощения гидроксильных групп служит надежным средством диагностики системы Н-связей.

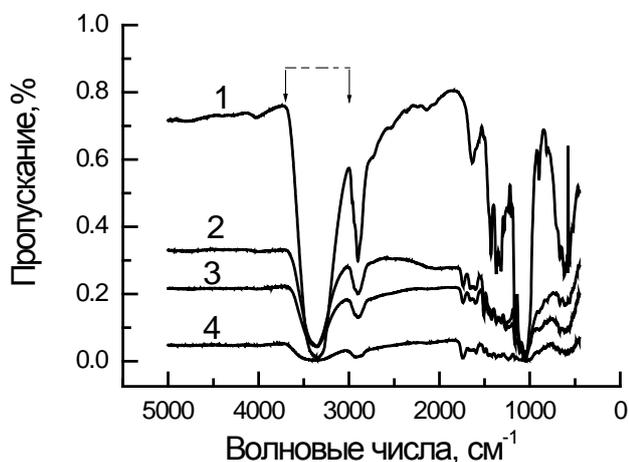


Рис. 1. ИК-спектры: 1 – конденсаторная бумага; 2 – спелая ель; 3 – заболонь ели; 4 – заболонь липы (пунктиром со стрелками указана область вклада поглощения ОН-группами)

На рис. 1 приведены типичные спектры пропускания заболони древесины липы, заболони и спелой древесины ели, а также конденсаторной бумаги. Видно, что в избранном масштабе спектры во многом подобны, особенно в области частот поглощения гидроксильными группами. Не вдаваясь в подробности, каким компонентам (целлюлоза, лигнин и т. д.) принадлежат эти группы, проведем мониторинг максимумов поглощения гидроксильными группами. Далее, пользуясь калиброванными по глюкозе корреляционными соотношениями [2] между энергией Н-связи и величиной сдвига частоты поглощения гидроксильной группой, оценим параметры Н-связи. Сдвиг частоты вычисляется относительно частоты поглощения изолированной гидроксильной группой (по этой причине он не охвачен Н-связью). Следует отметить, что в данной работе измерения ИК-спектров проводили на спилах натуральной древесины, не подвергнутых механическому измельчению с последующей запрессовкой в таблетки из КВr, как это обычно принято. Благодаря этой особенности нашей методики удастся избежать изменений древесной ткани, возникающих при подготовке [7]. Уменьшение пропускания излучения вдали от полос поглощения, видимое на рис. 1, следует отнести к рассеянию излучения на неоднородностях древесины. Это рассеяние в исследованных случаях к счастью недостаточно, чтобы препятствовать извлечению необходимой информации о спектре поглощения. Таким образом, природная неоднородность древесины не может служить препятствием для исследования ИК-спектров поглощения на спилах натуральной древесины.

Для более детального исследования представим на рис. 2 фрагменты спектров, отмеченных стрелками на рис. 1. Выделенные фрагменты содержат вклад поглощения колебаниями гидроксильных групп, представляющий основной интерес. К сожалению, слишком близко к ним располагаются и частично перекрываются с ними полосы поглощения метильных и метиленовых групп, не участвующих в формировании Н-связей.

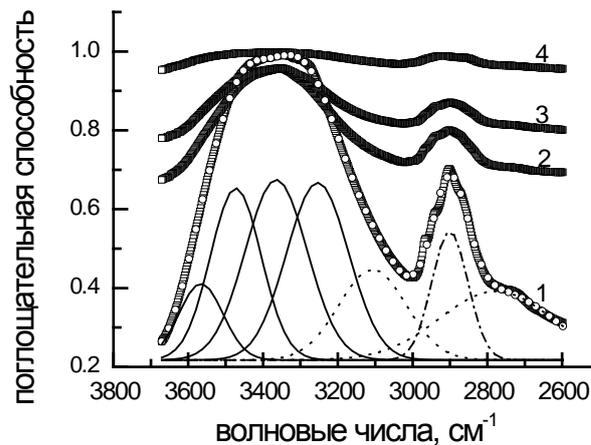


Рис. 2. Фрагменты спектров поглощательной способности: 1 – конденсаторная бумага с деконволюцией на гауссовы контуры; 2 – спелая ель; 3 – заболонь ели; 4 – заболонь липы (параметры результатов приведены в таблице; коэффициент регрессии $R^2 = 0,9994$)

Для корректного выделения поглощения гидроксильными группами первоначально деконволюции подвергается весь фрагмент спектра, включающий в себя полосы поглощения как метиленовыми, так и гидроксильными группами. В дальнейшем анализируются только параметры контуров деконволюции, относящиеся к гидроксильным группам. Деконволюция выполнена с помощью программы Origin 6. На рис. 2 представлены результаты деконволюции только для одного спектра бумаги, чтобы не мешать их обзорности. Вызывает некоторое удивление появление четвертой ОН-группы, хотя известно, что в целлюлозе их всего три [4, 5]. Скорее всего, четвертая группа принадлежит адсорбированной воде. Как показано в таблице, четвертая ОН-группа охвачена наиболее слабой Н-связью, с помощью которой связываются, например, адсорбированные молекулы воды. Типы Н-связей, ассоциированных с ОН-группами, принадлежащими целлюлозе, указаны согласно [5] в соответствующей графе таблицы. Высокие значения коэффициентов регрессии свидетельствуют о высокой надежности сделанных оценок. Если фрагменты спектров на рис. 2

мало различимы по форме, за исключением спектра бумаги, то результаты деконволюции хорошо дискриминируют все фрагменты. Заметим, что сравнительно высокая прозрачность бумаги объясняется тем, что ее толщина существенно меньше, чем удается приготовить срез древесины.

Параметры результатов деконволюции

Максимум гаусс контура, см ⁻¹	Площадь контура, отн. ед.	Сдвиг частоты контура, см ⁻¹	Плотность Н-связи, %	Энергия Н-связи, кДж/моль	Тип Н-связи в целлюлозе древесины
<i>Конденсаторная бумага (R² = 0,9994)</i>					
3566	22,0	84,0	8,0	5,4	–
3473	77,0	177	27,0	10,8	Внутримолекулярные: O(C ₂)H – O(C ₆)
3357	94,0	293	33,0	16,8	O(C ₃)H – O(C ₅)
3242	94,0	408	33,0	20,2	Межмолекулярные: O(C ₆)H – O(C ₃)
<i>Спелая ель (R² = 0,9994)</i>					
3538	12,0	112	19,7	7,0	–
3457	11,0	193	17,9	11,7	Внутримолекулярные: O(C ₂)H – O(C ₆)
3369	19,7	281	32,0	16,2	O(C ₃)H – O(C ₅)
3256	18,7	394	30,4	20,0	Межмолекулярные: O(C ₆)H – O(C ₃)
<i>Заболонь ели (R² = 0,9997)</i>					
3500	22,0	150	26,0	9,3	–
3443	3,8	207	4,5	12,5	Внутримолекулярные: O(C ₂)H – O(C ₆)
3367	6,3	283	7,5	16,3	O(C ₃)H – O(C ₅)
3310	52,5	340	62,0	18,6	Межмолекулярные: O(C ₆)H – O(C ₃)
<i>Заболонь липы (R² = 0,9991)</i>					
3574	1,4	76	7,0	4,9	–
3483	4,3	167	21,0	10,0	Внутримолекулярные: O(C ₂)H – O(C ₆)
3356	2,6	294	13,0	16,8	O(C ₃)H – O(C ₅)
3259	11,8	391	58,0	20,0	Межмолекулярные: O(C ₆)H – O(C ₃)

Анализ результатов

Проанализируем содержание таблицы, где приводятся значения площадей полос поглощения, пропорциональных плотности, или числу ОН-групп в единице объема. В колонке «Сдвиг частоты» представлен сдвиг частоты максимума полосы относительно частоты поглощения гидроксильной группой, не охваченной Н-связью. В отношении последней величины не существует единого мнения, поэтому было выбрано значение 3650 см⁻¹ [3].

В литературе существует ряд корреляционных соотношений между величиной частотного сдвига при образовании Н-связи и ее энергией (например [2]). Мы выбираем рекомендованное там соотношение для энергии Н-связи ($E_{\text{НВ}}$, кДж/моль) при сдвиге (Δ_{WN} , см^{-1}):

$$E_{\text{НВ}} = 5 - 0,1 \cdot \Delta_{\text{WN}} + 8 \cdot 10^{-5} \Delta_{\text{WN}}^2.$$

Полученные с помощью этого соотношения результаты представлены в колонке «Энергия Н-связи». Рекомендованное соотношение откалибровано по пяти ОН-группам D-глюкозы [2]. На основании приведенных в таблице данных построена 3-мерная диаграмма энергия Н-связи–плотность Н-связей–тип Н-связи, приведенная на рис. 3.

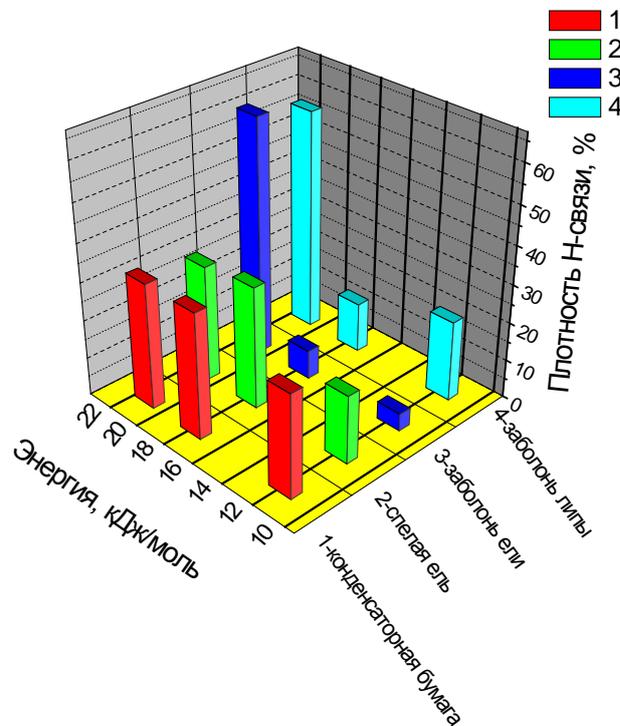


Рис. 3. Диаграмма результатов деконволюции по данным таблицы

Необходимо отметить, что энергии Н-связей, ассоциированных со всеми ОН-группами, приблизительно одинаковы, но их плотности значительно различаются. Плотности Н-связей в спелой древесине ели близки к бумаге, а в заболони ели и липы они сильно отличаются от бумаги и друг от друга. Кроме того, плотности наиболее сильных межмолекулярных связей в древесине лиственной природы существенно отличаются от плотностей в древе-

сине хвойной природы. Однако это заслуживает отдельного рассмотрения и составит предмет нашего следующего сообщения.

Таким образом, для регистрации ИК-спектров могут быть использованы натуральные силы древесины. Деконволюция ИК-спектров в области поглощения ОН-группами позволяет оценить энергию водородных связей и их концентрацию. Установлено, что водородные связи в исследованных образцах конденсаторной бумаги, древесины ели и липы имеют приблизительно одинаковую энергию, но различаются по плотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брауэр Б., Пинсу Б., Буш В., Бар И., Симонс Ж.П., Гербер Б.Р. ИК-спектроскопия α-глюкозы, β-глюкозы и сахара // J. Phys. Chem. A. 2011. Т. 115. С. 5859–5872.
2. Иванов-Омский В.И. ИК-спектроскопия водородных связей в D-глюкозе // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40 (18). С. 29–34.
3. Либовицкий Е. Корреляция О-Н частот колебаний и О-Н...О длине водородных связей в минералах // Monatshefte für Chemi. 1999. Т. 130. С. 1047–1047.
4. Лянг С.И., Марчсэлт Р.Х. ИК-спектры кристаллических полисахаридов. 1. Водородные связи в природной целлюлозе. // J. Polym. Sci. 1959. Т. 37. С. 385–395.
5. Фенгель Д. Характеризация целлюлозы с помощью деконволюции области валентных колебаний ОН-групп в Фурье ИК-спектрах. Holzforschung, 1992. Т. 46. С. 283–288.
6. Фэн М., Дэай Д., Хуанг В. ИК-Фурье спектроскопия натуральных волокон // Фурье ИК-спектроскопия материалов: сб. / Под ред. М. Салех. Интех, 2012.
7. Шванигер М., Родригес ДЖ. С., Перейра Г., Хинтерстройсер И. Влияние кратковременных колебаний шаровой мельницы на форму спектров древесины и целлюлозы // Колебательная спектроскопия, 2004. Т. 36. С. 23–40.

Поступила 21.05.15

UDC 547

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.147

Comparison of the Hydrogen Bonding Systems in Wood and Paper

E.I. Ivanova¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

S.M. Gerasyuta¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

V.I. Ivanov-Omskiy², Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

¹Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: elen.ivom@gmail.com

²Ioffe Physical Technical Institute, Polytechnicheskaya st., 26, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: ivanov.ivom@mail.ioffe.ru

A comparison of hydrogen bonding systems (H-bonds) in the high-quality paper and in the samples of softwood (spruce ripe and sapwood) and hardwood (sapwood of basswood) was performed by Fourier transform infrared spectroscopy methods. The interval of the studied

frequencies 3000...3700 cm^{-1} was limited to an absorption region by hydroxyl (OH)-groups as their frequencies were the most sensitive to the occurrence of H-bonds. A distinctive feature of this study was that all measurements were performed on the saw cuts of natural wood. Reducing of transmission away from the absorption bands was associated with the scattering of radiation on the natural heterogeneity of wood material. The scattering due to the high quality of the saw cuts was not enough to prevent the detailed study of the absorption spectra. To estimate the H-bonds parameters the deconvolution of the absorption bands of OH-groups by Gaussian components was performed. For proper selection of the absorption by hydroxyl groups initially the entire fragment, comprising the absorption bands by the methylene and hydroxyl groups, was subjected to deconvolution. Subsequently, only the parameters of deconvolution circuits, relating to the hydroxyl groups, were analyzed. It was assumed that each component of deconvolution could be associated with a certain type of H-bonds. We determined the frequency shift of the component of deconvolution with respect to the proper resonance frequency of the isolated hydroxyl group not covered for this reason by H-bond. To determine the energy of hydrogen bonds we used the literature data on the energy correlation of H-bond with the frequency shift. The relative density of hydrogen bonds was assessed in relation to the squares of deconvolution circuits. It was found that the energies of hydrogen bonds of all studied samples for all types of H-bonds were the same or very close to each other, but were different in their density. The distributions of the connection densities on the energies in the capacitor paper and spruce ripe matched most closely. The densities of the strongest intermolecular hydrogen bonds in the hardwood differed from their energy in softwood. The quantities evaluation of hydrogen bonds allows us to distinguish between glucose hydroxyl groups and adsorbed water.

Keywords: Fourier transform infrared spectroscopy, hydrogen bond, spruce, basswood, paper.

REFERENCES

1. Brauer B., Pincu M., Buch V., Bar I., Simons J.P., Gerber B.R. Vibrational Spectra of α -Glucose, β -Glucose, and Sucrose: Anharmonic Calculations and Experiment. *J. Phys. Chem. A*, 2011, vol. 115, pp. 5859–5872.
2. Ivanov-Omskiy V.I. IK-spektroskopiya vodorodnykh svyazey v D-glyukoze [IR Spectroscopy of Hydrogen Bonds in D-Glucose]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki* [Technical Physics Letters], 2014, vol. 40(18), pp. 29–34.
3. Libowitzky E. Correlation of O-H Stretching Frequencies and O-H...O Hydrogen Bond Lengths in Minerals. *Monatshefte für Chemie*, 1999, vol. 130, pp. 1047–1059.
4. Liang C. Y., Marchessault R.H. Infrared Spectra of Crystalline Polysaccharides. I. Hydrogen Bonds in Native Celluloses. *J. Polym. Sci.*, 1959, vol. 37, pp. 385–395.
5. Fengel D. Characterization of Cellulose by Deconvoluting the OH Valency Range in FTIR Spectra. *Holzforschung*, 1992, vol. 46, pp. 283–288.
6. Fan M., Dai D., Huang B. Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Natural Fibres. *Materials Analysis*. Ed. by Salih M.S. Croatia, 2012.
7. Schwanninger M., Rodrigues J.C., Pereira H., Hinterstoisser B. Effects of Short-Time Vibratory Ball Milling on the Shape of FT-IR Spectra of Wood and Cellulose. *Vib Spectrosc.*, 2004, vol. 36, iss. 1, pp. 23–40. doi: 10.1016/j.vibspec.2004.02.003.

Received on May 21, 2015

УДК 676.274

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.155

ИЗМЕРЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ГОФРИРОВАННОГО КАРТОНА ПРИ ИЗГИБЕ*

© *Е.Ю. Ларина, канд. техн. наук*

Я.В. Казаков, канд. техн. наук

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: ketrin@bk.ru, j.kazakov@narfu.ru

Ящики из гофрированного картона являются очень распространенным видом упаковки. Для прогнозирования их поведения в условиях эксплуатации используют не только стандартные, но и дополнительные характеристики гофрированного картона, в первую очередь жесткость при изгибе. Из всех методов измерения жесткости гофрокартона при изгибе наибольшей достоверностью обладает 4-точечный метод, сведений об использовании которого в настоящее время недостаточно. В работе представлена методика измерения жесткости гофрированного картона при 4-точечном режиме изгиба на приборе L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108. На примере образцов трехслойного гофрокартона различных марок от T22 до T25 с профилем гофры С выполнен анализ факторов, влияющих на результаты испытания. Исследовано влияние длины образца в диапазоне от 100 до 200 мм и массы грузов в диапазоне от 70 до 220 г. Показано преимущество принятия за результат среднего геометрического жесткости при изгибе, измеренной в машинном (MD) и поперечном машинному (CD) направлениях. Экспериментально установлено, что увеличение длины образца и прилагаемой нагрузки приводит к снижению жесткости гофрокартона при изгибе. В наибольшей степени влияние длины образца сказывается при низких значениях прилагаемой нагрузки, влияние прилагаемой нагрузки – при малой длине образца. Установлено, что анизотропия жесткости при изгибе гофрокартона низкой марки T22 (2,7...3,1) выше, чем высокой марки T25 (2,5...2,7), и она уменьшается с увеличением длины образца. Для корректного и надежного проведения измерения длина испытуемого образца гофрокартона должна составлять не менее 200 мм, поскольку в этом случае влияние других факторов практически нивелируется. Величина прилагаемой нагрузки зависит от марки гофрокартона и должна составлять от 120 до 220 г. Полученные результаты позволят повысить достоверность оценки качества гофрированного картона и обеспечить более надежное прогнозирование свойств гофроящиков.

Ключевые слова: гофрированный картон, изгиб, сопротивление изгибу, жесткость при изгибе.

*Работа выполнена в инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России».

На сегодняшний день ящики из гофрированного картона являются самым распространенным видом упаковки [5, 9]. Благодаря низкой стоимости и многообразию форм и размеров, гофроупаковка находит свое применение во многих сферах жизнедеятельности человека. Важное условие дальнейшего развития предприятий тароупаковочной отрасли – достижение высокого и стабильного качества тарного картона и изделий из него, которое обусловлено совокупностью свойств исходных компонентов, особенностями используемой технологии, а также наличием и стабильным функционированием комплексной системы управления качеством [9].

Применяемые в отрасли при оценке качества гофрокартона механические характеристики – сопротивление продавливанию и сопротивление торцевому сжатию [1] – не воспроизводят весь комплекс реально воздействующих сил при затаривании, складировании и транспортировке гофроящиков. Поэтому прогнозировать поведение гофроящика с использованием стандартных характеристик затруднительно и требуется использование дополнительных характеристик, к которым относится жесткость при изгибе [2, 5].

Жесткость гофрокартона является одной из его главных характеристик, так как упаковка в первую очередь должна выполнять функцию защиты содержимого. При одной и той же массе 1 м^2 гофрокартон разных марок может обладать различными жесткостными характеристиками.

Жесткость при изгибе включена в уравнение McKee [11], описывающее взаимосвязь между сопротивлением сжатию гофроящика (BCT) и свойствами гофрокартона – сопротивлением торцевому сжатию (ECT), жесткостью при изгибе (S_b), а также периметром гофроящика (P).

Информация о жесткости при изгибе гофрокартона важна для предотвращения деформации гофроящика под воздействием содержимого, что может произойти при их затаривании или укладке в штабеля, за счет чего снижается несущая способность ящика.

Жесткость при изгибе также имеет значение, например, при упаковке и использовании больших открытых гофроящиков, особенно ее необходимо учитывать при увеличении размеров ящика. Прогиб стенки ящика может вызвать трудности при автоматизированном складировании.

В процессе измерения жесткости при изгибе картона применяются различные методы, включающие 2-, 3- и 4-точечные режимы приложения нагрузки [3–5, 11]. Первые два метода используются в универсальных испытательных машинах, но практика показала, что они приводят к ошибкам определения из-за сил сдвига, возникающих при изгибе гофрокартона [11].

Проведенные ранее исследования на образцах картона-лайнера и флутинга показали сложность явлений, происходящих при изгибе волокни-

стных целлюлозно-бумажных материалов [6, 7], и важную роль масштабного фактора.

Для измерения жесткости гофрокартона при изгибе в настоящее время рекомендуется применять 4-точечный метод, реализованный в современных приборах. Использование специальных передвижных пневматических зажимных устройств при проведении измерений по этому методу исключает влияние коробления, кручения и волнистости листа гофрокартона, что позволяет точно измерить чистую жесткости при изгибе [11].

В инновационно-технологическом центре САФУ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» для определения сопротивления образцов гофрокартона изгибу установлен и функционирует 4-точечный прибор Lorentzen&Wettre 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид прибора L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 для определения жесткости при изгибе по 4-точечному методу

Данный прибор оценивает сопротивление образцов гофрокартона, обеспечивая постоянный изгибающий момент в области упругой деформации. По данным разработчиков, прибор обеспечивает надежное и достаточно быстрое измерение на гофрах А, В, С, D и Е, а также на образцах двух-, трех-, пяти-слойного гофрокартона [8]. Принцип приведения испытания представлен на рис. 2.

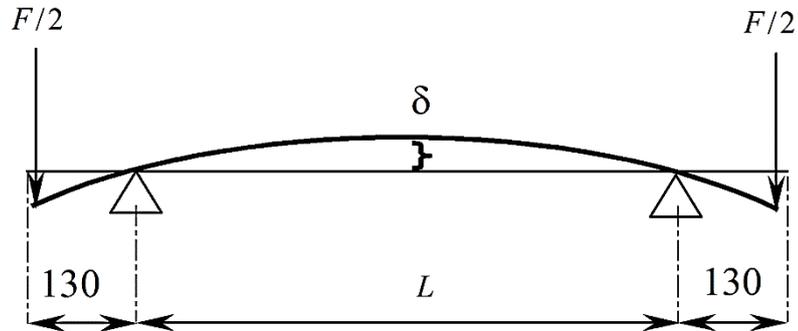


Рис. 2. Принцип приложения нагрузки при 4-точечном методе испытания на изгиб (данные приведены в миллиметрах)

Жесткость образца картона при изгибе (S_b , Н·м) вычисляется по следующему уравнению:

$$S_b = \frac{0,13(F/2)L}{4 \cdot 2 \delta b}, \quad (1)$$

где F – действующая на образец сила, Н;
 L – свободная длина изгиба, м;
 δ – деформация (измеряемая величина), м;
 b – ширина образца, м.

Вследствие анизотропии гофрированного картона и отдельных слоев картона-лайнера жесткость при изгибе в продольном (машинном, MD) и поперечном машинному (CD) направлениях отличается друг от друга (рис. 3). О вкладе волнистого слоя в жесткость гофрированного картона существуют различные мнения [10].

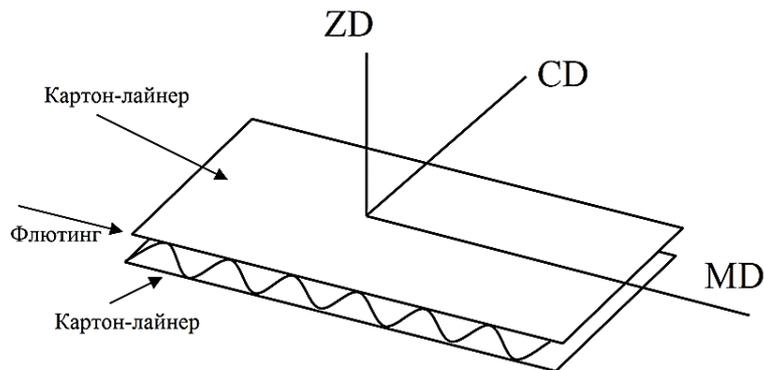


Рис. 3. Структура гофрированного картона и основные направления

В настоящее время процедура измерения жесткости при изгибе гофрированного картона стандартами не регламентируется. В качестве конечной оценки жесткости гофрокартона при изгибе S_b рекомендуется использовать

среднее геометрическое жесткости при изгибе, измеренной в машинном (MD) и поперечном машинному (CD) направлениях [11]:

$$S_b = \sqrt{S_b^{MD} S_b^{CD}}. \quad (2)$$

Из формулы (1) следует, что измеряемое значение жесткости при изгибе гофрокартона (толщина d , ширина b) по результатам измерения деформации δ зависит от прилагаемой нагрузки F и длины образца L . Интерес представляет исследование влияния этих факторов на образцах гофрокартона различных марок.

Для эксперимента использовали образцы гофрокартона марок T22 – T25 (картон–лайнер и бумага для гофрирования из первичного волокна на основе целлюлозы высокого выхода (ЦВВ) и полуцеллюлозы (ПЦ) с профилем гофры С (высота гофры – 3,5 мм, шаг гофры – 6,5 мм), соответствующим требованиям ГОСТ 7376–89 [4].

В соответствии с руководством по эксплуатации прибора L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 разработчиками регламентируются следующие условия проведения испытаний на изгиб образцов гофрокартона с профилем гофры С [8]:

Размеры образца, мм:	
ширина.....	100
длина.....	200
толщина.....	3,5...4,5
Нагрузка на сторону, г:	
MD.....	320
CD.....	170
Сопротивление изгибу, Н·м:	
MD.....	15
CD.....	6

Проведение пробных измерений жесткости при изгибе гофрокартона с профилем гофры С показало, что величина измеренной жесткости при изгибе в этих условиях сильно отличается в меньшую сторону от приведенной выше величины. Вероятнее всего эти данные характерны для гофрокартона европейских производителей. В связи с этим возникает необходимость уточнения условий измерения для более достоверной оценки жесткости гофрированного картона при изгибе.

Цель данной работы – оценить влияние прилагаемой нагрузки и длины испытуемого образца на измеряемую жесткость при изгибе на примере трехслойного гофрокартона различных марок.

В таблице представлены результаты измерений жесткости при изгибе гофрированного картона и характеристик анизотропии для гофрокартона низкой (Т-22) и высокой (Т-25) марок.

Жесткость при изгибе в MD направлении в основном зависит от жесткости при изгибе лайнеров, волокна которых ориентированы в направлении MD (вдоль образца). Благодаря преимущественной ориентации волокон в лайнере жесткость при изгибе картона во многом определяется жесткостью

**Жесткость и анизотропия жесткости
при изгибе гофрокартона марок Т-22 и Т-25**

Марка гофрокартона	Масса груза, г	Длина образца, мм	Жесткость при изгибе, Н·м				Анизотропия жесткости при изгибе				
			S_b^{MD}	S_b^{CD}	$S_b = \sqrt{S_b^{MD} S_b^{CD}}$	$S_b^a = \frac{S_b^{MD} + S_b^{CD}}{2}$	$\frac{S_b^{MD}}{S_b}$	$\frac{S_b}{S_b^{CD}}$	$\frac{S_b^{MD}}{S_b^a}$	$\frac{S_b^a}{S_b^{CD}}$	$\frac{S_b^{MD}}{S_b^{CD}}$
Т-22	70	100	3,04	0,98	1,73	2,01	1,76	1,76	1,51	2,05	3,11
		150	2,92	0,96	1,68	1,94	1,74	1,74	1,51	2,02	3,03
		200	2,69	0,98	1,63	1,84	1,66	1,66	1,47	1,87	2,73
	160	100	2,77	0,91	1,59	1,84	1,74	1,74	1,51	2,02	3,04
		150	2,84	0,94	1,63	1,89	1,74	1,74	1,50	2,01	3,02
		200	2,63	0,97	1,60	1,80	1,65	1,65	1,46	1,86	2,72
Т-25	70	100	3,99	1,46	2,41	2,72	1,65	1,65	1,46	1,87	2,74
		150	3,59	1,48	2,30	2,53	1,56	1,56	1,42	1,71	2,43
		200	3,54	1,43	2,25	2,49	1,57	1,57	1,42	1,74	2,48
	160	100	3,75	1,39	2,28	2,57	1,64	1,64	1,46	1,85	2,70
		150	3,54	1,41	2,23	2,48	1,58	1,58	1,43	1,76	2,51
		200	3,54	1,39	2,22	2,47	1,60	1,60	1,44	1,77	2,55

волокон, на которые приходится основная нагрузка. Экспериментальные данные, приведенные в таблице, свидетельствуют, что при увеличении длины образца измеряемая жесткость при изгибе снижается, по всей видимости, за счет увеличения в образце количества связей, соединяющих волокна в продольном направлении.

В CD направлении жесткость при изгибе определяется главным образом жесткостью волнистой конструкции, образуемой гофрированным флютингом. При этом вклад лайнеров с поперечной ориентацией волокна незначителен. В результате жесткость при изгибе гофрокартона практически не зависит от длины образца.

Результатирующее изменение жесткости при изгибе, как среднее геометрическое, так и среднее арифметическое из значений в направлениях MD и CD, соответствует изменению жесткости в направлении MD. При этом среднее арифметическое значение выше. Преимущество использования среднего геометрического значения выявляется из данных таблицы: S_b пропорциональна S_b^{MD} , и S_b^{CD} .

Обнаружено, что анизотропия жесткости при изгибе зависит от длины образца и марки гофрокартона. Отмечено, что анизотропия гофрокартона низкой марки Т22 (2,7...3,1) выше, чем высокой марки Т25 (2,5...2,7), и снижается с увеличением длины образца, которая становится очень важным фактором.

Влияние длины образца проанализировано на образцах гофрокартона разных марок (от T22 до T25). Длина испытуемого образца составляла 100, 150 и 200 мм, ширина – 100 мм. На рис. 4 представлены результаты измерения жесткости при изгибе гофрокартона в зависимости от длины испытуемого образца (l) и приложенной нагрузки (S_b).

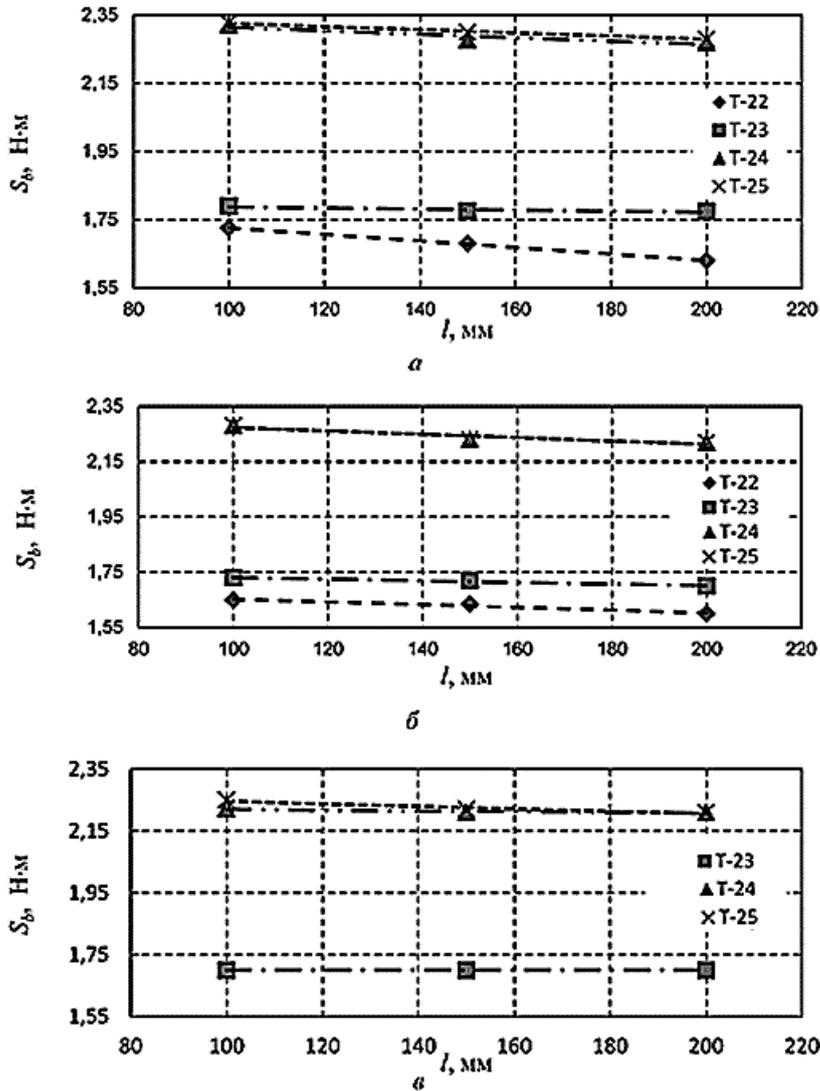


Рис. 4. Влияние длины образца на жесткость при изгибе гофрокартона при различных значениях приложенной нагрузки, г: а – 70; б – 160; в – 220

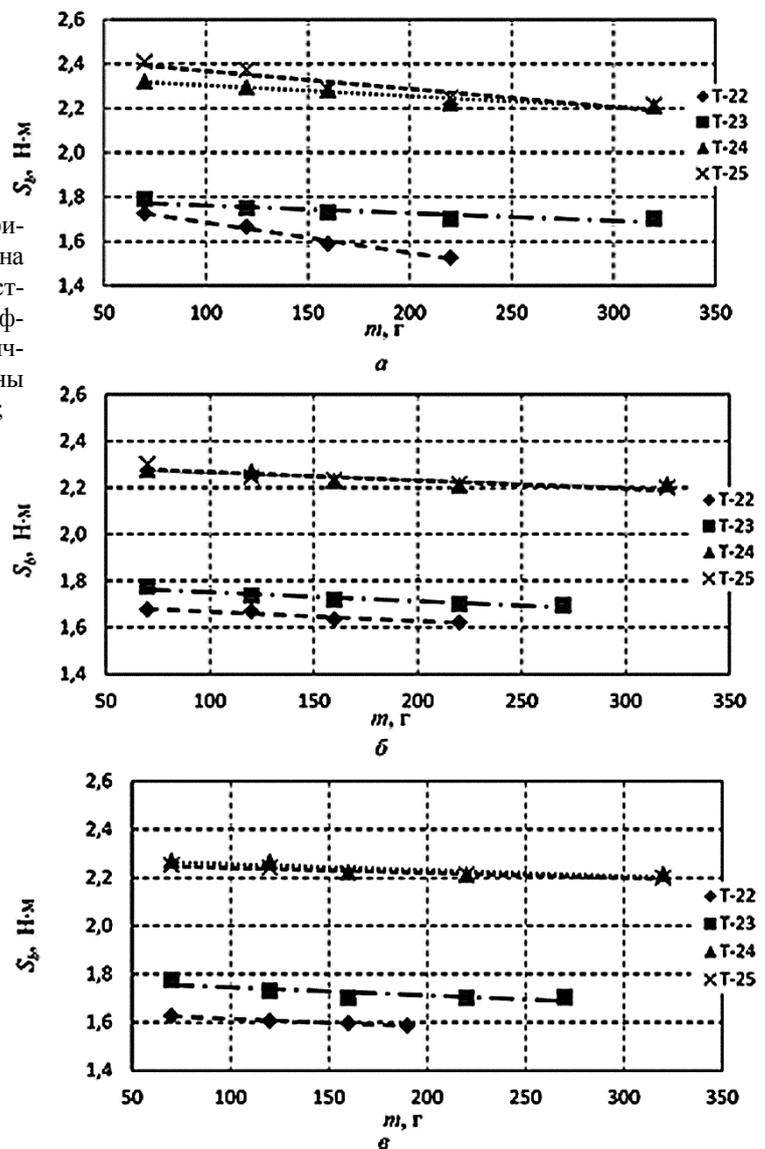
Из данных рис. 4 следует, что с увеличением длины образца жесткость при изгибе гофрокартона снижается, что особенно заметно при низких значе-

ниях прилагаемой нагрузки. С увеличением нагрузки влияние длины образца на жесткость гофрокартона снижается, а при максимальной длине – практически нивелируется.

Выявлено, что при длине 200 мм гофрокартон марки T22 не выдерживает груз массой 220 г и ломается в процессе изгиба, что противоречит рекомендованным в руководстве по эксплуатации значениям. Установлено, что сопротивление изгибу для всех типов испытуемого гофрокартона в несколько раз ниже, чем представления разработчиков прибора.

Зависимость жесткости при изгибе от приложенной нагрузки (m – масса груза) представлена на рис. 5.

Рис. 5. Влияние приложенной нагрузки на измеряемую жесткость при изгибе гофрокартона при различных значениях длины образца, мм: а – 100; б – 150; в – 200



В соответствии с руководством по эксплуатации [8], измеряя жесткость при изгибе, при испытании в машинном направлении (MD) рекомендовано использовать груз массой 320 г, в поперечном (CD) – 170 г. Результаты эксперимента показали, что рекомендованные руководством значения прилагаемой нагрузки не подходят для испытания трехслойного гофрокартона с профилем гофры С. Обнаружено, что при массе груза свыше 200 г происходит слом гофрокартона низких марок.

Выявлено, что с увеличением приложенной нагрузки (при одной и той же длине испытуемого образца 100 и 200 мм) жесткость при изгибе гофрокартона снижается: для T22 – от 0,10 при длине образца 100 мм до 0,04 Н·м при длине образца 200 мм; для T23 – соответственно от 0,09 до 0,07 Н·м; для T24 – от 0,11 до 0,06 Н·м; T25 – от 0,12 до 0,08 Н·м. Степень снижения жесткости при изгибе уменьшается с ростом длины образца.

Установлено, что при длине образца 200 мм с увеличением нагрузки жесткость при изгибе гофрокартона снижается в наименьшей степени.

Исходя из полученных в ходе проведенного эксперимента данных на приборе Lorentzen&Wettre 4-point Bending Stiffness Tester SE 108 можно рекомендовать длину испытуемого образца для гофрокартона типа С, равную 200 мм, поскольку в этом случае влияние других факторов практически нивелируется. Прилагаемая нагрузка (масса грузов) зависит от марки гофрокартона: для T22 рекомендуется 120 г, для T25 – 220 г.

Выводы

1. Условия проведения испытаний влияют на величину жесткости гофрокартона при изгибе: увеличение длины образца и прилагаемой нагрузки приводит к снижению жесткости при изгибе.

2. Анизотропия жесткости при изгибе гофрокартона низкой марки T22 (2,7...3,1) выше, чем высокой марки T25 (2,5...2,7), при этом она уменьшается с увеличением длины образца.

3. Оптимальные условия для проведения испытаний гофрокартона типа С на изгиб с применением прибора Lorentzen&Wettre 4-point Bending Stiffness Tester SE 108: длина испытуемого образца – 200 мм; прилагаемая нагрузка для T22 – 120 г, для T25 – 220 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 7376–89. Картон гофрированный. Общие технические условия. Введ. 01.01.91.
2. Казаков Я.В., Гурьев А.В., Комаров В.И., Крыжановский А.О. Журавлева А.Н. Жесткость при изгибе гофрокартона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 6. С. 50–52.

3. *Комаров В.И.* Деформативность целлюлозно-бумажных материалов при изгибе // Лесн. журн. 1994. № 1. С. 96–103. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Комаров В.И.* Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов // Лесн. журн. 1994. № 3. С. 133–142. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Комаров В.И., Гурьев А.В., Елькин В.П.* Механика деформирования целлюлозных тароупаковочных материалов: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 175 с.
6. *Комаров В.И., Ларина Е.Ю.* Расчет жесткости при изгибе волокнистых целлюлозно-бумажных материалов с учетом пластической деформации в сжатой зоне в плоскости листа // Лесн. журн. 2009. № 4. С. 106–110. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Ларина Е.Ю., Комаров В.И.* Влияние пластических деформаций по толщине и в плоскости листа, возникающих при испытании на изгиб, на величину измеряемой характеристики // Лесн. журн. 2010. № 4. С. 89–95. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Прибор L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 018 для определения сопротивления образцов изгибу. Руководство по эксплуатации. Lorentzen & Wettre, 1999. 27 с.
9. *Смолин А.С., Комаров В.И., Дубовый В.К., Белоглазов В.И.* Технология гофрокартона: учеб. пособие. Ч. I. СПб.: СПбГГТУРП, 2014. 146 с.
10. *Blechsmidt J.* Papierverarbeitungstechnik. Dresden, 2012. 576 S.
11. *Markstrom H.* Testing Methods and Instruments for Corrugated Board. Elanders Tofters AB, 1999. 103 p.

Поступила 13.05.15

УДК 676.274

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.155

Measurement of Bending Stiffness of Corrugated Board

E.Yu. Larina, Candidate of Engineering

Ya.V. Kazakov, Candidate of Engineering

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

The corrugated boxes are a very common type of packaging. The standard and additional features of corrugated board, primarily the bending stiffness are used in order to predict their behavior under operating conditions. The 4-point method is more valid of all the methods of measuring the bending stiffness of corrugated board. The information on the use of it is currently insufficient. The paper presents a method of measuring the stiffness of corrugated board with the 4-point bending mode on the device “L&W 4-point Bending Stiffness Tester SE 108”. The analysis of the factors affecting on the test results is carried out on the samples of C-flute single-wall corrugated board of different brands of T22 to T25. The influence

of the sample length within the range from 100...200 mm and a loaded weight in the range from 70...220 grams is studied. The advantage of acceptance as a result of the geometric mean of bending stiffness, measured in the machine (MD) and cross machine (CD) directions is shown. It is established experimentally that the increasing the length of the sample and the applied load decreased bending stiffness of corrugated board. The greatest impact of the sample length affects at the low values of the applied load and the effect of the applied load – at a small length of the sample. It is found that the anisotropy of bending stiffness of corrugated board of the low grade T22 (2.7...3.1) was higher than that of the high grade T25 (2.5...2.7). The anisotropy of bending stiffness decreases with the increasing of the sample length. For the accurate and reliable measurement the length of the test sample of corrugated board should be at least 200 mm, as in this case the influence of other factors almost has no effect. The magnitude of the applied load depends on the brand of corrugated board and should be within the range from 120...220 grams. The results can improve the accuracy of the assessment of corrugated board quality and provide a more reliable prediction of the properties of the corrugated boxes.

Keywords: corrugated board, bending, bending resistance, bending stiffness.

REFERENCES

1. *GOST 7376–89. Karton gofirovanny. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 7376-89. Corrugated Board. General Specifications]. Moscow, 1991.
2. Kazakov Ya.V., Gur'ev A.V., Komarov V.I., Kryzhanovskiy A.O. Zhuravleva A.N. Zhestkost' pri izgibe gofrokartona [Bending Stiffness of Corrugated Board]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Board], 2006, no. 6, pp. 50–52.
3. Komarov V.I. Deformativnost' tsellyulozno-bumazhnykh materialov pri izgibe [Strain Capacity of Pulp and Paper Materials under Bending]. *Lesnoy zhurnal*, 1994, no. 1, pp. 96–103.
4. Komarov V.I. Zhestkost' pri izgibe tsellyulozno-bumazhnykh materialov. Analiz metodov izmereniya i vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov [Bending Stiffness of Pulp and Paper Materials. Analysis of the Measuring Methods and the Impact of Technological Factors]. *Lesnoy zhurnal*, 1994, no. 3, pp. 133–142.
5. Komarov V.I., Gur'ev A.V., El'kin V.P. *Mekhanika deformirovaniya tsellyuloznykh taroupakovochnykh materialov* [Mechanics of Deformation of Cellulose Packaging Materials]. Arkhangelsk, 2002. 175 p.
6. Komarov V.I., Larina E.Yu. Raschet zhestkosti pri izgibe voloknistykh tsellyulozno-bumazhnykh materialov s uchetom plasticheskoy deformatsii v szhatoy zone v ploskosti lista [Calculation of the Bending Stiffness of Fibrous Pulp and Paper Materials with Regard to Plastic Deformation in the Compression Region in the Sheet Plane]. *Lesnoy zhurnal*, 2009, no. 4, pp. 106–110.
7. Larina E.Yu., Komarov V.I. Vliyanie plasticheskikh deformatsiy po tolshchine i v ploskosti lista, vznikayushchikh pri ispytanii na izgib, na velichinu izmeryaemoy kharakteristiki [Effect of Plastic Deformation in Thickness and Paper Sheet Plane Occurring in Bending on Measured Parameter Value]. *Lesnoy zhurnal*, 2010, no. 4, pp. 89–95.

8. *L&W 4-Point Bending Stiffness Tester. Manual.* Available at: <http://l-w.com/produkt/lw-4-point-bending-stiffness-tester>.
9. Smolin A.S., Komarov V.I., Dubovyy V.K., Beloglazov V.I. *Tekhnologiya go-frokartona. Chast' 1* [Technology of Corrugated Board. Part I]. Saint Petersburg, 2014. 146 p.
10. Blechschmidt J. *Papierverarbeitungstechnik.* Dresden, 2012. 576 p.
11. Markstrom H. *Testing Methods and Instruments for Corrugated Board.* Elanders Tofters AB, 1999. 103 p.

Received on May 13, 2015

УДК 541.124

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.167

АНАЛИЗ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ДРЕВЕСНОГО БИОТОПЛИВА СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© *П.А. Марьяндышев, инж.*

А.А. Чернов, асп.

В.К. Любов, д-р техн. наук, проф.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: p.marjandishev@narfu.ru, chernov.ksandr@gmail.com, vk.lubov@mail.ru

Биотопливо является самым древним видом топлива, однако проблема его эффективного энергетического использования до сих пор остается актуальной во всем мире. Северо-Западный регион обладает огромными запасами древесины, поэтому для него наиболее важным является максимально эффективно использовать древесную биомассу в различных направлениях хозяйственной деятельности. Вовлечение в топливно-энергетический баланс древесного биотоплива позволяет уменьшить негативное влияние объектов энергетики на окружающую среду и сохранить потенциал невозобновляемых видов топлива для будущих поколений. В последнее время особый интерес вызывают исследования, направленные на изучение эффективности использования древесного биотоплива. Целью работы являлось исследование процесса термического разложения древесного биотоплива различных пород и определение кинетических характеристик процесса на основе термогравиметрических данных. Биотопливо разных пород древесины было собрано в Архангельской области. Исследования проводились как в инертной, так и окислительной средах при изменении температуры от 20 до 1300 °С и скорости нагрева 5, 10 и 20 °С/мин. Кинетический анализ был проведен в рамках термического разложения холоцеллюлозы различных видов биотоплива при использовании термогравиметрических данных, основанных на моделях Фридмана и Озава–Флинн–Уолла. Проведенные эксперименты позволили определить температурные диапазоны и скорость изменения массы древесного биотоплива при выходе летучих веществ, а также кинетические параметры, характеризующие этот процесс. Результаты выполненных исследований следует использовать при расчетах процессов и установок, связанных с термической подготовкой, энерготехнологической переработкой или сжиганием различных видов биотоплива.

Ключевые слова: древесная биомасса, термический анализ, термогравиметрический анализ, синхронный термоанализатор, термический эффект, кинетика, энергия активации, предэкспоненциальный множитель.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития энергетики является использование возобновляемых источников энергии. К таким источникам относится древесная биомасса. Для регионов с развитым лесопромышленным

комплексом это перспективное решение, позволяющее обеспечить их энергетическую независимость. Кроме того, применение древесных отходов в энергетике позволяет утилизировать побочные продукты лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, получать более дешевую энергию, снижать вредное воздействие на окружающую среду и др. [1–3, 5, 33].

Термогравиметрический (ТГ) и дифференциально-термогравиметрический (ДТГ) анализы позволяют изучать процессы термического разложения и получать при этом достаточно точные данные. Кинетические данные, полученные на основе ТГ анализа, необходимы не только для понимания процесса термического разложения и его механизмов, но и являются входными параметрами системы реакций, описывающих его [12, 32, 33].

Для повышения эффективности энергетического использования биомассы необходимо исследовать процессы, происходящие при ее термическом разложении. Поэтому в качестве объектов исследований были выбраны биотоплива из разных древесных пород. Береза, ель, сосна, древесные гранулы (пеллеты) из ели были исследованы методом термогравиметрии с последующим определением их кинетических характеристик. Дуб, кора дуба, осина, кора сосны, сухостой и гранулы из сосны и березы были исследованы только ТГ методом.

Производя сравнение теплофизических и кинетических характеристик различных видов древесного топлива можно выбрать топливо, обеспечивающее максимальные технико-экономические показатели его энергетического использования. Методы термического анализа позволяют получить данную информацию простым и быстрым путем [6, 8, 9, 11].

Ранее на основе ТГ (ДТГ) анализов и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) были определены распределение и соотношение продуктов реакций термического разложения исследуемых биотоплив, описаны процессы фазовых превращений, происходящих в биотопливе из разных древесных пород в определенных диапазонах температур [25].

Кинетический анализ различных физических и химических превращений стал иметь наиболее эффективное практическое применение с использованием методов термического анализа, основанных на зависимости скорости реакции от температуры (T), степени превращения/разложения (α) и времени (t) [28–30]. Для определения кинетических параметров, таких как энергия активации, порядок реакции и степень превращения, было предложено несколько математических моделей [7, 10].

Методы исследования

Образцы биотоплива разных пород древесины были собраны в Архангельской области. Пеллеты производятся в ЗАО «Лесозавод 25» (г. Архангельск) которое является крупным производителем пиломатериалов и гранулированного топлива из побочных продуктов распиловки. Годовой объем

производства гранулированного топлива – 75 тыс. т. В основном пеллеты производятся из хвойных (ель, сосна) пород древесины, преобладающих в Северо-Западном регионе РФ.

В лаборатории кафедры теплоэнергетики и теплотехники САФУ имени М.В. Ломоносова был произведен теплотехнический анализ собранных образцов. Влажность, зольность и выход летучих веществ определяли, используя стандартные методики и оборудование лаборатории термохимического анализа, теплотворную способность – на калориметре ИКА С 2000 Basic Version 2. Результаты теплотехнического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплотехнические характеристики испытываемых образцов

Образец	Влажность W^a , %	Зольность A^a , %	Выход летучих веществ V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания на горючую массу Q_{is}^{daf} , МДж/кг
Сосна	14,6	0,41	85,3	19,1
Ель	13,9	0,33	83,2	18,8
Осина	13,8	0,61	85,9	18,2
Береза	7,5	0,46	85,3	18,3
Дуб	7,2	0,30	85,3	17,9
Сухостой	7,4	0,31	85,5	18,9
Пеллеты:				
сосна	8,1	0,43	85,1	19,1
береза	8,5	0,44	84,9	18,3
ель	6,7	0,35	84,6	17,4
Кора:				
сосна	8,9	1,05	80,8	21,8
дуб	10,7	5,01	76,7	19,2

Предварительно экспериментальные образцы были подвергнуты размолу в шаровой барабанной мельнице РМ 200 фирмы «Retzsch», просеяны на ситовом анализаторе Retzsch AS 200 Control. Для экспериментов использовали фракцию 63...125 мкм. Средняя масса образца для наполнения тигля, устанавливаемого в калориметр, – 5 мг. Каждую фракцию исследуемого материала подвергали термической обработке (температура 20...1300 °С; среда – инертный газ аргон Ar (расход газа – 20 см³/мин) и воздух). При температурах выше 1300 °С процесс термоллиза можно считать практически законченным. Дополнительной сушке образцы не подвергали.

Кинетические характеристики определяли на основе ТГ данных при трех разных скоростях нагрева: 5, 10 и 20 °С/мин.

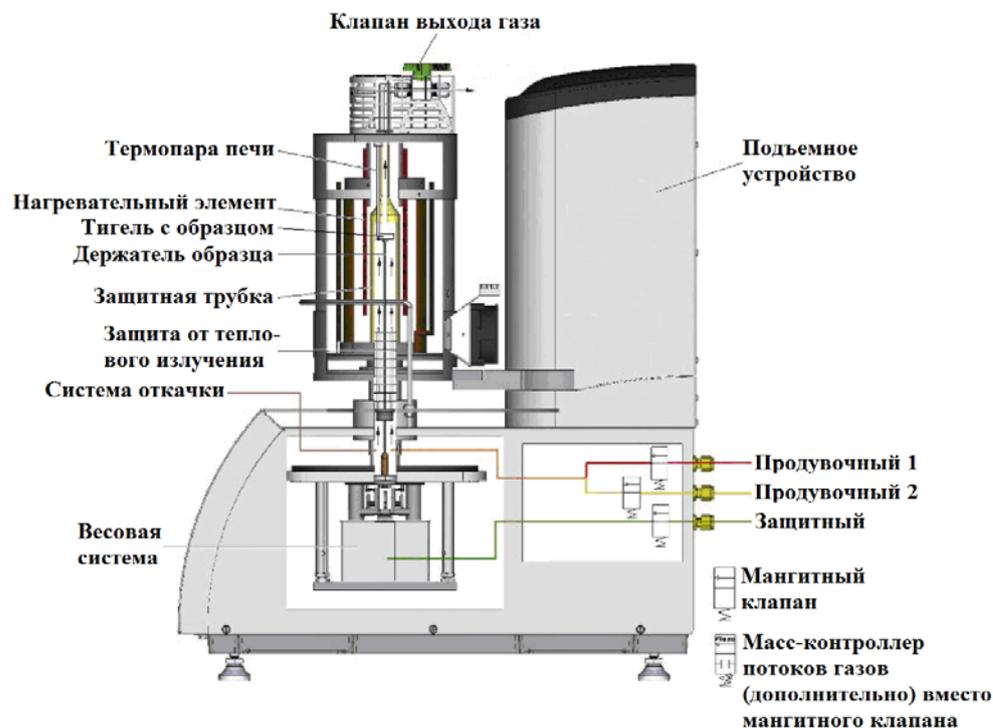


Рис. 1. Схема синхронного термоанализатора STA 449 F3 Jupiter

Экспериментальные исследования проводили на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter, выпускаемом фирмой «Netzsch Gerätebau GmbH» (Германия) и работающем в интервале температур 20...1400 °С (рис.1) [34].

Термоанализатор работает под управлением программного пакета Proteus. Результатом термической обработки образцов являлись данные ТГ и ДСК анализов. Далее ТГ кривые импортировали в программное обеспечение Netzsch Thermokinetics 3, поставляемое совместно с установкой, где происходило определение кинетических параметров процесса выхода летучих веществ и были получены значения энергии активации в заданном диапазоне температур для процесса выхода летучих веществ.

Результаты исследования и их обсуждение

Результатом термогравиметрического исследования являются ТГ, ДТГ и ДСК кривые, иллюстрирующие убыль и скорость убыли массы от температуры, а также тепловые эффекты протекающих реакций. Полученные данные приведены в табл. 2, ТГ и ДСК кривые в воздушной и инертной средах – на рис. 2 (для более удобного сравнения полученных результатов они представлены на одном графике).

Таблица 2

**Результаты комплексного термического анализа твердого биотоплива
в воздушной и инертной средах**

Исследуемый образец	Температурные диапазоны, °С			
	Сушка		Выход летучих	
	Воздух	Аг	Воздух	Аг
Сосна	20...96	20...120	215...344 (332)	224...378 (355)
Ель	20...92	20...120	210...340 (330)	221...377 (356)
Осина	20...91	20...120	209...345 (324)	222...369 (348)
Дуб	20...104	20...118	201...341 (322)	215...367 (349)
Сухостойная древесина сосны	20...117	20...122	204...345 (319)	217...379 (365)
Пеллеты:				
сосна	20...93	20...123	204...349 (331)	219...381 (357)
береза	20...105	20...119	206...343 (330)	214...381 (362)
Кора				
береза	20...93	20...116	209...349 (328)	219...377 (364)
дуб	20...102	20...114	205...348 (276)	210...366 (292)
сосна	20...118	20...125	212...339 (315)	222...366 (332)

Примечание. В скобках указана температура, соответствующая максимальной скорости выхода летучих.

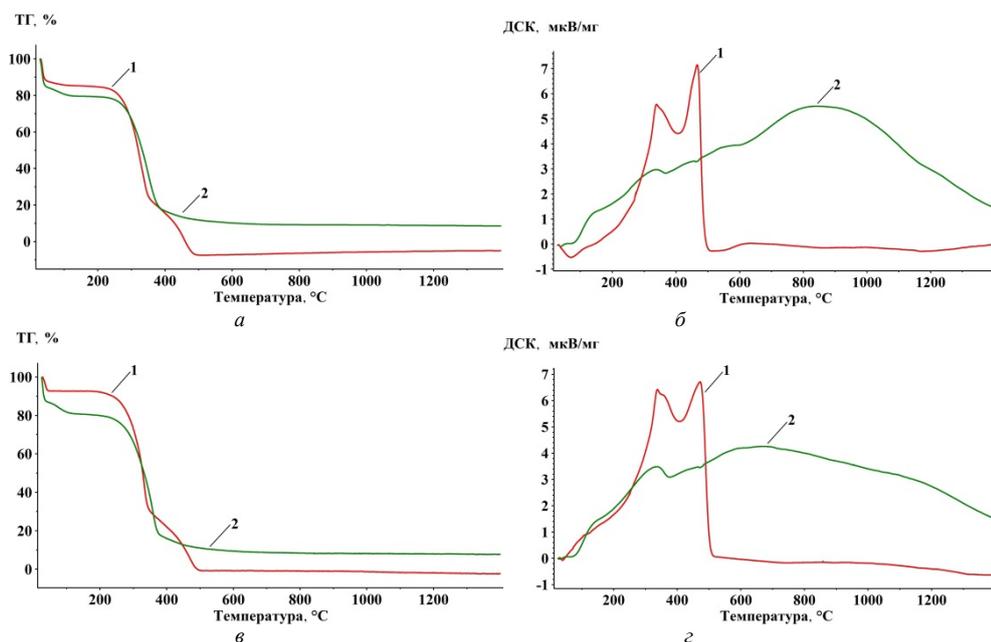


Рис. 2. Кривые ТГ (а, в) и ДСК (б, г) для образцов сухой древесины сосны (а, б) и пеллет из сосны (в, г): 1 – воздушная среда; 2 – инертная среда

Состав газовой фазы над образцом играет очень важную роль в термическом поведении материала. Атмосфера, окружающая и заполняющая образец, может оказывать теплофизическое, термодинамическое и химическое воздействие. Под теплофизическим воздействием понимают изменение формы кривых ДСК вследствие различной теплопроводности газов, окружающих образец. Установлено, что наличие высокотеплопроводящего инертного газа Ar в порах исследуемого вещества интенсифицирует процессы теплопередачи в образце, уменьшает амплитуду пика кривой ДСК. Сильное влияние оказывает газ, способный вступать в химическое взаимодействие с исследуемым образцом [4].

Древесина состоит из ряда сложных высокомолекулярных соединений, основными из которых являются целлюлоза (33...50 % от массы абс. сухой древесины), лигнин (20...30 %), гемицеллюлозы (14...27 %) [14]. Целлюлоза – природный полимер, полисахарид имеющий длинные цепные молекулы, пучки которых – микрофибриллы, образуют каркас стенки клетки. Гемицеллюлозы – также природные полисахариды, но с гораздо более короткими цепями. Лигнин – природный ароматический полимер (полифенол), определяющий способность одревесневевших клеток сопротивляться изменению формы и размеров древесины [15, 31].

Основываясь на ДТГ анализе (рис. 3), была изучена динамика процесса термического разложения биотоплива. Определены температуры, при которых происходят изменения скорости убыли массы. Максимальные ее значения на ДТГ кривой иллюстрируются экстремумом.

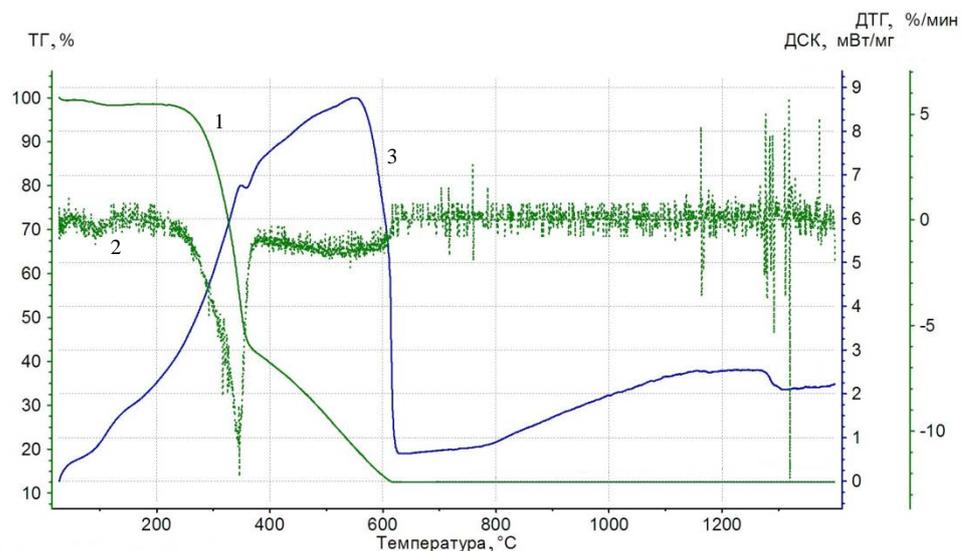


Рис. 3. Результаты ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) анализов древесных гранул (пеллет) из ели при скорости нагрева 10 °С/мин в среде Ar

Начальную фазу (*испарение влаги*) и продолжительность процесса сушки определяли по ТГ и ДТГ кривым (рис. 3). Ввиду низкой влажности исследуемых образцов процесс испарения влаги на ТГ и ДТГ кривых не имеет ярко выраженных пиков. Данный процесс для изученных видов топлива происходит при температуре от 20 до 125 °С. В зависимости от породы древесины и газовой среды конечная температура процесса сушки варьировалась в пределах от 100 до 125 °С. Изменение массы образца в начальной стадии незначительно.

Следующая стадия, оказывающая большое влияние на процесс термического разложения (*выход летучих веществ*), происходит в диапазоне температур от 200 до 500 °С. Максимальная скорость выхода летучих веществ в зависимости от породы биотоплива отмечена при температуре 300...365 °С. Это объясняется полным разложением основных высокомолекулярных соединений (гемицеллюлозы, целлюлозы) и частичным разложением лигнина. Известно, что гемицеллюлозы являются гетерополисахаридами. В диапазоне выхода летучих веществ гемицеллюлозы лиственных пород древесины реагируют быстрее, чем хвойных. Основная потеря массы происходит на данной стадии и является результатом процесса разложения оставшегося лигнина.

Последняя стадия процесса термического разложения и горения биотоплива в воздушной среде (*выгорание коксового остатка*) характеризуется очень незначительным изменением массы образца.

Процентное содержание коксового остатка при проведении опытов в среде аргона, где конечная температура пиролиза была примерно 1300 °С, определяются по ТГ кривой. Анализ ТГ кривых (рис. 3) показал, что начало процесса формирования коксового остатка для разных пород древесины начинается при температуре 480...520 °С.

При переходе от воздушной к инертной среде температурные стадии процессов сушки и выхода летучих смещаются в зону более высоких температур [24, 26]. Температура максимальной скорости выхода летучих веществ при переходе от воздушной к инертной среде возрастает.

Результаты ТГ исследований показали, что при переходе от инертной к воздушной среде кривая ТГ смещается в зону меньших температур. Масса образца при сушке в инертной среде изменяется с меньшей скоростью и протекает дольше, чем в воздушной среде. В диапазоне температур 250...450 °С кривая ТГ для воздушной среды имеет два характерных излома, эта же кривая в инертной среде имеет один излом.

Анализ кривых ДСК показал, что при переходе от инертной к воздушной среде амплитуда пика кривой ДСК увеличивается. Кроме того, происходит смещение пика ДСК в зону более низких температур.

Для определения таких кинетических параметров, как энергия активации, порядок реакции и степень превращения, были предложены [7] математические модели, реализуемые на основе ТГ данных.

В этой работе кинетический анализ проведен на основе термогравиметрических данных разложения холоцеллюлозы различных видов биотоплива с использованием математических моделей Фридмана и Озава–Флинн–Уолла (ОФУ) [16–22]. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты кинетического исследования стволовой древесины и пеллет

α , %	Фридман				ОФУ			
	Воздух		Аргон		Воздух		Аргон	
	E , кДж/моль	$\log A$, 1/с						
<i>Древесина сосны</i>								
5	164	13	156	12	142	11	136	10
10	174	14	181	14	156	12	162	12
20	173	13	185	14	166	13	183	14
30	178	14	196	15	169	13	191	15
40	174	13	197	15	173	13	198	15
50	157	12	202	15	171	13	203	15
60	155	12	207	15	167	13	207	16
70	150	11	205	15	163	12	212	16
80	135	10	201	15	158	12	213	16
90	146	11	195	14	154	12	212	16
Среднее значение	160	12	192	14	162	12	192	14
<i>Древесина березы</i>								
5	308	27	211	17	349	31	194	16
10	278	24	202	16	306	27	197	16
20	273	23	213	17	277	24	204	16
30	286	24	235	18	276	24	222	18
40	300	25	236	18	287	24	234	19
50	248	20	239	18	296	25	238	19
60	244	20	238	18	285	24	242	19
70	234	19	229	17	270	22	239	18
80	214	17	211	16	258	21	232	18
90	236	19	203	15	249	20	225	17
Среднее значение	262	22	222	17	283	24	223	17
<i>Древесина ели</i>								
5	179	14	267	23	133	10	290	25
10	186	15	248	20	162	13	257	21
20	193	15	240	19	182	15	245	20
30	198	16	228	18	189	15	240	19
40	188	15	224	17	192	15	236	18
50	188	15	228	17	193	15	235	18

Окончание табл. 3

α , %	Фридман				ОФУ			
	Воздух		Аргон		Воздух		Аргон	
	E , кДж/моль	$\log A$, 1/с						
60	175	13	223	17	190	15	233	18
70	159	12	206	15	185	14	228	17
80	143	11	205	15	179	14	224	17
90	133	10	210	16	172	13	221	17
Среднее значение	174	14	228	18	178	14	241	19

Пеллеты из ели

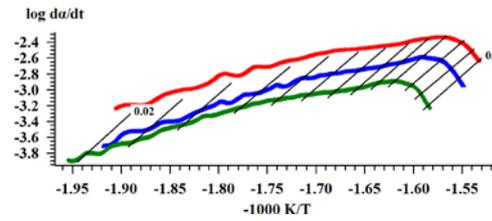
5	232	20	143	11	204	17	108	7
10	222	18	147	11	216	18	120	8
20	228	18	165	12	219	18	136	10
30	199	16	162	12	216	17	146	11
40	200	16	159	11	213	17	151	11
50	189	14	169	12	209	16	155	11
60	176	13	156	11	203	16	154	11
70	165	12	151	11	195	15	156	11
80	155	12	150	11	187	14	153	11
90	158	12	174	13	181	14	155	11
Среднее значение	192	15	158	11	204	16	143	10

Примечание. α – степень превращения исходного образца; E – энергия активации.

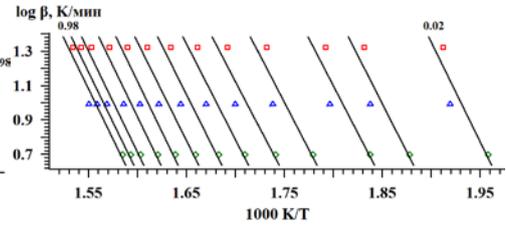
Из данных табл. 3 видно, что наибольшее значение энергии активации имеет древесное топливо из березы 228 кДж/моль. Поэтому можно сделать вывод, что это топливо требует больше энергии для разложения гемицеллюлозы и целлюлозы. Энергии активации для ели и березы близки по значению, что указывает на сходство теплофизических свойств этих биотоплив. Значение энергии активации еловых пеллет значительно меньше, чем у древесного топлива из ели и березы, что свидетельствует о более слабых межмолекулярных связях.

Сравнивая расчеты термической деструкции различных видов биотоплива можно утверждать, что энергия активации углей и биотоплива различна при одинаковых степенях разложения. Например, средняя энергии активации для биотоплива находится в диапазоне 200...250 кДж/моль. Согласно [34], для высокорекреационного пламенного угля этот показатель находится в диапазоне 300...320 кДж/моль. Таким образом, по сравнению с биотопливом для разрушения молекулярных связей в угле требуется больше энергии.

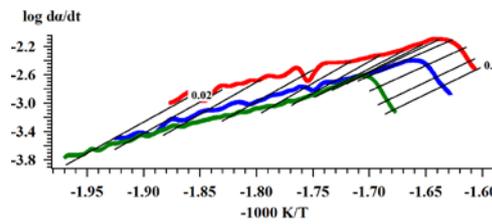
Сосна (аргон)



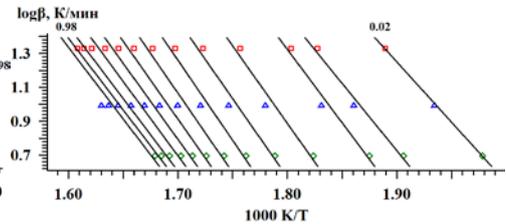
Сосна (аргон)



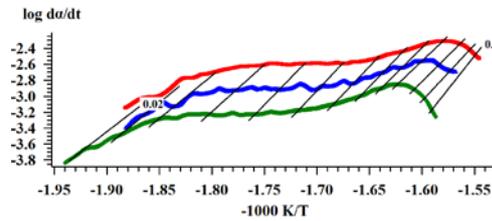
Сосна (воздух)



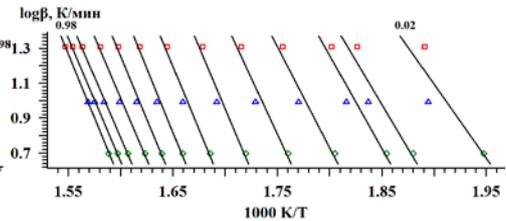
Сосна (воздух)



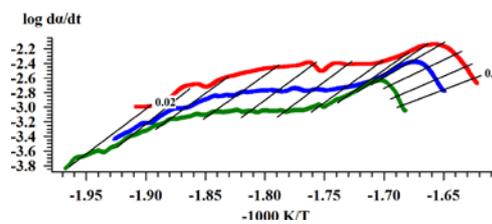
Береза (аргон)



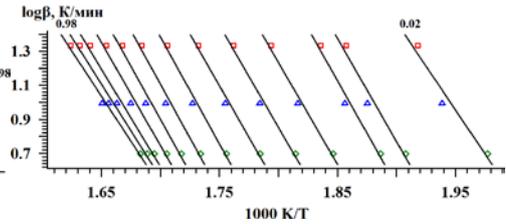
Береза (аргон)



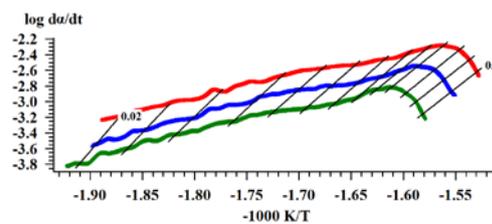
Береза (воздух)



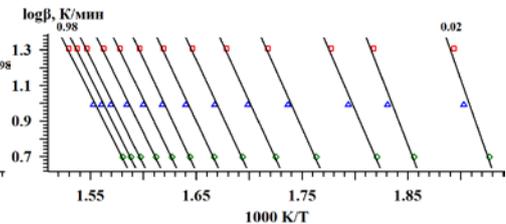
Береза (воздух)



Ель (аргон)



Ель (аргон)



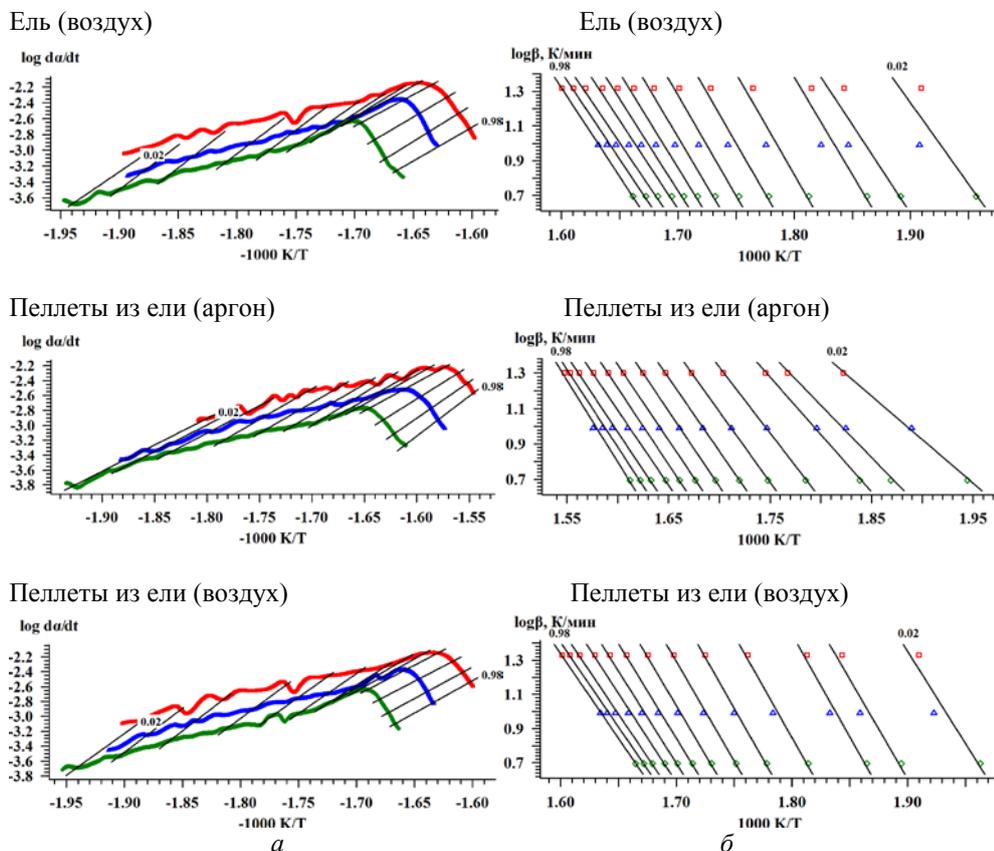


Рис. 4. Результаты кинетического исследования на основе моделей Фридмана (а) и Озава-Флинн–Уолла (б): красный цвет – при скорости нагрева 20 °С/мин; синий – 10 °С/мин; зеленый – 5 °С/мин

Из рис. 4 видно, что на графиках, полученных с использованием модели Фридмана, наклон экспериментальных кривых в начале реакции (при $0,02 < \alpha < 0,1$) меньше, чем наклон линий равной степени разложения для последующих реакций ($0,2 < \alpha < 0,98$). Это указывает на наличие первоначальных реакций 1-, 2- или 3-го порядков и подтверждает интенсивность протекания процесса диффузии.

Интегральные методы ОФУ используют максимум информации из термических кривых и дают зависимость энергии активации от степени разложения. В методическом подходе ОФУ для анализа берется набор точек с одинаковой степенью разложения (отношение заданной площади пика к полной) и на графике Аррениуса получается серия из нескольких прямых, характеризующая своей энергией активации (рис. 4). Недостатком приведенного метода является невозможность описания изотермических (с нулевой скоростью нагревания) процессов, поскольку ось ординат на графике Аррениуса представляет собой логарифм скорости нагрева.

В методическом подходе Фридмана для построения набора прямых с одинаковой степенью разложения используется модифицированный график в координатах логарифм скорости реакции–обратная температура (рис. 4). Каждая группа параллельных прямых соответствует одной стадии с постоянным значением энергии активации.

Таким образом, при использовании разных методов энергия активации и предэкспоненциальный множитель имеют близкие значения. Основываясь на [13, 16, 23, 27], можно сделать вывод о достоверности полученных данных.

Заключение

1. Определены температурные диапазоны и скорость изменения массы древесного топлива при протекании процессов испарения влаги и выхода летучих веществ. Эксперименты проведены при разной скорости нагрева испытуемых образцов.

2. Наибольшая энергия активации (228 кДж/моль) определена у древесины березы.

3. Результаты выполненных исследований можно использовать при расчетах процессов и установок, связанных с термической подготовкой, энерготехнологической переработкой или сжиганием различных биотоплив, а также при проведении режимно-наладочных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во САФУ, 2010. 496 с.
2. Режим доступа: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/produkty-reshenija/termogravimetricheskii-analiz/tg-449-f3-jupiter.html>. 11.02. 2014).
3. Семенов Ю.П., Хиллинг Б., Парикка М., Штерн Т., Любов В.К. Лесная биоэнергетика. М.: МГУЛ, 2008. 348 с.
4. Синева С.И., Старых Р.В. Влияние экспериментальных факторов на результаты определения температур фазовых превращений методом термического анализа (обобщающая статья). СПб.: Ин-т «Гипроникель», 2009. 7 с.
5. Юрьев Ю.Л. Древесный уголь. Екатеринбург: Изд-во «Сократ», 2007. 184 с.
6. Biello D. The false promise of biofuels // *Sci. Am.* 2011. N 305. P. 58–65.
7. Braga R.M., Melo D.M.A., Aquino F.M. Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass // *J. of thermal analysis and calorimetry.* 2013. N 11.
8. Doyle C.D. Kinetic analysis of thermogravimetric data // *J. Appl. Polym. Sci.* 1962. N 5. P. 285–292.
9. Gonzalez J.F., Encinar J.M., Canito J.L., Sabio E., Chacon M. Pyrolysis of cherry stones: energy use of the different fractions and kinetic study // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2003. N 57. P. 65–190.
10. Guozhan J., Nowakowski D.J., Bridgwater A.V. A systematic study of the kinetics of lignin pyrolysis // *Thermochim. Acta.* 2010. N 498. P.61–66.
11. Ishi H., Fukui K., Takeno K. Biomass gasification and methanol synthesis system // *Proceeding of ICOPE-03.* 2003.

12. *Lili Li, Gang Wang, Shaoyu Wang, Song Qin.* Thermogravimetric and kinetic analysis of energy crop Jerusalem artichoke using distributed activation energy model // *J. of thermal analysis and calorimetry.* 2013. N 3.
13. *Macedo C.P., Negrao C.A.B., Macedo L.G.M., Zamian J.R., Rocha Filho G.N., Costa C.E.F.* Kinetic study of template removal of Al-MCM-41 synthesized at room temperature // *J. of thermal analysis and calorimetry.* 2013.
14. *Matsumoto K., Takeno K., Ichinose T., Ishii H., Nishimura K.* Development of a 2 ton/day test plant for total operation study of woody biomass gasification and liquid fuel synthesis // *Proceeding of the 15th Euro biomass conference and exhibition.* 2007. P. 1945–1950.
15. *Milne T.A., Agblevor F., Davis M., Deutch S., Johnson D.* A review of the chemical composition of fast-pyrolysis oils from biomass // *Developments in thermochemical biomass conversion.* Vol. 1 / A.V. Bridgwater, D.G.V. Boocock, editor. London: Blackie A&P, 1997. P. 409–424.
16. *Miura K.* A new and simple method to estimate $f(E)$ and $k_0(E)$ in the distributed activation energy model from three sets of experimental data // *Energy Fuel.* 1995. N 9. P. 302–307.
17. *Mui E.L.K., Cheung W.H., Lee V.K.C., McKay G.* Kinetic study on bamboo pyrolysis // *Eng. Chem. Res.* 2008. N 47. P. 5710–5722.
18. *Ogi T., Kawamura A., Nakanashi M., Inoue S.* Effects of woody biomass variety on gasification in an entrained gasifier // *Proceedings of IAWPS2005.* 2005. Vol. 2. P. 257–258.
19. *Ogi T., Nakanashi M., Fukuda Y.* Gasification of empty fruit bunch and bagasse using an entrained-flow mode reactor // *J. Jpn. Inst. Energy.* 2011. N 90. P. 886–894.
20. *Ogi T., Nakanashi M.* Gasification of Japanese cedar (*cryptomeria japonica*) bark in an entrained gasifier // *Renew Energy.* 2006. N 1. P. 1050–1054.
21. *Ogi T., Nakanashi M., Inoue S.* Gasification of biomass in a small-scale entrained gasifier: gasification of Japanese cedar and Italian ryegrass // *Proceeding of the 8th Japan-China symposium on coal and C1 chemistry.* 2003. Vol. 1. P. 227–228.
22. *Ogi T., Nakanashi M., Inoue S.* Gasification of woody and herbaceous biomass in a small-scale entrained gasifier: comparison of Japanese cedar and Italian ryegrass // *Science in thermal and chemical biomass conversion.* 2005. Vol. 1. P. 620–630.
23. *Oliveira L.E., Giordani D.S., Paiva E.M.* Kinetic and thermodynamic parameters of volatilization of biodiesel from babassu, palm oil and mineral diesel by thermogravimetric analysis (TG) // *J. Therm. Anal. Calorimetry.* 2013.
24. *Pasa V.M.D., Carazza F., Otani C.* Wood tar pitch: analysis and conceptual model of its structure // *Developments in thermochemical biomass conversion / A.V. Bridgwater, D.G.V. Boocock, editor.* London: Blackie A&P, 1997. Vol. 1. P. 448–461.
25. *Poskrobko S., Krol D.* Thermogravimetric research of dry decomposition // *J. of thermal analysis and calorimetry.* 2012. N 10.
26. *Shen D.K., Gu S., Jin B.S., Fang M.X.* Thermal degradation mechanisms of wood inert and oxidative environments using DAEM methods // *Bioresource Technology.* 2011. N 102. P. 2047–2052.
27. *Souza M.J.B., Araujo A.S., Pedrosa A.M.G., Lima S.H., Fernande V.J.Jr.* Kinetic parameters of surfactant remotion occluded in the pores of the AIMCM-41 nanostructured materials // *Thermochim. Acta.* 2006. N 443. P. 183–188.
28. *Vyazovkin S.* A unified approach to kinetic processing of non-isothermal data // *J. Chem. Kinet.* 1996. N 28. P. 95–101.

29. Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Perez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // *Thermochim. Acta*. 2011. N 520. P. 1–19.

30. Vyazovkin S., Wight C.A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data // *Thermochim. Acta*. 1999. P. 53–68; 340–341.

31. Wang G., Li W., Li B.Q., Chen H.K. TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas // *Energy Fuel*. 2008. N 87. P. 552–558.

32. Wehlte S., Meier D., Moltran J., Faix O. The impact of wood preservatives on the flash pyrolysis of biomass // *Developments in thermochemical biomass conversion*. Vol. 1 / A.V. Bridgwater, D.G/B. Boocock. London: Blackie A&P, 1997. P. 206–219.

33. Williams A., Jones J.M., Ma L., Pourkashanian M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012. N 38. P. 113–137.

34. Zhengqi Li, Chunlong Liu, Zhichao Chen, Juan Qian, Wei Zhao, Qunyi Zhu. Analysis of coals and biomass pyrolysis using the distributed activation energy model // *Bioresource Technology*. 2013.

Поступила 05.11.15

UDC 541.124

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.167

Thermogravimetric and Kinetic Data Analysis of Wood Biofuels in the North-Western Region of the Russian Federation

P.A. Mar'yandyshev, Engineer

A.A. Chernov, Postgraduate Student

V.K. Lyubov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya

Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail:

p.marjyandishev@narfu.ru, chernov.ksandr@gmail.com, vk.lubov@mail.ru

Biofuel is the most ancient type of fuel, but the problem of its efficient energetical use remains relevant throughout the world. The northwest region has the huge reserves of wood, so it is very important to maximize the use of woody biomass in various areas of economic activity. Involvement of biofuels in the fuel and energy balance reduces the negative impact of the energy facilities on the environment and keeps the potential of non-renewable fuels for the future generations. Recently, the studies of the efficiency of wood biofuel usage are of very special interest. The purpose of the paper is to study the thermal decomposition of wood biofuels and to determine kinetic characteristics of the process on the basis of thermogravimetric data. Biofuels were collected in the Arkhangelsk region. The studies were carried out in the inert and oxidizing environments at the temperature range from 20...1300 °C and a heating rate of 5, 10 and 20 °C/min. Kinetic analysis was conducted in the framework of thermal decomposition of holocellulose of biofuels using the thermogravimetric data based on the Friedman and Ozawa-Flynn-Wall models. The experiments allowed us to determine the temperature range and the rate of change in weight of wood biofuel at volatile yield and kinetic parameters characterizing this process. The results of the studies should be used in the calculation of processes and systems of thermal treating, energy-technological fuel reprocessing or multifuel burning.

Keywords: wood biomass, thermal analysis, thermogravimetric analysis, synchronous thermal analyzer, thermal effect, kinetics, activation energy, preexponential factor.

REFERENCES

1. Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniya biotopliv* [Biofuels Utilization Efficiency Improvement]. Arkhangelsk, 2010. 496 p.
2. *Fascinating Flexibility in Thermal Analysis*. Available at: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/produkty-reshenija/termogravimetricheskii-analiz/tg-449-f3-jupiter.html> (accessed 11.02. 2014).
3. Semenov Yu.P., Khillring B., Parikka M., Shtern T., Lyubov V.K. *Lesnaya bioenergetika* [Forest Bioenergy]. Moscow, 2008. 348 p.
4. Sineva S.I., Starykh R.V. *Vliyanie eksperimental'nykh faktorov na rezul'taty opredeleniya temperatur fazovykh prevrashcheniy metodom termicheskogo analiza* [Influence of the Experimental Factors on the Results of the Temperature Definition of Phase Conversion by Thermal Analysis]. Saint Petersburg, 2009. 7 p.
5. Yur'ev Yu.L. *Drevesnyy ugol'* [Charcoal]. Yekaterinburg, 2007. 184 p.
6. Biello D. The False Promise of Biofuels. *Sci. Am.*, 2011, no. 305, pp. 58–65.
7. Braga M.R., Melo M.A.D., Aquino M.F. Characterization and Comparative Study of Pyrolysis Kinetics of the Rice Husk and the Elephant Grass. *J. Therm. Anal. Calorimetry*, 2013, no. 11.
8. Doyle C.D. Kinetic Analysis of Thermogravimetric Data. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1961, vol. 5, pp. 285–292.
9. Gonzalez J.F., Encinar J.M., Canito J.L., Sabio E., Chacon M. Pyrolysis of Cherry Stones: Energy Use of the Different Fractions and Kinetic Study. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2003, vol. 57, pp. 165–190.
10. Guozhan J., Nowakowski D.J., Bridgwater A.V. A Systematic Study of the Kinetics of Lignin Pyrolysis. *Thermochim. Acta*, 2010, vol. 498, pp. 61–66.
11. Ishi H., Fukui K., Takeno K. Biomass Gasification and Methanol Synthesis System. *Proc. of ICOPE-03*, 2003.
12. Lili Li, Gang Wang, Shaoyu Wang, Song Qin. Thermogravimetric and Kinetic Analysis of Energy Crop Jerusalem Artichoke Using Distributed Activation Energy Model. *J. Therm. Anal. Calorimetry*, 2013, no. 3.
13. Macedo C.P., Negrao C.A.B., Macedo L.G.M., Zamian J.R., Rocha Filho G.N., Costa C.E.F. Kinetic Study of Template Removal of Al-MCM-41 Synthesized at Room Temperature. *J. Therm. Anal. Calorimetry*, 2013. doi: 10.1007/s10973-013-3267-0.
14. Matsumoto K., Takeno K., Ichinose T., Ishii H., Nishimura K. Development of a 2 Ton/Day Test Plant for Total Operation Study of Woody Biomass Gasification and Liquid Fuel Synthesis. *Proc. of the 15th Euro Biomass Conference and Exhibition*, 2007, pp. 1945–1950.
15. Milne T.A., Agblevor F., Davis M., Deutch S., Johnson D. A Review of the Chemical Composition of Fast-Pyrolysis Oils from Biomass. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. Ed. by Bridgwater A.V., Boocock D.G.B. London, 1997, vol. 1, pp. 409–424.
16. Miura K. A New and Simple Method to Estimate F(E) and K0 (E) in the Distributed Activation Energy Model from Three Sets of Experimental Data. *Energy Fuel*, 1995, vol. 9, pp. 302–307.
17. Mui E.L.K., Cheung W.H., Lee V.K.C., McKay G. Kinetic Study on Bamboo Pyrolysis. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2008, vol. 47, pp. 5710–5722.
18. Ogi T., Kawamura A., Nakanashi M., Inoue S. Effects of Woody Biomass Variety on Gasification in an Entrained Gasifier. *Proc. of IAWPS2005*, 2005, vol. 2, pp. 257–258.

19. Ogi T., Nakanashi M., Fukuda Y. Gasification of Empty Fruit Bunch and Bagasse Using an Entrained-Flow Mode Reactor. *J. Jpn. Inst. Energy*, 2011, vol. 90, pp. 886–894.
20. Ogi T., Nakanashi M. Gasification of Japanese Cedar (*Cryptomeria Japonica*) Bark in an Entrained Gasifier. *Renew Energy*, 2006, vol. 1, pp. 1050–1054.
21. Ogi T., Nakanashi M., Inoue S. Gasification of Biomass in a Small-Scale Entrained Gasifier: Gasification of Japanese Cedar and Italian Ryegrass. *Proc. of the 8th Japan-China Symposium on Coal and C1 Chemistry*, 2003, vol. 1, pp. 227–228.
22. Ogi T., Nakanashi M., Inoue S. Gasification of Woody and Herbaceous Biomass in a Small-Scale Entrained Gasifier: Comparison of Japanese Cedar and Italian Ryegrass. *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, 2005, vol. 1, pp. 620–630.
23. Oliveira L.E., Giordani D.S., Paiva E.M. Kinetic and Thermodynamic Parameters of Volatilization of Biodiesel From Babassu, Palm Oil and Mineral Diesel by Thermogravimetric Analysis (TG). *J. Therm. Anal. Calorimetry*, 2013. doi 10.1007/s10973-011-2163-8.
24. Pasa V.M.D., Carazza F., Otani C. Wood Tar Pitch: Analysis and Conceptual Model of Its Structure. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. Ed. by Bridgwater A.V., Boocock D.G.B. London, 1997, vol. 1, pp. 448–461.
25. Poskrobko S., Krol D. Thermogravimetric Research of Dry Decomposition. *J. Therm. Anal. Calorimetry*, 2012, no. 10.
26. Shen D.K., Gu S., Jin B.S., Fang M.X. Thermal Degradation Mechanisms of Wood Inert and Oxidative Environments Using DAEM Methods. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, pp. 2047–2052.
27. Souza M.J.B., Araujo A.S., Pedrosa A.M.G., Lima S.H., Fernande V.J. Kinetic Parameters of Surfactant Remotion Occluded in the Pores of the AIMCM-41 Nanostructured Materials. *Thermochim. Acta*, 2006, vol. 443, pp. 183–188.
28. Vyazovkin S. A Unified Approach to Kinetic Processing of Non-Isothermal Data. *Int. J. Chem. Kinet.*, 1996, vol. 28, pp. 95–101.
29. Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Perez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC Kinetics Committee Recommendations for Performing Kinetic Computations on Thermal Analysis Data. *Thermochim. Acta*, 2011, vol. 520, pp. 1–19.
30. Vyazovkin S., Wight C.A. Model-Free and Model-Fitting Approaches to Kinetic Analysis of Isothermal and Nonisothermal Data. *Thermochim. Acta*, 1999, vol. 340–341, pp. 53–68.
31. Wang G., Li W., Li B.Q., Chen H.K. TG Study on Pyrolysis of Biomass and Its Three Components Under Syngas. *Fuel*, 2008, vol. 87, pp. 552–558.
32. Wehlte S., Meier D., Moltran J., Faix O. The Impact of Wood Preservatives on the Flash Pyrolysis of Biomass. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. Ed. by Bridgwater A.V., Boocock D.G.B. London, 1997, vol. 1, pp. 206–219.
33. Williams A., Jones J.M., Ma L., Pourkashanian M. Pollutants from the Combustion of Solid Biomass Fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, vol. 38, pp. 113–137.
34. Zhengqi L., Chunlong L., Zhichao Ch., Juan Q., Wei Zh., Qunyi Zh. Analysis of Coals and Biomass Pyrolysis Using the Distributed Activation Energy Model. *Bioresource Technology*, 2013.

Received on November 05, 2015



КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

УДК 630*161

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.183

**СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД
НА АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСНОЙ СЕЛЕКЦИИ**

© *Н.А. Бабич, д-р с.-х. наук, проф.*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.babich@narfu.ru

В Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии вышла в свет научная монография «Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Морфометрия и физиология хвои плюсовых деревьев». Ее авторы известные специалисты в области лесной селекции Н.Н. Бессчетнова и В.П. Бессчетнов. Представленный в работе материал является итогом теоретического обобщения результатов их многолетних исследований. Книга посвящена современному состоянию и перспективам развития селекции одного из важнейших видов древесных растений – сосны обыкновенной и содержит сведения о ее биологии, признаках, имеющих хозяйственное, адаптационное и идентификационное значение, которые весьма востребованы в настоящий момент. Большой интерес представляют морфометрические и физиологические характеристики листового аппарата, который во многом определяет режим фотосинтеза, продуктивность и адаптивность. В монографии рассматриваются все указанные вопросы, содержатся оценки наследственной обусловленности изменчивости многих признаков хвои плюсовых деревьев в составе лесосеменных плантаций и архивов клонов. В ней представлены результаты применения многомерных методов анализа (факторного и кластерного) линейных параметров и массы хвои, приведены данные о ее пигментном составе и вододерживающей способности. Эти признаки служат критериями адаптированности растений к неблагоприятным условиям среды, оценками степени соответствия их биологии ходу сезонных изменений погодных условий, показателями потенциально высоких темпов роста и накопления древесной массы. Также обсуждаются общие проблемы плюсовой селекции древесных пород, отмечается неоднозначность сложившейся ситуации, отсутствие единых подходов в ее трактовке, нерешенность многих задач.

Монография хорошо иллюстрирована фотографиями и диаграммами, включает в себя значительный объем таблиц с систематизированными статистическими данными. Она содержит корректные ссылки на большой перечень классических работ и современных публикаций отечественных и зарубежных

авторов, подтверждающих важность и своевременность решения обозначенных в монографии вопросов.

Рецензентами работы выступили ведущие специалисты в рассматриваемых в ней вопросах: заведующий кафедрой селекции, генетики и дендрологии Московского государственного университета леса, доктор сельскохозяйственных наук, профессор В.А. Брынцев; профессор кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна Башкирского государственного аграрного университета, заслуженный лесовод Республики Башкортостан, доктор сельскохозяйственных наук В.Ф. Коновалов; профессор кафедры земледелия и растениеводства Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, доктор сельскохозяйственных наук В.М. Лебедев.

Книга будет интересна специалистам в области лесной селекции, научным сотрудникам и преподавателям вузов, студентам и аспирантам.

UDC 630*161

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.183

The Current Concepts at the Topical Issues of Forest Breeding

N.A. Babich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

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



ЮБИЛЕИ

УДК 06.091

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.185

ЮБИЛЕЙ ЗНАТОКА СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

28 декабря 2015 г. исполняется 80 лет профессору кафедры лесоводства и почвоведения Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктору сельскохозяйственных наук, заслуженному лесоводу Российской Федерации Василию Фроловичу Цветкову.

Василий Фролович родился 28 декабря 1935 г. в деревне Решатиха Горьковской области и, как все дети его поколения, на себе испытал трудности военных лет и послевоенного лихолетья. После окончания школы поступил на лесохозяйственный факультет Архангельского лесотехнического института навсегда связав свою жизнь с лесным хозяйством России. После окончания института, с 1958 по 1961 гг. он работает лесничим Кумовского лесничества Горьковской области, затем переходит в созданный по инициативе И.С. Мелехова Мурманский стационар Архангельского института леса и лесохимии (АИЛ и ЛХ). Здесь, первоначально на ст. Имандра, а затем в г. Мончегорске Мурманской области, В.Ф. Цветков проработал 28 лет, пройдя путь от старшего лаборанта до заведующего стационаром.

Высокое трудолюбие и целеустремленность позволили В.Ф. Цветкову в 1971 г. подготовить и успешно защитить в Ленинградской лесотехнической академии диссертацию на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук на тему «Роль подроста сосны в формировании насаждений на вырубках Мурманской области», в 1988 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук на тему «Сосновые леса Кольской лесорастительной области и система ведения хозяйства в них».

После переезда в г. Архангельск Василий Фролович работает заместителем директора по науке АИЛ и ЛХ, затем переходит на преподавательскую работу в Архангельский лесотехнический институт, где он продолжил свои исследования по таежному и притундровому лесоведению и лесоводству, экологии леса, вопросам упорядочения и совершенствования лесопользования на Европейском Севере, охране окружающей среды, сохранению лесов, повышению эффективности природопользования, реабилитации нарушенных земель. Им разработано научное направление в области таежного лесоводства «типы формирования насаждений», развивающее идеи динамизма лесов и приемы

прогнозирования сценариев развития насаждений на основе закономерностей единого лесообразовательного процесса на таежных территориях.

В.Ф. Цветков принимал участие в реализации 6 международных проектов в рамках Европейского Союза и стран Баренцрегиона, а также в сотрудничестве с Финляндским институтом лесного хозяйства «METLA» и норвежским институтом «BIOFORSK». Он активный участник значительного количества международных и всероссийских конференций, а также более 30 экспедиций в различные регионы лесов Европейского Севера России.

По результатам научных исследований В.Ф. Цветковым опубликовано более 350 научных работ, в том числе 12 монографий и 4 учебных пособия. Такие монографии, как «Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них» (2002), «Лесовозобновление: Природа, закономерности, оценка, прогноз» (2008), «Промышленное загрязнение окружающей среды и лес» (2012), «Этюды экологии леса» (2009), «Лес в условиях аэротехногенного загрязнения» (2003) давно признаны специалистами классическими, а монография «Камо грядеши?» о проблеме северных лесов была удостоена премии имени М.В. Ломоносова.

Василий Фролович щедро делится своими знаниями с молодежью, воспитывая у молодого поколения экологическое мировоззрение. Обучающиеся на многие годы запомнят его лекции по курсам «Общее лесоводство», «Лесное ландшафтоведение», «Рекреационное лесоводство», «Основы рационального лесопользования», «Лесоведение», «Общая экология», «Экология и природопользование», «Геология с основами гидрологии».

За заслуги в подготовке высококвалифицированных специалистов и вклад в развитие лесопользования В.Ф. Цветков награжден медалями «Столетие В.И. Ленина», «Ветеран труда». В 2001 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный лесовод РФ».

Пользуясь случаем, хочется передать Василию Фроловичу Цветкову наилучшие пожелания от лесоводов Урала, поздравить его с 80-летием и пожелать новых творческих успехов, благодарных талантливых учеников и крепкого здоровья на долгие, долгие годы.

С.В. Залесов

Уральский государственный лесотехнический университет

UDC 06.091

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.185

The Anniversary of an Expert of the Northern Taiga

S.V. Zalesov

Ural State Forest Engineering University