

ISSN 0536 – 1036

DOI:10.17238/issn0536-1036

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# Лесной журнал

Основан в 1833 г.

2/356

2017

Уважаемые читатели, авторы, рецензенты, члены редакционной коллегии!

Научный журнал «Известия высших учебных заведений. Лесной журнал» включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий РФ и публикует статьи по следующим группам специальностей: 06.03.00 Лесное хозяйство; 05.21.00 Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревопереработки и химической переработки биомассы дерева; 03.02.00 Общая биология.

#### К сведению авторов

В журнале публикуются ранее не публиковавшиеся научные статьи, не содержащие сведений, относящихся к государственной, служебной или коммерческой тайне. Все статьи подлежат обязательному анонимному рецензированию. Отклоненные статьи авторам не возвращаются. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и вносить редакционные изменения в рукопись. Плата за публикацию рукописей не взимается, авторский гонорар не выплачивается.

#### Основные требования, предъявляемые к статьям:

научная новизна; актуальность задачи, решаемой данным исследованием; корректность постановки эксперимента и полученных результатов; возможность воспроизведения экспериментальных данных; ясность и логичность изложения; правильное оформление рукописи. Текст представляется на бумажном и электронном носителях на русском или английском языке. Объем статьи не должен превышать 8–12 страниц (обзорная статья 16–18 страниц) формата А4, включая таблицы, схемы, рисунки и список литературы. Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word, шрифт 14 Times New Roman, межстрочный интервал – множитель 1.2, поля – 2 см. Иллюстрации представляются в форматах Tiff или Jpg, графики в Excel с разрешением не менее 300 dpi. Формулы набираются в Word for Windows. Нумеруются только те формулы, на которые делаются ссылки в тексте. Порядковый номер ставится в круглых скобках справа от формулы. В имени файла указываются фамилия и инициалы автора. Все страницы рукописи имеют сплошную нумерацию. Порядковые номера страниц проставляются посередине верхнего поля страницы арабскими цифрами. Материал статьи должен быть ясно изложен и содержать: код УДК; название статьи; фамилия и инициалы автора(ов); ученая степень/звание автора(ов); название организации, в которой выполнена работа (с полным почтовым адресом); адрес электронной почты; аннотация; ключевые слова; текст статьи (введение, методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение); список литературы; метаданные на английском языке в том же порядке, как и в варианте на русском языке.

**Аннотация включает:** предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты; область применения результатов; выводы. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Объем аннотации от 250 до 500 слов.

**Ключевые слова** (до 10 слов) — это слова из текста, по которым может вестись оценка и поиск статьи. В качестве ключевых слов могут использоваться как слова, так и словосочетания.

**Список литературы** оформляется согласно требованиям ГОСТ 7.0.5–2008, составляется в алфавитном порядке (сначала отечественные, затем зарубежные авторы). Библиографические ссылки в тексте статьи на номер литературного источника делаются в квадратных скобках, номер указывает на источник в списке литературы. В статье рекомендуется использовать 10–15 источников (для научного обзора – более 50), в том числе 30 % из которых иностранные.

*Более подробная информация размещена на сайте <http://lesnojzhurnal.ru>*

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
**eLIBRARY.RU**

издательский  
дом  
  
**ЛАНЬ®** [www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com)  
электронно-библиотечная система

НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
  
**CABI**


**CYBERLENINKA**

**EBSCO**

  
**J-Gate**

  
**AGRIS**

  
**ULRICHSWEB™**  
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук  
**ВИНИТИ РАН**

  
**CASSI™**  
A CAS SOLUTION

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

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

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

# Лесной журнал

**Научный рецензируемый журнал**

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

2/356

2017

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., акад. 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)  
**Моисеев Н.А.**, д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (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)  
**Усольцев В.А.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)  
**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)

---



ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

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 peer-reviewed journal**

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

2/356

2017

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)  
**Moiseev N.A.**, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)  
**Niemz P.**, PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)  
**Oblivin A.N.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Onegin V.I.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)  
**Pamfilov E.A.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)  
**Romanov E.M.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)  
**Saksa T.**, Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)  
**Sanaev V.G.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Selikhovkin A.V.**, Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)  
**Sergeevichev V.V.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)  
**Sørensen O.J.**, PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)  
**Sigurðsson B.D.**, PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)  
**Tarakanov A.M.**, Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist (Russia, Arkhangelsk)  
**Usol'tsev V.A.**, Doctor of Agriculture (Russia, Yekaterinburg)  
**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 Forest 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>Р.Н. Матвеева, Л.И. Милютин, О.Ф. Буторова, Н.П. Братилова.</i> Отбор деревьев кедра сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации.....	9
<i>Н.А. Рыбакова, М.В. Рубцов.</i> Влияние рубки древостоев березы на семеношение ели предварительной генерации в южной тайге.....	21
<i>В.К. Ширнин, В.А. Кострикин, Л.В. Ширнина, С.А. Крюкова.</i> Лесовосстановление дуба черешчатого сеянцами с закрытой корневой системой.....	32
<i>С.Л. Шевелев, М.Н. Ефремова.</i> Связь между средними таксационными показателями древостоев березы в Красноярско-Ачинско-Канском лесостепном районе.....	42
<i>Е.Н. Пилипко.</i> Трофическое влияние лося ( <i>Alces alces</i> L.) на территории смешанных и лиственных молодняков Вологодской области в летний период.....	52
<i>О.М. Шабалина, И.Н. Безкоровайная, Ю.Н. Баранчиков.</i> Изменение нижних ярусов фитоценозов пихтовых лесов в очагах массового размножения уссурийского полиграфа ( <i>Polygraphus proximus</i> Blandf.) на территории Красноярского края.....	67
<i>Е.А. Пинаевская, С.Н. Тарханов.</i> Изменчивость радиального прироста у половых типов сосны обыкновенной в условиях постоянного избыточного увлажнения почв.....	85
<i>С.Е. Грибов, А.А. Карбасников, Е.Б. Карбасникова, С.А. Корчагов.</i> Оценка перспективности использования лиственницы сибирской ( <i>Larix sibirica</i> ) в озеленении г. Вологды.....	95

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>А.Н. Заикин, Е.Г. Рыжикова, И.И. Теремкова.</i> Метод оперативного планирования и управления лесосечными работами.....	107
<i>Э.Ф. Герц, Н.Н. Теринов, Ю.Н. Безгина, А.Ф. Уразова, Т.А. Перепечина.</i> Рациональная технология рубок с трелевкой заготовленной древесины мини-тракторами под пологом древостоя.....	119

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>О.Д. Мюллер, В.И. Мелехов, Н.Г. Пономарева, Т.В. Тюрикова, М.О. Хрусталева.</i> Математическая модель процесса прессования термомодифицированной древесной коры в пресс-грануляторах барабанного типа.....	130
---	-----

*Э.О. Булатасов, В.П. Попов, В.П. Ханин.* Влияние формы режущей кромки и передней поверхности ножа на силовые показатели измельчения древесины..... 149

*ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ*

*И.В. Лебедев, Я.В. Казаков.* Моделирование структуры бумажного листа..... 160  
*М.А. Молодцова, Ю.В. Севастьянова.* Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор)..... 173

*ЮБИЛЕИ*

*Н.И. Богданович, С.И. Третьяков, В.С. Комаров, В.И. Мелехов, Н.А. Кутакова, Л.Н. Кузнецова, Е.А. Лагунова.* Юбилей профессора Н.А. Макаревича..... 188

---

---



CONTENTS

FORESTRY

<i>R.N. Matveeva, L.I. Milyutin, O.F. Butorova, N.P. Bratilova.</i> Selection of High Reproductive Siberian Cedar Trees in the Geographic Seed Plantation.....	9
<i>N.A. Rybakova, M.V. Rubtsov.</i> Effect of Birch Stand Cutting on Seed Production of Spruce of Preliminary Generation in the South Taiga.....	21
<i>V.K. Shirmin, V.A. Kostrikin, L.V. Shirmina, S.A. Kryukova.</i> English Oak Reforestation by Ball-Rooted Seedlings.....	32
<i>S.L. Shevelev, M.N. Efremova.</i> The Relationship Between the Average Forest Inventory Indices of Birch Stands in the Krasnoyarsk-Achinsk-Kansk Forest-Steppe Area..	42
<i>E.N. Pilipko.</i> The Trophic Effect of Moose ( <i>Alces alces</i> L.) in the Mixed and Deciduous Young Stands of the Vologda Region in Summer.....	52
<i>O.M. Shabalina, I.N. Bezkorovaynaya, Yu.N. Baranchikov.</i> Changes of Phytocenosis Understories of Fir Forests in the Breeding Grounds of Four-Eyed Fir Bark Beetle ( <i>Polygraphus Proximus</i> Blandf.) in the Krasnoyarsk Territory.....	67
<i>E.A. Pinaevskaya, S.N. Tarkhanov.</i> The Variability of Radial Increment of Sexual Types of Scotch Pine Under Hydrogenic Conditions.....	85
<i>S.E. Gribov, A.A. Karbasnikov, E.B. Karbasnikova, S.A. Korchagov.</i> Prospective Assessment of Siberian Larch ( <i>Larix sibirica</i> ) in the Landscaping of the City of Vologda.....	95

WOOD EXPLOITATION

<i>A.N. Zaikin, E.G. Ryzhikova, I.I. Teremkova.</i> Method of Operational Planning and Control of Logging Operations.....	107
<i>E.F. Gerts, N.N. Terinov, Yu.N. Bezgina, A.F. Urazova, T.A. Perepechina.</i> Rational Cutting Technology with Mini Tractors Log Skidding Under the Forest Canopy	119

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>O.D. Myuller, V.I. Melekhov, N.G. Ponomareva, T.V. Tyurikova, M.O. Khrustaleva.</i> Mathematical Model of the Pressing Process of Thermally-Modified Tree Bark in the Drum-Type Press-Granulators.....	130
<i>E.O. Bulatasov, V.P. Popov, V.P. Khanin.</i> The Impact of the Shape of the Knife Cutting Edge and Face Surface on the Power Indicators of Wood Shredding.....	149

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

<i>I.V. Lebedev, Ya.V. Kazakov.</i> Paper Sheet Texture Simulation.....	160
---	-----

*M.A. Molodtsova, Yu.V. Sevast'yanova. Opportunities and Prospects of Microwave Radiation in Industry (Review).....* 173

*JUBILEES*

*N.I. Bogdanovich, S.I. Tretyakov, V.S. Komarov, V.I. Melekhov, N.A. Kutakova, L.N. Kuznetsova, E.A. Lagunova. The Anniversary of Professor N.A. Makarevich.....* 188

---

---



УДК 630\*181.52

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9

### **ОТБОР ДЕРЕВЬЕВ КЕДРА СИБИРСКОГО ВЫСОКОЙ РЕПРОДУКТИВНОЙ СПОСОБНОСТИ НА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЛЕСОСЕМЕННОЙ ПЛАНТАЦИИ**

*Р.Н. Матвеева<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.*

*Л.И. Милютин<sup>2</sup>, д-р биол. наук, проф.*

*О.Ф. Буторова<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.*

*Н.П. Братилова<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.*

<sup>1</sup>Сибирский государственный технологический университет, пр. Мира, д. 82,  
г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: selekcia@sibgtu.kts.ru

<sup>2</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Академгородок, 50/28,  
г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: milyutin@ksc.krasn.ru

Важнейшее направление селекции кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) – отбор популяций и генотипов на обильные урожаи и качество семян. На географической лесосеменной плантации, созданной посадкой 16-летних саженцев, проанализировано образование шишек и микростробилов у кедра сибирского за 32-летний период (1983–2014 гг.). Анализ проводился с учетом географического происхождения материнских популяций и индивидуальных особенностей генотипов отдельных деревьев. Материнские насаждения отличались географическим происхождением (от 50°12' до 61°00' с.ш., от 85°33' до 90°36' в.д.), высотными поясами (от 100 до 1700 м над уровнем моря), классами возраста (V–VII), типами леса и составом. Сравнилось формирование шишек у потомства контрастных географических происхождений: бирюсинского (местного), алтайского, ярцевского, лениногорского. У потомств бирюсинского и алтайского происхождений отмечена большая встречаемость деревьев с ранним образованием шишек. Замедленное вступление деревьев в семенное состояние установлено у деревьев высокогорного лениногорского происхождения. К возрасту 49 лет 4,9...26,7 % деревьев всех происхождений еще не вступили в репродуктивную стадию развития. Первоначально на деревьях формируются по 1...3 шишки. В последующем их число увеличивается, составляя в 50-летнем возрасте в лениногорском, ярцевском, алтайском и бирюсинском вариантах соответственно в среднем 13,5; 16,4; 17,9 и 18,0 шт. Наименьшее количество шишек отмечено у потомства лениногорского (высокогорный район Казахстана) происхождения.

---

*Для цитирования:* Матвеева Р.Н., Милютин Л.И., Буторова О.Ф., Братилова Н.П. Отбор деревьев кедра сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 9–20. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9



В потомстве каждого происхождения проявляется значительная индивидуальная изменчивость, что позволило отобрать отдельные деревья, отличающиеся ранним и обильным образованием шишек и побегов с микростробилами. Деревья одинакового возраста, произрастающие на плантации при хорошем освещении, дифференцируются на быстрорастущие и раннего репродуктивного развития, причем эти показатели не коррелируют между собой. Количество урожайных деревьев (200 шишек и более) зависит от географического происхождения и колеблется от 11,6 до 37,0 % в разных вариантах. Выделены многошишечные формы с расположением на побеге по 4-5 шишек «в пучке». Отобранные деревья предназначены для вегетативного размножения и создания лесосеменных плантаций, отличающихся повышенной семенной продуктивностью.

*Ключевые слова:* кедр сибирский, плантация, географические происхождения, отбор, урожайность, шишки, микростробилы.

#### *Введение*

Кедр сибирский, или сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), – один из главных лесообразующих видов в нашей стране. Наряду с отбором на стволовую продуктивность важнейшим направлением его селекции является отбор популяций и генотипов на обильные урожаи и высокое качество семян [1, 7, 8, 12, 15–17 и др.].

Цель наших исследований – изучение особенностей репродуктивного развития за 32-летний период (с 19- до 51-летнего возраста) деревьев кедр сибирского разного географического происхождения, произрастающих на географической лесосеменной плантации «Метеостанция», которая была создана в 1979 г. на территории Караульного участкового лесничества Учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного технологического университета (юг Средней Сибири). В качестве посадочного материала использованы 16-летние растения. Схема посадки 5×5 м. Саженцы были выращены из семян, заготовленных в насаждениях разных мест произрастания.

В задачи исследований входили: анализ возрастной динамики образования генеративных органов; селекционная оценка деревьев; выделение особей кедр сибирского, отличающихся ранним обильным семеношением и повышенной пыльцевой продуктивностью; установление связи этих показателей с географическим происхождением изучаемых деревьев.

Исследования проводили на одних и тех же объектах многолетней возрастной динамики семеношения и мужского «цветения» кедр сибирского. Такой подход позволил дать объективную всестороннюю оценку отбираемых генотипов и популяций [5]. «При отборе плюсовых деревьев для формирования промышленных орехоплодовых плантаций, наряду с обилием урожая и качеством семян, важное значение имеют и такие признаки, как стабильность плодоношения, раннее вступление в половую репродукцию, одновременность фаз цветения и пыления, сроки созревания шишек, пищевые и товарные качества семян. Определенное сочетание отдельных форм деревьев на таких плантациях позволяет создать оптимальные условия как для пыльцевого режима, так и для сбора шишек. Характерная особенность отбора плюсовых деревьев

на урожайность семян – необходимость повторной или даже многократной оценки отдельных признаков» [9, с. 124].

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследований являлась географическая плантация кедра сибирского. Как известно [2], у кедра сибирского дифференциация географически удаленных популяций не столь велика, как у других видов хвойных с достаточно большим ареалом, что обусловлено сравнительно узкой экологической нишей его произрастания. Четкие различия по показателям роста и репродукции отмечены в потомствах деревьев разных видов из контрастных регионов [18–20]. Нами изучались особенности репродукции деревьев четырех контрастных географических происхождений: бирюсинского (местного), алтайского, лениногорского и ярцевского. Материнские насаждения отличались районами произрастания (географические координаты от 50°12′ до 61°00′ с.ш., от 85°33′ до 90°36′ в.д.; высотные пояса от 100 до 1700 м над уровнем моря (у. м.)), классами возраста (V–VII), типами леса и составом насаждений (табл. 1).

Следует также отметить, что исследования геогеографии кедровых сосен [14] выявили генетические различия между популяциями кедра сибирского, расположенными в районах произрастания изучаемых материнских насаждений.

Количество шишек и побегов с микростробилами на дереве определяли визуально с помощью бинокля по методике Т.П. Некрасовой [13]. В годы обильного образования шишек и микростробилов подсчитывали количество побегов с микростробилами и шишками и их среднее значение на ветви. Полученные показатели позволяли установить наличие шишек и побегов с микростробилами в целом на дереве. Сравнивали многолетнюю удельную энергию семеношения по количеству шишек за последние 10 лет, деленному на диаметр ствола на высоте 1,3 м.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel.

Таблица 1

#### **Характеристика материнских насаждений кедра сибирского разного географического происхождения**

Географическое происхождение	Республика, край	Координаты		Высота над у. м., м	Класс		Тип леса	Состав насаждения
		с.ш.	в.д.		бонитета	возраста		
Алтайское	Алтай	51°50′	85°54′	700	III	V	Ктр	5К3П2Б
Бирюсинское (местное)	Красноярский	56°00′	90°30′	300	III	V	Крт	7К2Е1П
Лениногорское	Казахстан	50°12′	85°33′	1700	III	VII	Ккисл	10К
Ярцевское	Красноярский	61°00′	90°36′	100	III	VI	Кпойм	10К

*Результаты исследования и их обсуждение*

В ходе исследования установлено, что образование шишек у единичных деревьев, произрастающих на плантации, наблюдалось с 19-летнего биологического возраста. Встречаемость таких деревьев по вариантам опыта колебалась от 0,7 до 4,3 %. По данным Д.М. Гиряева и М.Ф. Петрова [6], на лесосеменной плантации кедра сибирского в Волгоградской области активное вступление растений в репродуктивную стадию отмечалось в возрасте 17...19 лет. В Томской области в стадию семеношения вступили 13,3 % деревьев в возрасте 19...21 год [3].

Наибольшее количество деревьев, сформировавших шишки в начальный период (19...24 года), отмечено в потомстве популяций алтайского и бирюсинского происхождений (табл. 2).

Таблица 2

**Количество (%) деревьев кедрового сибирского разного географического происхождения, образовавших шишки в 19–51-летнем возрасте**

Географическое происхождение	Возраст, лет							
	19	19...24	19...29	19...34	19...39	19...44	19...49	19...51
Алтайское	4,3	9,3	9,3	37,4	77,9	80,0	84,2	99,2
Бирюсинское	2,4	5,7	17,2	51,3	92,5	95,1	95,1	100,0
Ленинское	0,7	4,7	8,7	28,7	53,3	57,3	73,3	98,2
Ярцевское	1,0	3,0	9,9	44,6	76,2	84,2	88,1	98,9

Как видно из табл. 2, начиная с 25-летнего возраста, лидирующие позиции по образованию шишек занимают деревья бирюсинского происхождения. На всех возрастных этапах отстают по срокам вступления в семеношение деревья ленинского происхождения, материнская популяция которых произрастает на высоте 1700 м над у. м. В 49-летнем возрасте часть деревьев всех происхождений еще не вступила в стадию репродуктивного развития. Наибольшая встречаемость таких деревьев (26,7 %) отмечена у потомства ленинского происхождения. За 51-летний период практически все деревья (98,2...100,0 %) сформировали шишки.

Периодичность семеношения деревьев и количество шишек на дереве по вариантам отличается значительно (табл. 3).

Таблица 3

**Количество урожайных лет и шишек у деревьев кедрового сибирского разного географического происхождения (2000–2014 гг.)**

Географическое происхождение	Количество урожайных лет						Число шишек, шт.	
	$X_{cp}$	$\pm m_{X_{cp}}$	$\pm \sigma$	CV, %	P, %	$t_{факт}$ при $t_{05} = 1,96$	$X_{cp}$	% к $X_{cp}$
Алтайское	9,5	0,24	2,56	26,9	2,5	1,33	138,3	101,3
Бирюсинское	9,3	0,42	3,07	33,0	4,5	1,33	121,9	89,3
Ленинское	7,1	0,26	2,78	39,2	3,7	7,56	88,1	64,5
Ярцевское	10,0	0,29	2,82	28,2	2,9	–	197,7	144,8
Среднее значение	9,0	–	–	–	–	–	136,5	100,0

За 15-летний период наиболее часто урожайные годы были у деревьев ярцевского происхождения. В этом варианте отмечается и наибольшее образование шишек (144,8 % в сравнении со средним значением). Более продолжительный межурожайный период был у деревьев лениногорского происхождения, что сказалось и на числе шишек (64,5 %) за 15 лет.

Отмечено, что первоначально на деревьях формируются по 1...3 шишки. В последующем их число увеличивается и в 50-летнем возрасте в лениногорском, ярцевском, алтайском и бирюсинском вариантах в среднем составляет соответственно 13,5; 16,4; 17,9 и 18,0 шт. Таким образом, наибольшее количество шишек на 50-летних деревьях сформировалось у потомства местной (бирюсинской) и алтайской популяций, расположенных в условиях, оптимальных для кедра сибирского. Низкая урожайность выявлена у потомства лениногорского (высокогорный район Казахстана) происхождения. Следует отметить, что на географической плантации кедра сибирского, расположенной вблизи от изучаемого нами объекта (в Красноярской лесостепи), потомство того же лениногорского происхождения, но из низкогорья, характеризовалось хорошим семеношением при среднем количестве шишек 16,8 шт. [11]. Следовательно, при изучении географической изменчивости кедра сибирского необходимо учитывать не только географическую, но и высотнo-пояснoую зональность.

При аттестации плюсовых деревьев, отобранных по семенной продуктивности в разновозрастных насаждениях, рекомендуют использовать такой показатель, как многолетняя удельная энергия семеношения (МУЭС). На плантации, в условиях, когда деревья одинакового возраста произрастают на большом расстоянии друг от друга при хорошем освещении, происходит их дифференциация на быстрорастущие и урожайные, причем часто эти показатели не коррелируют между собой. Так, число шишек в бирюсинском варианте больше, чем в лениногорском, однако из-за большого диаметра ствола деревьев бирюсинского происхождения МУЭС почти одинакова.

При наибольшей урожайности деревьев ярцевского происхождения среднее значение их диаметра отстает на 18,6 % от данного показателя у деревьев местного происхождения. МУЭС (за 10 лет) варьировала от 0,31 шт./см у деревьев бирюсинского происхождения до 0,62 шт./см у ярцевского (табл. 4.)

Таблица 4

**Диаметр ствола и многолетняя удельная энергия семеношения у деревьев кедра сибирского разного географического происхождения**

Географическое происхождение	$X_{cp}$ , см	$\pm m_{X_{cp}}$ , см	CV, %	P, %	$t_{факт}$ при $t_{05}=1,96$	МУЭС, шт./см
Алтайское	25,4	0,54	23,5	2,1	4,94	0,38
Бирюсинское	29,0	0,49	12,2	1,7	–	0,31
Лениногорское	21,2	0,51	26,7	2,4	11,03	0,32
Ярцевское	23,6	0,45	17,8	1,9	8,12	0,62

Шишки на побеге «в пучке» располагаются по 1...6 штук. Установлено, что «многошишечность» у деревьев проявляется не ежегодно, поэтому для отбора деревьев по этому показателю необходимы многолетние наблюдения. Повышенной урожайностью семян обычно отличаются деревья без длительных межурожайных периодов.

Географическая изменчивость проявляется и по такому показателю, как количество побегов с микростробилами (табл. 5).

Таблица 5

**Среднее количество побегов с микростробилами на 49-50-летних деревьях кедра сибирского разного географического происхождения**

Географическое происхождение	49 лет		50 лет		За 2 года	
	шт.	% к $X_{cp}$	шт.	% к $X_{cp}$	шт.	% к $X_{cp}$
Алтайское	389,1	107,8	486,0	115,9	875,1	112,2
Бирюсинское	358,5	99,3	445,7	106,3	804,2	103,1
Лениногорское	287,2	79,5	385,3	80,0	622,5	79,8
Ярцевское	409,6	113,4	409,5	97,7	819,1	105,0
Среднее значение	361,1	100,0	419,2	100,0	780,2	100,0

Наибольшее количество побегов с микростробилами за 2 года было отмечено на деревьях кедра бирюсинского, ярцевского и алтайского происхождения. Достоверно меньший показатель наблюдался у деревьев лениногорского происхождения.

Учитывая, что на одном дереве формируется в среднем 54,5 г пыльцы [4, 10], а количество деревьев с микростробилами составляет 86...98 %, то количество продуцируемой пыльцы на 1 га равно 20,1 кг.

В связи с высокой индивидуальной изменчивостью значений показателей генеративных органов среди деревьев каждого географического происхождения были отобраны особи, лидирующие по показателям семеношения. Характеристики трех таких деревьев каждого происхождения приведены в табл. 6.

Максимальное число шишек было на дереве № 42 ярцевского происхождения. Превышение над средним значением составило 4,6 раза. Это дерево давало урожай шишек 14 раз за 15-летний период. Шишки на побеге данного дерева располагались по 1...3 шт. Однако, являясь лидером по урожайности, это дерево образует минимальное количество пыльцы, т. е. оно формируется по женскому типу развития. Отмечено, что количество урожайных деревьев (более 200 шишек за 15-летний период) меняется в зависимости от географического происхождения и составляет 11,6 % в лениногорском и 37,0 % в ярцевском вариантах. Количество высокоурожайных деревьев бирюсинского и алтайского происхождения составляет соответственно 18,5 и 20,2 %. Среди отселектированных деревьев встречаются многошишечные формы (№ 40 ярцевского, № 139 алтайского, № 66 бирюсинского, № 174 лениногорского происхождения и др.) с расположением на побеге по 4-5 шт. шишек в пучке.

Таблица 6

**Характеристика отселектированных по семеношению деревьев кедра сибирского  
разного географического происхождения**

№ дерева	Число шишек за 15 лет		Коли- чество урожай- ных лет	МУЭС за 10 лет		Максималь- ное число шишек на побеге, шт.	Количество побегов с микрострои- лами за 2 года	
	шт.	% к $X_{cp}$		шт./см	% к $X_{cp}$		шт.	% к $X_{cp}$
<i>Алтайское</i>								
9	435	329,5	14	1,56	380,5	3	2612	334,8
21	395	299,2	14	1,02	248,8	2	789	101,1
139	364	275,8	13	1,01	246,3	4	2313	296,5
<i>Бирюсинское</i>								
66	299	226,5	13	0,84	204,9	4	361	46,3
56	296	224,2	13	0,58	141,5	3	588	75,4
28	263	199,2	15	0,54	131,7	2	2646	339,1
<i>Лениногорское</i>								
174	417	315,9	14	1,22	297,6	4	648	83,1
146	323	244,7	13	0,94	229,3	3	1636	209,7
53	313	237,1	15	1,40	341,5	3	413	52,9
<i>Ярцевское</i>								
42	608	460,6	14	1,97	480,5	3	382	49,0
40	469	355,3	14	1,31	319,5	5	945	121,1
89	443	335,6	13	1,08	263,4	2	920	117,9
Среднее значение	132,0	100,0	9,0	0,41	100,0	1,5	780,2	100,0

К крупношишечным особям (длина шишки 9 см и более) отнесены отдельные деревья лениногорского (№ 29), ярцевского (№ 15, 79 и др.), бирюсинского (№ 7) и алтайского (№ 97) происхождений.

Выделены деревья с обильным мужским «цветением». В табл. 7 приведено по три экземпляра в каждом варианте, отселектированных по пыльцевой продуктивности с указанием образования шишек за 2 года.

По вариантам опыта деревья, образовавшие за два года 1500 и более побегов с микростроилами, распределились следующим образом: алтайское происхождение – 14,3 %, бирюсинское – 9,3 %, лениногорское – 8,0 %, ярцевское – 6,5 %. Однако только часть лидирующих по этому показателю деревьев имеют и хорошее семеношение. Так, дерево № 31 бирюсинского происхождения, образовавшее побегов с микростроилами в 4,4 раза больше среднего значения, сформировало за весь период только 33 шишки, т. е. это дерево развивается по мужскому типу. Деревья № 9 алтайского, № 28 бирюсинского, № 144 лениногорского происхождений и другие формируют наибольшее количество и шишек и пыльцы, что имеет большое значение при использовании таких генотипов на плантации, ориентированной на повышенную урожайность.

Таблица 7

## Отсеleetированные по пыльцевой продуктивности деревья кедр сибирского разного географического происхождения

Географическое происхождение	№ дерева	Количество побегов с микроростробилами за 2 года		Число шишек за 2 года, шт.
		шт.	% к $X_{cp}$	
Алтайское	4	3670	470,4	274
	136	3299	422,8	166
	9	3222	413,0	435
Бирюсинское	31	3465	444,1	33
	28	2646	399,1	263
	14	2295	294,2	124
Лениногорское	144	3772	483,5	284
	130	3200	410,2	131
	107	3108	398,4	260
Ярцевское	35	2177	279,0	185
	104	1999	256,2	151
	101	1730	221,7	326
Среднее значение	780,2	100,0	132,9	–

## Заключение

Как уже отмечалось, географическая дифференциация популяций у кедр сибирского проявляется слабее, чем у других видов хвойных. Однако результаты наших исследований показывают, что у контрастных географически удаленных популяций этот вывод не находит подтверждения. Выявлена достаточно сильная географическая и индивидуальная изменчивость кедр сибирского на географической плантации по таким показателям, как сроки вступления в репродуктивную стадию развития, возрастная динамика мужского «цветения» и семеношения.

Проведенные многолетние исследования позволили отобрать деревья, выделяющиеся по женскому и мужскому типам развития. Эти деревья представляют собой ценные генотипы, предназначенные для их размножения прививкой в целях создания лесосеменных плантаций, отличающихся повышенной урожайностью семян.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Орешенко С.А., Пастухова А.М. Изменчивость и отбор 42–45-летних деревьев сосны кедровой сибирской разного географического происхождения (зеленая зона г. Красноярск). Красноярск: СибГТУ. 2013. 133 с.
2. Брынцев В.А., Царев А.П., Погиба С.П., Лаура Н.В. Селекция сосны кедровой сибирской // Селекция лесных и декоративных древесных растений. М.: МГУЛ, 2014. С. 221–227.
3. Велисевич С.Н., Петрова Е.А. Рост и вступление в плодоношение деревьев орехоплодной плантации и производство культур кедр сибирского // Лесн. хоз-во. 2006. № 3. С. 39–40.



4. *Водин А.В., Ступин А.Ю.* Влияние густоты посадки на количество формируемой пыльцы у кедра сибирского // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГТУ, 2006. С. 53–56.
5. *Воробьев В.Н., Воробьева Н.А., Горошкевич С.Н.* Рост и пол кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1989. 167 с.
6. *Гиряев Д.М., Петров М.Ф.* Разведение кедра сибирского в Нечерноземной зоне РСФСР // Лесн. хоз-во. 1983. № 3. С. 63–65.
7. *Горошкевич С.Н.* Селекция кедра сибирского как орехоплодной породы // Лесн. хоз-во. 2000. № 4. С. 25–27.
8. *Земляной А.И., Ильичев Ю.Н., Тараканов В.В.* Межклоновая изменчивость кедра сибирского по элементам семенной продуктивности: перспективы отбора // Хвойные бореальной зоны. 2010. № 1-2. С. 77–82.
9. *Ирошников А.И.* Кедровые сосны // Селекция лесных пород. М: Лесн. пром-сть, 1982. С. 121–126.
10. *Кузнецова Г.В.* Изменчивость формирования микростробиллов у клонов кедров сибирского разного происхождения // Актуальные проблемы генетики. 2003. Т. 1. С. 116–117.
11. *Кузнецова Г.В.* Рост, состояние и развитие кедровых сосен в географических культурах на юге Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. 2010. Вып. 27, № 1-2. С. 102–108.
12. *Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Щерба Ю.Е.* Влияние географического происхождения на репродуктивное развитие кедров сибирского на лесосеменной плантации за 24-летний период // Лесн. журн. 2011. № 4. С. 7–10. (Изв. высш. учеб. заведений).
13. *Некрасова Т.П.* Биологические основы семеношения кедров сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 274 с.
14. *Политов Д.В.* Генетика популяций и эволюционные взаимоотношения видов сосновых (сем. *Pinaceae*) Северной Евразии: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2007. 432 с.
15. *Правдин Л.Ф.* Селекция и семеноводство кедров сибирского в Восточной Сибири // Плодоношение кедров сибирского в Восточной Сибири. М.: АН СССР, 1963. С. 5–21.
16. *Тумов Е.В.* Орехопродуктивная плантация кедров сибирского повышенной генетической ценности в Республике Алтай // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГТУ, 2009. С. 120–123.
17. *Goncharenko G.G., Padutov V.E., Silin A.E.* Allozyme Variation in Natural Populations of Eurasian Pines. II. Genetic Variation, Diversity, Differentiation and Gene Flow in *Pinus Sibirica* Du Tour in Some Lowland and Mountain Populations // *Silvae Genetica*. 1993. Vol. 42. No. 4-5. Pp. 246–253.
18. *Matziris D.I.* Genetic Variation and Realized Genetic Gain from Aleppo Pine Tree Improvement // *Silvae Genetica*. 2000. Vol. 49. No. 1. Pp. 5–10.
19. *Sebbenn A.M., Boas O.V., Freitas M.L.M.* Genetic Variation in an International Provenance-Progeny Test of *Pinus caribaea* Mor. var. *bahamensis* Bar. et Gol., in Sao Paulo, Brazil // *Silvae Genetica*. 2008. Vol. 57. No. 4-5. Pp. 181–187.
20. *Silva J.C., Graudal L.* Evaluation of an International Series of *Pinus kesiya* Provenance Trials for Growth and Wood Quality Traits // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255. No. 8-9. Pp. 3477–3488.

Поступила 20.04.16

UDC 630\*181.52

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9

### **Selection of High Reproductive Siberian Cedar Trees in the Geographic Seed Plantation**

*R.N. Matveeva*<sup>1</sup>, *Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

*L.I. Milyutin*<sup>2</sup>, *Doctor of Biological Sciences, Professor*

*O.F. Butorova*<sup>1</sup>, *Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

*N.P. Bratilova*<sup>1</sup>, *Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

<sup>1</sup>Siberian State Technological University, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049,

Russian Federation; e-mail: selekcia@sibgtu.kts.ru

<sup>2</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy

of Sciences, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation;

e-mail: milyutin@ksc.krasn.ru

The major breeding direction of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) is the selection of populations and genotypes for the abundant yield and seed quality. We analyzed the formation of cones and microstrobiles of Siberian cedar (*Pinus sibirica* Du Tour) for a 32-year period (1983–2014) in a geographic seed plantation, established by 16-year-old seedlings planting. The analysis is conducted on the basis of geographical origin of parent populations and individual characteristics of genotypes of individual trees. Shelter woods differ by geographical origin (from 50°12' up to 61°00' N, from 85°33' up to 90°36' E), high-altitude zones (from 100 to 1700 m above sea level), age classes (V–VII), forest types and composition. The cones formation in offspring of contrasting geographical origins (Biryusinsk (local), Altai, Yartsev, Leninogorsk) is compared. Biryusinsk and Altai offspring are marked by the occurrence of trees with early formation of cones. Slow reproductive development is observed in trees of mountain Leninogorsky origin. 4.9...26.7 % of trees of all origins have not entered into the reproductive stage of development by the age of 49 years. Initially, 1...3 cones are formed in the trees. Subsequently, their number increases on an average up to 13.5, 16.4, 17.9 and 18.0 pcs. in Leninogorsk, Yartsev, Altai and Biryusinsk variants, respectively, by the age of 50. The lowest number of cones is observed in offspring of Leninogorsk origin (mountainous region of Kazakhstan). The offspring of each origin manifests a considerable individual variability, which allows us to select the individual trees, differing by the early, abundant formation of cones and shoots with microstrobiles. The trees of the same age, growing on the plantation in a good light, are differentiated into the fast growing trees and the trees with the early reproductive development; and these parameters do not correlate with each other. The number of productive trees (200 cones and more) depends on geographic origin and ranges from 11.6...37.0 % in different variants. We mark multi-cone bunch forms with 4-5 cones on a shoot. The selected trees can be used for vegetative reproduction and seed plantations creation, characterized by an increased seed production.

*Keywords:* Siberian cedar, plantation, geographical origin, selection, yield, cones, microstrobile.

---

*For citation:* Matveeva R.N., Milyutin L.I., Butorova O.F., Bratilova N.P. Selection of High Reproductive Siberian Cedar Trees in the Geographic Seed Plantation. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 9–20. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9

REFERENCES

1. Bratilova N.P., Matveeva R.N., Oreshenko S.A., Pastukhova A.M. *Izmenchivost' i otbor 42–45-letnikh derev'ev sosny kedrovoy sibirskoy raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya (zelenaya zona g. Krasnoyarska)* [Variability and Selection of 42–45-Year-Old Siberian Stone Pine Trees of Different Geographical Origin (Green Area of Krasnoyarsk)]. Krasnoyarsk, 2013. 133 p.
2. Bryntsev V.A., Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laura N.V. *Selektsiya sosny kedrovoy sibirskoy* [Selection of Siberian Stone Pine]. *Selektsiya lesnykh i dekorativnykh drevesnykh rasteniy* [Selection of Forest and Ornamental Woody Plants]. Moscow, 2014, pp. 221–227.
3. Velisevich S.N., Petrova E.A. *Rost i vstuplenie v plodonoshenie derev'ev orekhoplodnoy plantatsii i proizvodstvo kul'tur kedra sibirskogo* [Growth and Reproductive Development of Trees of the Nut-Bearing Plantation and Production of Siberian Cedar]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2006, no. 3, pp. 39–40.
4. Vodin A.V., Stupin A.Yu. *Vliyanie gustomoty posadki na kolichestvo formiruemykh pyl'tsy u kedra sibirskogo* [The Effect of Planting Density on the Amount of Pollen Formed by Siberian Cedar]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit Growing, Seed Production, Introduction of Woody Plants]. Krasnoyarsk, 2006, pp. 53–56.
5. Vorob'ev V.N., Vorob'eva N.A., Goroshkevich S.N. *Rost i pol kedra sibirskogo* [Growth and Gender of Siberian Cedar]. Novosibirsk, 1989. 167 p.
6. Giryaev D.M., Petrov M.F. *Razvedenie kedra sibirskogo v Nechernozemnoy zone RSFSR* [Breeding of Siberian Cedar in the Nonchernozem Belt of the RSFSR]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1983, no. 3, pp. 63–65.
7. Goroshkevich S.N. *Selektsiya kedra sibirskogo kak orekhoplodnoy porody* [Selection of Siberian Cedar as a Nut-Bearing Species]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2000, no. 4, pp. 25–27.
8. Zemlyanoy A.I., Il'ichev Yu.N., Tarakanov V.V. *Mezhklonovaya izmenchivost' kedra sibirskogo po elementam semennoy produktivnosti: perspektivy otbora* [Interclonal Variability of Siberian Stone Pine by the Seed Production Elements: Prospects of Selection]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2010, no. 1-2, pp. 77–82.
9. Iroshnikov A.I. *Kedrovye sosny* [Cedar Pines]. *Selektsiya lesnykh porod* [Selection of Forest Species]. Moscow, 1982, pp. 121–126.
10. Kuznetsova G.V. *Izmenchivost' formirovaniya mikrostrombilov u klonov kedra sibirskogo raznogo proiskhozhdeniya* [Variability of Microstrobile Formation of Clones of Siberian Cedar of Different Origin]. *Aktual'nye problemy genetiki* [Actual Problems of Genetics], 2003, vol. 1, pp. 116–117.
11. Kuznetsova G.V. *Rost, sostoyanie i razvitie kedrovyykh sosen v geograficheskikh kul'turakh na yuge Krasnoyarskogo kraya* [The Growth, State and Development of Cedar Pines in the Provenance Trial Plantations in the South of the Krasnoyarsk Territory]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2010, vol. 27, no. 1-2, pp. 102–108.
12. Matveeva R.N., Butorova O.F., Shcherba Yu.E. *Vliyanie geograficheskogo proiskhozhdeniya na reproduktivnoe razvitie kedra sibirskogo na lesosemennoy plantatsii za 24-letniy period* [Geographical Provenance Effect on Reproductive Development of Siberian Cedar on Seed Orchard over 24-Year Period]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2011, no. 4, pp. 7–10.
13. Nekrasova T.P. *Biologicheskie osnovy semenosheniya kedra sibirskogo* [Biological Seed Production Basis of Siberian Cedar]. Novosibirsk, 1972. 274 p.

14. Politov D.V. *Genetika populyatsiy i evolyutsionnye vzaimootnosheniya vidov sosnovykh (sem. Pinaceae) Severnoy Evrazii*: dis. ... d-ra biol. nauk [Genetics of Populations and Evolutionary Relationships of Pine Species (*Pinaceae*) in Northern Eurasia: Dr. Biol. Sci. Diss.]. Moscow, 2007. 432 p.
15. Pravdin L.F. Seleksiya i semenovodstvo kedra sibirskogo [Breeding and Seed Production of Siberian Stone Pine]. *Plodonoshenie kedra sibirskogo v Vostochnoy Sibiri* [Fruiting of Siberian Stone Pine in Eastern Siberia]. Moscow, 1963, pp. 5–21.
16. Titov E.V. Orekhoproductivnaya plantatsiya kedra sibirskogo povyshennoy geneticheskoy tsennosti v Respublike Altay [Nut-Producing Plantation of Siberian Cedar with the Higher Genetic Value in the Republic of Altai]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit Growing, Seed Production, Introduction of Woody Plants]. Krasnoyarsk, 2009, pp. 120–123.
17. Goncharenko G.G., Padutov V.E., Silin A.E. Allozyme Variation in Natural Populations of Eurasian Pines. II. Genetic Variation, Diversity, Differentiation and Gene Flow in *Pinus Sibirica* Du Tour in Some Lowland and Mountain Populations. *Silvae Genetica*, 1993, vol. 42, no. 4-5, pp. 246–253.
18. Matziris D.I. Genetic Variation and Realized Genetic Gain from Aleppo Pine Tree Improvement. *Silvae Genetica*, 2000, vol. 49, no. 1, pp. 5–10.
19. Sebbenn A.M., Boas O.V., Freitas M.L.M. Genetic Variation in an International Provenance-Progeny Test of *Pinus caribaea* Mor. var. bahamensis Bar. et Gol., in Sao Paulo, Brazil. *Silvae Genetica*, 2008, vol. 57, no. 4-5, pp. 181–187.
20. Silva J.C., Graudal L. Evaluation of an International Series of *Pinus kesiya* Provenance Trials for Growth and Wood Quality Traits. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, no. 8-9, pp. 3477–3488.

Received on April 20, 2016

---

УДК 630\*181.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.21

## ВЛИЯНИЕ РУБКИ ДРЕВОСТОЕВ БЕРЕЗЫ НА СЕМЕНОШЕНИЕ ЕЛИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ЮЖНОЙ ТАЙГЕ

*Н.А. Рыбакова, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.*

*М.В. Рубцов, д-р с.-х. наук, проф.*

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, п/о Успенское, Московская обл., Россия, 143030; e-mail:1986620@gmail.com

По данным наблюдений на постоянных пробных площадях установлены особенности семеношения ели через 15 и 29 лет после сплошной рубки древостоев березы с сохранением подроста ели и через 29 лет – с сохранением ели во втором ярусе. Для сравнения (в качестве контроля) используются данные по семеношению ели под пологом березняков в возрасте 70...75 и 90...105 лет. Работы проведены в южно-таежных березняках кислотно-черничной группы типов леса. Анализ семеношения ели дается по году, который оценивался высшим баллом семеношения. На вырубках с сохранением подроста через 15 лет после удаления березового яруса количество семеносящих елей увеличивается почти в 3 раза по сравнению с контролем, общее количество шишек – в 5 раз, среднее количество шишек на дереве – в 2,3 раза, что свидетельствует о значительном повышении семеношения ели. Через 29 лет после рубки по сравнению с контролем количество семеносящих елей увеличивается в 7,4 раза, количество шишек – в 27 раз, среднее количество шишек на дереве – в 4 раза. На вырубках 29-летней давности, где сохранялся второй ярус ели (тонкомер), после рубки березы наблюдается значительный отпад. Количество семеносящих елей в 2,6 раза меньше, чем на вырубках такого же возраста с сохранением подроста, однако их семеношение в 1,4 раза превосходит семеношение ели во втором ярусе березняков на контроле. Семеносящие ели превышают несеменосящие по средней высоте в 1,4–1,7 раза, по среднему объему крон – в 2,8–5,7 раза. Эти различия увеличиваются по мере роста ели на вырубках с сохранением подроста и особенно заметны в ельниках с сохранением второго яруса.

*Ключевые слова:* южная тайга, древостой березы, рубка с сохранением ели, семеношение ели.

### *Введение*

Задачей исследования является сравнительный анализ особенностей семеношения ели (*Picea abies* L.) предварительной генерации под пологом березняков (*Betula pendula* Roth.) в связи с трансформацией структуры популяции в разные возрастные стадии древостоев березы и на вырубках с различной

---

*Для цитирования:* Рыбакова Н.А., Рубцов М.В. Влияние рубки древостоев березы на семеношение ели предварительной генерации в южной тайге // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 21–31. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.21

давностью рубки березового древостоя. Наиболее обстоятельные ранние исследования семеношения деревьев в хвойных древостоях направлены в основном на прогнозирование урожая семян и планирование сбора шишек [1, 12]. Обзор литературы по семеношению ели и определяющим его факторам приведен в [2–5, 7, 11, 13, 14]. Стационарное изучение семеношения ели предварительной генерации, сохраненной после сплошной рубки березы в верхнем ярусе древостоя, и сравнение с семеношением под пологом березняков выполнены впервые.

*Объекты и методы исследования*

В Институте лесоведения РАН (Северная ЛОС, Ярославская область) проводятся многолетние стационарные исследования в производных кислично-черничных березняках и на вырубках с восстанавливающейся популяцией ели. На серии постоянных пробных площадей (ПП) выполняется широкий комплекс наблюдений, позволяющий выявить закономерности структуры фитоценозов, в том числе особенности семеношения ели под пологом мелколиственных древостоев и на вырубках при изучении восстановительной сукцессии. Семеношение подпологовой ели в березняках изучали на семи ПП, заложенных в южно-таежных березняках кислично-черничной группы типов леса 51–105-летнего возраста, в которых рубка не проводилась. Семеношение ели предварительной генерации на вырубках изучали на шести ПП через 15 и 29 лет после сплошной рубки древостоев березы. Для анализа семеношения ели ПП в березняках по возрасту березы в первом ярусе древостоя были объединены в четыре возрастные группы (50...60 лет (Б<sub>50-60</sub>), 70...75 (Б<sub>70-75</sub>), 80...85 (Б<sub>80-85</sub>) и 90...105 лет (Б<sub>90-105</sub>)), характеризующие возрастные стадии развития. Первая и вторая группы относятся к одной стадии возрастного развития березняков – зрелости (51...80 лет), особенностью которой является снижение темпов изреживания и роста древостоя березы после возраста количественной спелости березняка. Третья и четвертая группы характеризуют следующую возрастную стадию березняков – старение (81...120 лет), основным признаком которой является слабое изреживание и рост древостоя березы [9]. Анализ семеношения ели под пологом березняков приводится в работе [11], в которой рассматривается семеношение ели после рубки древостоев березы. Для сравнения (в качестве контроля) используются данные по семеношению ели под пологом березняков.

Пробные площади на вырубках с учетом давности и морфоструктуры сохраняемой ели разделены на две группы. К первой группе отнесены вырубки 15- и 29-летней давности, где рубка направлена на сохранение подростов ели, ко второй – вырубки 29-летней давности, где сохранен главным образом тонкомер ели из второго яруса. Способ рубки – узкопосечный (средняя ширина пасек – около 35 м), с трелевкой стволов за вершину трактором ТДТ-40 по волокам шириной 5...6 м.

На ПП проведено картирование и измерены параметры всех деревьев: протяженность кроны  $L_k$ , площадь ее горизонтальной проекции  $S_k$ , объем пространства  $V_k$ , занятого кроной (рассчитан по  $L_k$  и  $S_k$ ), возраст и принадлежность к ярусу древостоя. При проведении анализа вертикальной структуры древостоя условно выделены следующие ярусы: к первому ярусу были отнесены деревья ели высотой более 13,0 м, ко второму – 4,0...13,0 м, к подросту – 0,1... 4,0 м. В дальнейшем при анализе семеношения подрост ели в расчеты не включался.

Наблюдения за семеношением ели выполняли одновременно (в августе одного года) на всех ПП. Учитывали все семяносящие деревья ели, на которых визуально определяли число шишек по градациям: 1...10, 11...50, 51...100 шт. и далее по градациям в 50 шт. Анализ семеношения ели дан по урожайному для ели 2007 г., который оценен высшим баллом семеношения по шкале А.А. Молчанова [6]. Сравнительный анализ семеношения ели до и после рубки древостоев березы целесообразно проводить по урожайному году, так как в период между урожайными (семенными) годами семеношение ели очень слабое.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

На ПП, заложенных на вырубках, до рубки в составе первого яруса насаждений преобладала береза *Betula pendula* Roth. (58...82 %), представлены осина *Populus tremula* L. (18...34 %) и ель *Picea abies* L. (4...9 %). При анализе семеношения учитывали особенности строения популяции ели в год рубки древостоев березы и давность рубки относительно урожайного 2007 г. На двух участках вырубок в год рубки преобладал подрост ели, но давность рубки в 2007 г. была различной и составляла 15 (ПП 14, 15) и 29 (ПП 23) лет. На участке, где заложены три пробные площади (ПП 20, 21, 22), в год рубки преобладала ель во втором ярусе древостоя березы, давность рубки в 2007 г. составляла также 29 лет. В качестве контрольных для сравнения взяты пробные площади, заложенные в березняках, возраст которых соответствовал сумме значений возрастов до рубки древостоев березы и давности рубки в 2007 г.

На семеношение ели существенно влияют густота, вертикальная и возрастная структура ельника. Рассмотрим особенности семеношения ели на вырубках 15-летней давности с сохранением подростка в связи с возрастной структурой еловой популяции: ПП 14 (Е<sub>кис</sub>) и ПП 15 (Е<sub>чер</sub>) (табл. 1).

До рубки древостоя в 50–60-летних березняках на ПП 14 и 15 сформировался подрост ели, в том числе на 27 % площади подрост был сомкнут, только начиналось формирование второго яруса и семеношение ели. Семеновало лишь около 2 % от общей численности подпологовой ели второго яруса в возрасте более 40 лет [11]. У ели того же возраста в подросте семеношения ели не наблюдалось, что обусловлено ее угнетением более высокими деревьями.



Таблица 1

Количество и возраст семеносящих деревьев ели после рубки древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации и под пологом березняков (2007 г.)

Давность рубки, лет; контроль	№ ПП	Тип и группа типов леса	Всего деревьев ели, * тыс. экз./га	Семеносящие деревья ели										Средний возраст, лет
				Всего		В том числе в возрасте, лет (%)								
				тыс. экз./га	%	31...40	41...50	51...60	61...70	71...80	81...90	91...100	>100	
15	14	Екис	1,68	21	10	58	21	7	(4)**	-	-	-	49	
15	15	Ечер	1,50	0,35	13	30	18	13	18	(15)	(6)	-	54	
14,15	14,15	Екис, чер	1,59	0,20	17	17	44	18	11	(8)	(2)	-	51	
29	23	Екис	2,62	0,28	28	1	35	37	13	(11)	(3)	-	56	
Контроль	2,5,6,24	Бкис, чер	1,06	0,74	9	-	11	25	28	32	(4)	-	66	
<i>Березняки (70...75 лет) со вторым ярусом ели</i>														
29	20	Ечер	1,73	0,10	18	18	21	16	7	6	18	6	63	
22	21	Ечер-сф	2,23	0,32	14	23	25	5	-	11	14	17	64	
20,21,22	22	Екис	1,02	0,31	25	3	30	15	10	10	4	23	67	
Контроль	17,18,19	Бкис, чер	0,78	0,25	17	16	25	12	5	8	13	15	64	
<i>Березняки (90...105 лет) со вторым ярусом ели</i>														
Контроль	17,18,19	Бкис, чер	0,78	0,29	27	-	-	-	-	41	53	6	84	

\* Не включен подрост ели – деревья высотой 0,1...4,0 м.

\*\* В скобках – ель, возобновившаяся до заселения вырубки березой.

В течение 15 лет после рубки таких древостоев ель, находившаяся в подросте, продолжает доминировать в популяции. Вместе с тем после удаления верхнего полога березы рост ели увеличивается, что приводит к быстрой дифференциации ценопопуляции ели и повышению доли лидирующих деревьев. В связи с этим через 15 лет после рубки древостоев березы представленность семеносящих елей увеличивается почти в 3 раза по сравнению с контролем (табл. 1, ПП 14, 15). Средняя высота семеносящих деревьев – около 11 м. Ель в подросте (высотой менее 4 м) не семенит. Возрастной диапазон семеносящих елей составляет 31...90 лет. Преобладает 41–60-летняя ель (62 %), возобновившаяся в первые 10...30 лет после заселения вырубок березой. Количество шишек на елях на ПП 14, 15 в урожайном 2007 г. составляло 5,2 тыс. шт./га, среднее количество шишек на дереве – 25 шт. (табл. 2). На контроле эти показатели были соответственно почти в 5 и в 2,3 раза меньше, что свидетельствует о значительном повышении семеношения ели в течение 15 лет после рубки березы.

Количество семеносящих деревьев ели на ПП 14 несколько выше, чем на ПП 15, что определяется различиями в парцеллярной структуре пробных площадей [10]. Этим же объясняется тот факт, что наибольшее количество семеносящих деревьев на ПП 14 наблюдается в диапазоне возраста 41...50 лет (58 %), на ПП 15 – в 31...40 лет (30 %). На ПП 14 также семенуют ели предварительной генерации в сохранившемся недорубе березы с елью во втором ярусе, возраст которой более 70 лет (до заселения вырубкой березой). При анализе пробные площади в  $E_{\text{кис}}$  и  $E_{\text{чер}}$  были объединены, так как насаждения на всех ПП представлены одним естественным возрастным рядом березняков [8].

Увеличение количества семеносящих деревьев до 28 % отмечено через 29 лет после рубки древостоев березы с сохранением елового подроста (табл. 1, ПП 23). Здесь после рубки березы в древостое преобладали (63 %) деревья первого яруса (высотой более 13,01 м), в котором сосредоточена основная часть (97 %) семеносящих елей. Численность семеносящих деревьев во втором ярусе древостоя незначительна (2 %). На пасаках наблюдается высокая сомкнутость крон первого яруса древостоя, составляющая в среднем около 80 %.

В этих условиях семеношение елей первого и второго ярусов в значительной мере обусловлено их размещением по границе с волоками и связанной с этим лучшей освещенностью крон. Возрастной диапазон семеносящих елей, как и на вырубках 15-летней давности, от 31 до 90 лет. Однако 72 % елей семенуют в достаточно узком диапазоне возраста – 41...60 лет. Количество шишек ели через 29 лет после рубки в урожайном 2007 г. по сравнению с 15-летними вырубками возросло в почти в 6 раз, по сравнению с контролем – в 27 раз (табл. 2). Число семян в зрелой шишке составляет примерно 200 шт. независимо от типа леса [4]. Таким образом, количество семян ели на 15- и 29-летних вырубках (при указанном в табл. 2 количестве шишек) составляет соответственно 1,0 и 5,9 млн шт., т. е. ель успешно выполняет функцию обсеменения.

Таблица 2

Количество шишек на деревьях ели после рубки древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации и под пологом березняков (2007 г.)

Давность рубки, лет; контроль	№ ПП тип леса	Всего шишек*	В том числе на деревьях ели в возрасте, лет **									
			3...40	41...50	51...60	61...70	71...80	81...90	91...100	>100		
15	14 Екис	5,6 25	4 6	48 13	26 19	4 11	(18)*** 73	-	-	-	-	-
	15 Ечер	4,7 25	42 32	19 24	11 20	14 19	(12) 19	(2) 6	-	-	-	-
	14, 15 Екис, чер	5,2 25	19 21	36 15	19 20	9 15	(16) 35	(1) 10	-	-	-	-
	23 Екис	29,6 43	1 11	35 41	28 31	17 54	(15) 53	(4) 58	-	-	-	-
	Контроль	2,5,6,24 Бкис, чер	1,1 11	-	10 9	28 12	29 11	26 9	7 18	-	-	-
29	20 Ечер	33,3 119	9 52	16 80	14 89	5 66	5 85	28 156	9 155	27 111	23 73	(14) 173
	21 Ечер-сф	22,0 86	15 45	16 46	3 74	-	9 63	25 120	27 73	27 111	23 73	(5) 73
	22 Екис	18,0 84	1 18	26 63	15 72	8 54	12 82	2 47	2 73	23 73	23 82	(13) 191
	20, 21, 22 Екис, чер, чер-сф	24,4 95	9 46	19 61	11 77	4 61	8 85	20 127	18 102	18 102	18 102	(11) 162
	Контроль	17, 18, 19 Бкис, чер	3,7 18	-	-	-	-	40 18	56 18	4 17	4 17	-

\*Количество шишек: числитель – тыс.шт./га, знаменатель – в среднем на дереве, шт.  
 \*\*Количество шишек: числитель – в процентах от общего количества шишек, знаменатель – в среднем на дереве, шт.  
 \*\*\*В скобках – ель, возобновившаяся до заселения вырубкой березой.

На ПП 20, 21, 22 до рубки березового 75-летнего полога сформировался сомкнутый второй ярус ели. Рубка древостоя березы (1978 г.) была направлена на сохранение деревьев этого яруса. После рубки сохранилась молодая ель, возраст которой в год рубки 5...40 лет. Часто эта ель гибнет под пологом березы и второго яруса ели. Выживанию ее способствовала не только вырубка древостоя березы, но и последующий отпад части деревьев ели второго яруса, сохранившихся после рубки. Причиной гибели елей второго яруса стали повреждения при падении оставленных мелколиственных пород и ветровал. Таким образом, популяция ели была образована двумя ее поколениями, имеющими разный генезис. Первое поколение возникло в период интенсивного изреживания березняка в возрасте до 50 лет и образовало затем второй ярус в древостое, второе (относительно молодое) появилось позднее. В связи с этим возрастная диапозон семеносящих елей очень широк (31...100 лет) и значительно превышает диапозон таких елей под пологом березняков на контроле в березняках 90...105 лет (71...100 лет), где не наблюдалось двух поколений ели [8]. Через 29 лет после рубки березы с сохранением второго яруса ели доля семеносящих елей в общем количестве деревьев (без учета подраста) составляла 17 % (см. табл. 1, ПП 21, 22) и была ниже, чем на вырубках такого же возраста с сохранением подраста. Средняя высота семеносящих деревьев ели – 16,6 м. Через 29 лет после рубки березы с сохранением деревьев ели второго яруса древостоя общее количество шишек составляло в среднем 24 тыс.шт./га, в среднем на дереве – 95 шт. (табл. 2, ПП 20, 21, 22). По этим показателям ельнички, сформировавшиеся после рубки березы, значительно превосходили ель во втором ярусе березняков на контроле: по общему и среднему на дереве количеству шишек соответственно в 6,5 и 5 раз. Урожайность ели первого поколения (возраст ее более 70 лет) была наиболее высокой, в среднем на дереве – 115 шишек. Урожайность ели второго поколения (возраст 31...70 лет) была почти в 2 раза ниже, шишек в среднем на дереве – 60 шт.

В популяции ели семяносят лидирующие деревья, по высоте и параметрам крон значительно превосходящие несемяносящие (табл. 3). По средней высоте они в 1,4–1,7 раза превосходят несемяносящие деревья, что близко к контролю. Разница между высотами семяносящих елей составляет 3,2 и 4,7 м в ельничках с сохранением подраста и увеличивается до 7,1 м в ельничках с сохранением второго яруса ели, что свидетельствует о значительной дифференциации древостоя по высоте, превышающей показатели на контроле. Семяносят ели с хорошо развитыми кронами. На вырубках 15-летней давности это ели, расположенные по границам пасек и волоков, обеспечивающих боковое освещение крон. По средним параметрам крон они значительно превосходят несемяносящие деревья ели (табл. 3). Эти различия увеличиваются по мере роста ели на вырубках с сохранением подраста и особенно заметны в ельничках с сохранением второго яруса.

Таблица 3

**Характеристики семеносящих (числитель)  
и несеменосящих (знаменатель) деревьев ели**

Давность рубки, лет; контроль	Возраст ели, лет	Средняя высота		Средние параметры крон					
		H, м	Kh*	Протяженность		Площадь проекции		Объем	
				L <sub>k</sub> , м	Kl <sub>k</sub> **	S <sub>k</sub> , м <sup>2</sup>	Ks <sub>k</sub> **	V <sub>k</sub> , м <sup>3</sup>	Kv <sub>k</sub> **
<i>Ельники – после рубки древостоев березы с сохранением подроста ели</i>									
15	51	10,8	1,4	8,8	1,6	7,2	1,8	21,1	2,8
	43	7,6		5,4		4,1		7,4	
29	56	17,0	1,4	10,0	2,0	7,7	2,3	25,7	4,7
	48	12,3		5,0		3,3		5,5	
<i>Березняки (70...75 лет) со вторым ярусом ели</i>									
Контроль	66	15,2	1,4	11,0	1,8	12,7	2,1	46,8	3,8
	54	10,5		6,1		6,0		12,4	
<i>Ельники – после рубки древостоев березы с сохранением деревьев ели второго яруса</i>									
29	64	16,6	1,7	12,1	2,0	11,9	2,8	48,0	5,7
	42	9,5		6,0		4,2		8,4	
<i>Березняки (90...105 лет) со вторым ярусом ели</i>									
Контроль	84	17,8	1,4	9,8	1,6	7,0	1,6	25,6	2,5
	73	12,9		6,2		4,4		10,2	

\* Kh – коэффициент отношения высоты семеносящих деревьев ели к высоте несеменосящих.

\*\* Kl<sub>k</sub>, Ks<sub>k</sub>, Kv<sub>k</sub> – коэффициенты отношений протяженности, площади горизонтальной проекции и объема крон семеносящих деревьев ели к соответствующим параметрам крон несеменосящих.

### Заключение

Семеношение ели предварительной генерации, сохранившейся после рубки древостоев березы, обусловлено густотой и структурой популяции ели под пологом вырубаемого древостоя, количеством, состоянием и возрастной структурой сохранившихся деревьев ели, особенностями формирования популяции ели в период, определяемый давностью рубки. Увеличение прироста и темпов дифференциации деревьев после удаления верхнего яруса березы способствует семеношению ели. В периоды между урожайными годами семеношение ели очень слабое и существенно влияет на последующее возобновление ели не может. Оценку влияния рубки древостоев на семеношение ели целесообразно выполнять по урожайным годам. Семеносят деревья, лидирующие в популяции ели. По высоте и развитости крон они значительно превосходят несеменосящие деревья. Количество семеносящих елей составляет в среднем около 20 % от общей численности деревьев ели (без учета подроста), сохранившихся через 15...30 лет после рубки березы. После сплошной рубки древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации увеличивается количество семеносящих деревьев и значительно (в 5–6 раз)

повышается урожайность ели. В урожайные годы популяция ели предварительной генерации, формирующаяся после рубки древостоев березы, успешно выполняет функцию обсеменения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Молчанов А.А. Семеношение сосновых и еловых насаждений Севера // Лесн. хоз-во. 1938. № 2. С. 4–7.
2. Барабин А.И. Прогнозирование и учет урожая семян в ельниках Архангельской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 1974. 20 с.
3. Барабин А.И. Закономерности семеношения ели на Европейском Севере и основы лесосеменного прогнозирования: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1990. 35 с.
4. Глазов М.В. Структура и особенности функционирования биоты ельников южной тайги Валдая // Организация экосистем ельников южной тайги. М.: Ин-т географии АН СССР, 1979. С. 10–39.
5. Львов П.Н., Ипатов Л.Ф., Плохов А.А. Лесообразовательные процессы и их регулирование на Европейском Севере. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 112 с.
6. Молчанов А.А. География плодоношения главнейших древесных пород СССР. М.: Наука, 1967. 104 с.
7. Пастухова П.Н. Плодоношение сосны и ели в лесах Архангельской области // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере. М.: Наука, 1967. С. 87–100.
8. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Рост ели под пологом южно-таежных березняков и после рубки их с сохранением подроста // Лесн. журн. 2007. № 2. С. 2–10. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Восстановительно-возрастная динамика популяций ели под пологом южно-таежных березняков при демулационном процессе // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент (памяти А.И. Уткина). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2009. 350 с.
10. Рыбакова Н.А., Рубцов М.В. Динамика парцеллярной структуры фитоценозов на вырубках с елью предварительной генерации // Многолетние процессы в природных комплексах заповедников России: материалы Всерос. науч. конф., посвященной 80-летию ЦЛГПБЗ. Великие Луки, 2012. С. 208–212.
11. Рыбакова Н.А., Рубцов М.В. Семеношение ели под пологом южно-таежных березняков // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014. № 1. С. 73–79.
12. Тимофеев В.П. Плодоношение еловых насаждений // Лесн. хоз-во. 1939. № 7. С. 15–22.
13. Andersson E. Cone and Seed Studies in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Stud. For. Suec.* 1965. Vol. 1. 214 p.
14. Pukkala T., Hokkanen T., Nikkanen T. Prediction Models for the Annual Seed Crop of Norway Spruce and Scots Pine in Finland // *Silva Fennica.* 2010. Vol. 44. No. 4. Pp. 629–642.

Поступила 28.06.16

UDC 630\*181.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.21

**Effect of Birch Stand Cutting on Seed Production of Spruce of Preliminary Generation in the South Taiga**

*N.A. Rybakova, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Research Officer*

*M.V. Rubtsov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, Uspenskoe, Moscow region, 143030, Russian Federation; e-mail: 1986620@gmail.com

The observational study on the permanent sample plots establishes the features of spruce seed production in 15 and 29 years after a clear cutting of birch stands with the preservation of spruce undergrowth and in 29 years with the preservation of spruce in the second tier. For comparison (as a control) we use data of spruce seed production under the canopy of birch forests at the age of 70...75 and 90...105 years. The studies are carried out in the south taiga birch forests of the sorrel and myrtillus forest type group. The analysis of spruce seed production is given for a year, which is ranked by the highest grade of seeding. In felling with the preservation of undergrowth in 15 years after the removal of a birch tier the number of seed productive spruces increases almost 3-fold compared with the control, the total number of cones increases 5-fold, the mean number of cones on a tree – by 2.3 times, that indicates a significant increase of spruce seed production. 29 years after cutting as compared to the control the number of seed productive spruces increases by 7.4 times, the number of cones – by 27 times, the average number of cones on a tree – by 4 times. In the 29 year felling with the preserved second tier of spruce (forest thinners) after birch cutting we observe a significant mortality. The number of seed productive spruces is 2.6 times less than in the clearings of the same age with the preservation of undergrowth, but 1.4 times more than the spruce seed production in the second tier of birch forests at the control. Seed productive spruces exceed an average height by 1.4–1.7 times, the average volume of crowns – by 2.8–5.7 times. These differences increase in proportion to the spruce growth in the clearings with the preservation of undergrowth and are especially noticeable in the spruce forests with the preservation of the second tier.

*Keywords:* south taiga, birch stand, cutting with spruce preservation, spruce seed production.

REFERENCES

1. Alekseev S.V., Molchanov A.A. Semenoshenie sosnovykh i elovykh nasazhdeniy Severa [Pine and Spruce Seed Production]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1938, no. 2, pp. 4–7.
2. Barabin A.I. *Prognozirovaniye i uchet urozhaev semyan v el'nikakh Arkhangel'skoy oblasti*: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk [Forecasting and Accounting of Seed Harvests in the Spruce Forests of the Arkhangelsk Region: Cand. Agr. Sci. Diss. Abs.]. Arkhangelsk, 1974. 20 p.

---

*For citation:* Rybakova N.A., Rubtsov M.V. Effect of Birch Stand Cutting on Seed Production of Spruce of Preliminary Generation in the South Taiga. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 21–31. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.21



3. Barabin A.I. *Zakonomernosti semenosheniya eli na Evropeyskom Severe i osnovy lesosemennogo prognozirovaniya*: avtoref. dis. ... d-ra s.-kh. nauk [Patterns of Spruce Seed Production in the European North and the Basics of Forest Seed Prediction: Dr. Agr. Sci. Diss. Abs.]. Moscow, 1990. 35 p.

4. Glazov M.V. *Struktura i osobennosti funktsionirovaniya bioty el'nikov Valdaiya* [Structure and Performance Features of the Biota of Spruce Forests of the Valdai South Taiga]. *Organizatsiya ekosistem el'nikov yuzhnoy taygi* [Organization of Spruce Forest Ecosystems of the South Taiga]. Moscow, 1979, pp. 10–39.

5. L'vov P.N., Ipatov L.F., Plokhov A.A. *Lesoobrazovatel'nye protsessy i ikh regulirovanie na Evropeyskom Severe* [Forest Formation Processes and Their Regulation in the European North]. Moscow, 1980. 112 p.

6. Molchanov A.A. *Geografiya plodonosheniya glavneyshikh drevesnykh porod SSSR* [Geography of Fruit Bearing of the Most Important Woody Species of the USSR]. Moscow, 1967. 104 p.

7. Pastukhova P.N. *Plodonoshenie sosny i eli v lesakh Arkhangel'skoy oblasti* [Pine and Spruce Fruiting in the Forests of the Arkhangelsk Region]. *Voprosy taezhnogo lesovodstva na Evropeyskom Severe* [Problems of the Taiga Forestry in the European North]. Moscow, 1967, pp. 87–100.

8. Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Rost eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov i posle rubki ikh s sokhraneniem podrosta* [Spruce Growth Under the Canopy of Southern-Taiga Birch Forests and After Their Cutting with Undergrowth Preservation]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2007, no. 2, pp. 2–10.

9. Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Vosstanovitel'no-vozrastnaya dinamika populyatsiy eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov pri demutatsionnom protsesse* [Regenerative and Age Dynamics of Spruce Populations Under the Canopy of the South Taiga Birch Forests in the Demutative Process]. *Produksionnyy protsess i struktura lesnykh biogeotsenozov: teoriya i eksperiment (pamyati A.I. Utkina)* [Production Process and the Structure of Forest Ecosystems: Theory and Experiment (in Memory of A.I. Utkin)]. Moscow, 2009. 350 p.

10. Rybakova N.A., Rubtsov M.V. *Dinamika partsellyarnoy struktury fitotsenozov na vyrubkakh s el'yu predvaritel'noy generatsii* [Dynamics of the Phytocenoses Parcel Structure in the Clearings with Spruce of Preliminary Generation]. *Mnogoletnie protsessy v prirodnykh kompleksakh zapovednikov Rossii: materialy Vseros. nauch. konf., posvyashchennoy 80-letiyu Tsentral'no-Lesnogo Gosudarstvennogo Prirodnogo Biosfernogo Zapovednika* [Long-Term Processes in Natural Complexes of Reserves in Russia: Proc. All-Russ. Sci. Conf., Dedicated to the 80th Anniversary of the Central Forest State Nature Biosphere Reserve]. Velikie Luki, 2012, pp. 208–212.

11. Rybakova N.A., Rubtsov M.V. *Semenoshenie eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov* [Seed Production of Spruce Under the Canopy of Birch Forests in the South Taiga]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2014, no. 1, pp. 73–79.

12. Timofeev V.P. *Plodonoshenie elovykh nasazhdeniy* [Fruiting of Spruce Stands]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1939, no. 7, pp. 15–22.

13. Andersson E. *Cone and Seed Studies in Norway Spruce (Picea abies (L.) Karst.)*. *Stud. For. Suec.*, 1965, vol. 1, 214 p.

14. Pukkala T., Hokkanen T., Nikkanen T. *Prediction Models for the Annual Seed Crop of Norway Spruce and Scots Pine in Finland*. *Silva Fennica*, 2010, vol. 44, no. 4, pp. 629–642.

Received on June 28, 2016

УДК 630\*232.411.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.32

## ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО СЕЯНЦАМИ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

*В.К. Ширнин, д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.*

*В.А. Кострикин, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.*

*Л.В. Ширнина, д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.*

*С.А. Крюкова, мл. науч. сотр., асп.*

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

Проведена проверка возможности и эффективности использования посадочного материала дуба черешчатого с закрытой корневой системой на предмет предположения об инновационной ценности этого способа для лесного хозяйства. Лесокультурная и экономическая эффективность способа исследовалась в течение 2011–2015 гг. в трех лесничествах Тамбовской области путем высадки на площадях лесовосстановления саженцев с открытой и закрытой корневыми системами. Установлено, что по показателям приживаемости, сохранности и скорости роста сеянцев двух типов статистически достоверная разница отсутствует. Расчет затрат на выполнение комплекса работ по созданию частичных культур дуба на вырубке посадкой сеянцев с открытой и закрытой корневыми системами на прямолинейных полосах с предварительным понижением надземных частей пней и проведением уходов до 7-летнего возраста выполнен с учетом экономической ситуации, сложившейся в Воронежском лесном селекционно-семеноводческом центре. Установлено, что средняя цена сеянца с открытой корневой системой на рынке лесостепной зоны европейской части России в 6,4 раза меньше стоимости сеянца с закрытой корневой системой. При посадке 4 тыс. растений на 1 га затраты на создание лесных культур с закрытой корневой системой в 2 раза выше, чем с открытой. Для широкого внедрения в лесокультурную практику сеянцев дуба с закрытой корневой системой необходимо усовершенствовать технологию их выращивания (уменьшить себестоимость).

*Ключевые слова:* лесные культуры, дуб черешчатый, закрытая корневая система, рост сеянцев, экономическая эффективность.

### *Введение*

Закладка культур сеянцами с закрытой корневой системой (ЗКС), получившая широкое распространение в Скандинавии (для хвойных пород), признана инновационной технологией лесовосстановления [11]. Опыты с выращиванием дуба красного проводились в Швеции, Дании и Польше [8], но конечные

---

*Для цитирования:* Ширнин В.К., Кострикин В.А., Ширнина Л.В., Крюкова С.А. Лесовосстановление дуба черешчатого сеянцами с закрытой корневой системой // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 32–41. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.32

результаты этих опытов неизвестны. В США выращивались сеянцы дуба красного северного, в основном (98 %) в открытом грунте, т. е. с открытой корневой системой (ОКС), в производственных питомниках, но для посадок лесных культур на нарушенных землях использовались сеянцы с ЗКС [9, 10].

В целях внедрения инновационных технологий в селекционном семеноводстве на территории Российской Федерации были организованы шесть селекционно-семеноводческих центров (ССЦ), на трех из которых планируется выращивать посадочный материал дуба с ЗКС.

Доля посадочного материала с ЗКС в общем количестве посадочного материала стала одним из показателей Государственной программы РФ «Развитие лесного хозяйства на 2013–2020 гг.», утвержденной Постановлением Правительства РФ № 318 от 15 апреля 2014 г. [5].

Перспективы и направления применения сеянцев хвойных пород с ЗКС были описаны 25 лет назад А.В. Жигуновым с соавторами [2], в 2013 г. – Д.С. Бурцевым, Т.С. Мусаралиевым [1]. Лесоводственная и экономическая эффективность выращивания лесных культур дуба, созданных сеянцами с ЗКС, на территории России не изучалась. Вопрос о целесообразности закладки лесных культур дуба сеянцами с ЗКС, не апробированной на практике, является предметом острых дискуссий. Краткая (устная) информация о внедрении новой технологии на Северном Кавказе свидетельствует об отсутствии ее преимуществ перед контролем (закладкой культур сеянцами, выращенными в открытом грунте, т. е. с ОКС).

Необходимо отметить, что новыми технологиями планируется заменить традиционные технологии лесовосстановления дубрав. Речь идет не о единичных посадках, а о лесокультурных работах на больших площадях различных категорий. Площади, занятые под закладку лесных культур дуба в лесостепной зоне европейской территории России в 2007–2011 гг., составили 9497,5 га, планируемый показатель на 2012–2016 гг. – 8033,8 га. В степной зоне соответственно 4123,9 и 2338,7 га. Очевидно, что производству потребуется четкая технологическая цепочка выполнения работ и оплаты труда для всего цикла лесокультурных работ, которая в настоящее время отсутствует. Априори ясно, что использование сеянцев с ЗКС приведет к значительному удорожанию процесса лесовосстановления дубрав.

Выращивание сеянцев с ЗКС предусматривает использование селекционно улучшенных желудей дуба, полученных с объектов постоянной лесосеменной базы (ПЛСБ). Однако, как показывает опыт инвентаризации, таких объектов надлежащего качества явно не достаточно даже в зоне активной селекции, какой является Центральное Черноземье. На территории ЦЧО только в Тамбовской области работа поставлена должным образом (руководитель управления – Н.И. Пономарев, научное руководство – В.К. Ширнин), что позволит полностью обеспечить производство желудями улучшенной селекционной категории. Здесь в трех лесничествах аттестовано 85 плюсовых деревьев, выделено 12,0 га плюсовых насаждений и 1 генетический резерват на площади 258 га, заложено 31,0 га

семейственных лесосеменных плантаций (ЛСП), на площади 5,0 га создан постоянный лесосеменной участок (ПЛСУ) улучшенными семенами. Вновь созданные ССЦ из-за недостаточного количества желудей улучшенной селекционной категории вынуждены использовать нормальный семенной материал. Поэтому мы сочли целесообразным впервые провести экспериментальные опыты в целях получения сравнительных материалов по созданию лесных культур дуба сеянцами с ЗКС и ОКС из улучшенных семян.

#### *Материалы и методы исследования*

Желуди собирали в 2010 г. с плюсовых деревьев двух микропопуляций: первая расположена в центральной левобережной пойме р. Ворона Тамбовской области (Кирсановское лесничество; кв. 13, 17, 23, 39; возраст деревьев 80...100 лет; феноформа ранняя), вторая – в Шиповом лесу Воронежской области (Красное участковое лесничество; кв. 41, 42, 32, 57 и др.; свежая нагорная дубрава; возраст деревьев 150...170 лет; феноформа поздняя).

Желуди из Шипова леса сразу использовали при закладке ЛСП в Шехманском участковом лесничестве Тамбовской области посевом под зиму в октябре 2010 г. Желуди из Кирсановского лесничества хранили зимой в траншеях, весной 2011 г. высевали в питомнике, а затем в однолетнем возрасте использовали (май 2012 г.) для высадки на лесокультурную площадь.

Одна часть (48 вариантов, около 2 тыс. сеянцев на 1 га) желудей указанных популяций была высеяна в Воронеже (дендрочасток ФГБУ ВНИИЛГИСбиотех) в пластмассовые контейнеры с отверстиями для аэрации и стока воды (объем – около 2000 см<sup>3</sup>, высота – 24 см, верхний диаметр – 13 см, нижний – 12 см). В качестве субстрата использовали грунт следующего состава: низинный торф – 50 %, сосновые опилки с добавлением азотистых удобрений – 50 %. Прием «воздушная подрезка» при выращивании сеянцев не использовали. Вторая часть (97 вариантов ОКС, около 3 тыс. сеянцев на 1 га) желудей параллельно была высеяна в открытый грунт строчками с расстоянием между рядами 15 см, в рядах – 10 см. Осенние замеры однолетних сеянцев показали статистически достоверное ( $t_g = 22,78$  при  $P_{0,05}$ ) превышение по росту в высоту сеянцев с ОКС ( $18,9 \pm 0,32$  см) по сравнению с сеянцами с ЗКС ( $11,0 \pm 0,14$  см) [6]. Измерения диаметра стволиков не проводили, поскольку известно, что высота и диаметр стволиков коррелируют, поэтому для первичной оценки мы сочли достаточным измерять только высоту. Визуально у сеянцев с ЗКС отмечены деформация корней (искривление) и плохое развитие стержневого корня дуба.

Сеянцами из микропопуляций Тамбовской области были заложены ЛСП (размещение 6×8 м) в Кирсановском (4,6 га) и Уваровском (2,0 га) лесничествах. Сеянцы с ЗКС и ОКС одинакового происхождения высаживали под лопату в один день по два на каждом посадочном месте на расстоянии 1 м согласно схеме смешения полусибсов плюсовых деревьев на ЛСП.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Первая осенняя инвентаризация культур показала высокую приживаемость саженцев с ЗКС и ОКС во всех вариантах (около 100 %). В конце второго

вегетационного периода 2014 г. сохранность в Уваровском и Шехманском лесничествах составляла от 78 до 95 %, в Кирсановском – 46...57 % (рис. 1).

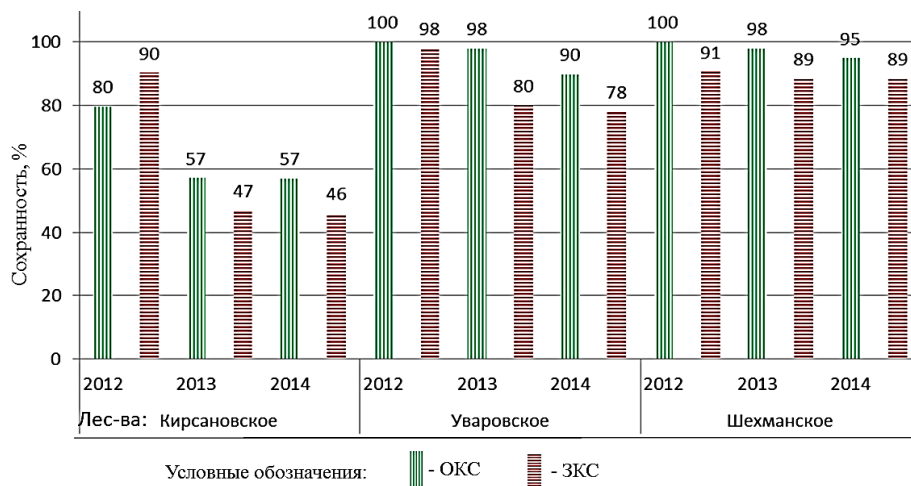
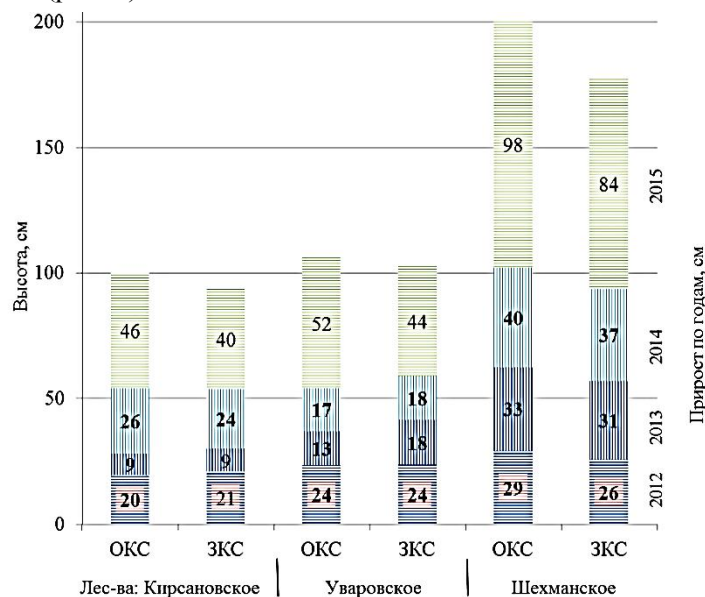


Рис. 1. Сохранность саженцев с ОКС и ЗКС

Большой отпад саженцев в Кирсановском лесничестве объясняется механическим повреждением растений при выполнении агротехнического механизированного ухода. Посадочные места с погибшими растениями были дополнены потомством с ЗКС или ОКС от соответствующих варианту плюсовых деревьев. Через 3 года на всех участках опыта наблюдалась более высокая (на 10 %) сохранность саженцев с ОКС. Таким образом, уже на четвертый год роста дубков наметилась тенденция преимущественного развития сеянцев, посаженных с ОКС (рис. 2).

Рис. 2. Высота и прирост саженцев с ОКС и ЗКС в 2012–2015 гг.



Однако эти различия между вариантами характеризуются низкими показателями критерия достоверности различий в приростах (кроме посадок Шехманского лесничества), что можно объяснить более высоким плодородием почвы (рис. 3).

Рис. 3. Саженьцы на ЛСП в Шехманском лесничестве (фото 2014 г.)



Динамика роста саженцев двух типов по высоте изучена в 2013–2014 гг. Замеры приростов проводили пятикратно в течение каждого вегетационного периода. Синхронность роста отмечена во всех посадках как в 2013 г. (рис. 4), так и 2014 г., что подтверждается очень высокими (не ниже 0,9) значениями коэффициентов корреляции между временными рядами приростов по высоте.

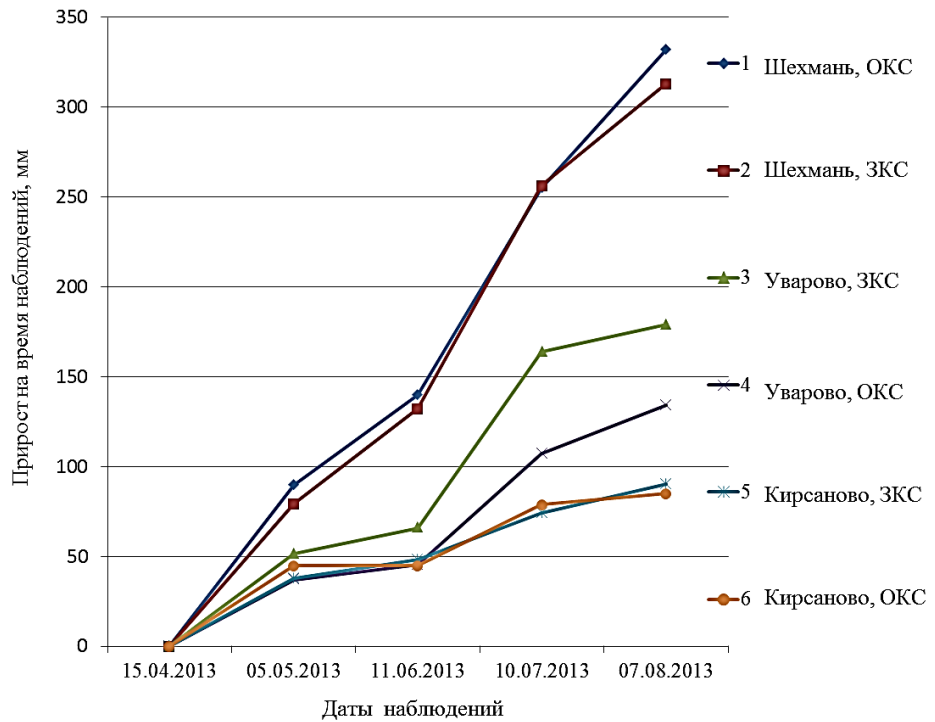


Рис. 4. Динамика роста саженцев с ЗКС и ОКС в 2013 г. по лесничествам

Замеры толщины стволиков дубков в опытных культурах показали, что она варьирует во всех трех лесничествах, а различия между вариантами, созданными из семян с ОКС и ЗКС, статистически недостоверны (табл. 1).

Таблица 1

**Сравнительная характеристика толщины ствола дубков (мм)  
в опытных культурах Тамбовской области**

Толщина ствола	Значение показателя для лесничества, типа семянца, использованного для создания культур (число сеянцев, шт.)					
	Шехманское		Кирсановское		Уваровское	
	ЗКС (37)	ОКС (32)	ЗКС (31)	ОКС (43)	ЗКС (42)	ОКС (47)
Лимит	16...45	10...46	6...26	2...37	7...34	10...34
Среднее	25	28	14	15	5	6
Стандартное отклонение	7	9	5	6	6	6
Доверительный интервал	2,2	3,1	1,9	1,9	1,9	1,8

Приведенные материалы позволяют сделать однозначный вывод о том, что сеянцы двух типов во всех вариантах опытных посадок, независимо от местоположения, плодородия почвы и способа создания лесных культур, характеризуются синхронностью роста по высоте и одинаковой динамикой прироста.

Для лесохозяйственной практики важно обоснование экономической целесообразности создания лесных культур дуба сеянцами с ЗКС. Расчет затрат на их выращивание выполнен с учетом экономической ситуации, сложившейся в Воронежском лесном селекционно-семеноводческом центре.

Для установления затрат на обеспечение комплекса работ по выращиванию сеянцев были предварительно разработаны расчетно-технологические карты (РТК), учитывающие все технологические операции и расходы. Цены на один сеянец, рассчитанные по РТК, использованы при расчете стоимости создания частичных культур дуба на вырубке посадкой сеянцев с ЗКС и ОКС из желудей плюсовых деревьев на прямолинейных полосах с предварительным понижением надземных частей пней и проведением уходов до 7-летнего возраста. При составлении технологических карт использован сборник [7], стоимость создания объектов рассчитана калькулированием по Методическим рекомендациям [3] в ценах 2014 г.

Цена однолетнего семянца дуба с ЗКС в контейнерах объемом 2000 см<sup>3</sup>, рассчитанная по [3], составляет 15,38 р. Наибольшая доля затрат приходится на материалы (рис. 5). В составе материалов: желуди, торфяной субстрат, касеты и подставки. Средняя цена семянца с ОКС, сложившаяся на рынке лесостепной зоны европейской части России, – 2,40 р., т. е. в 6,4 раза меньше, чем семянца с ЗКС.

Согласно действующим Правилам лесовосстановления [4], лесные культуры в лесостепном районе европейской части России рекомендуется создавать с густотой не менее 4 тыс. шт. / га. При посадке лесных культур сеянцами с ЗКС допускается снижение количества высаживаемых растений до 2 тыс. шт. / га (для саженцев дуба с ЗКС – до 1 тыс. шт. / га).

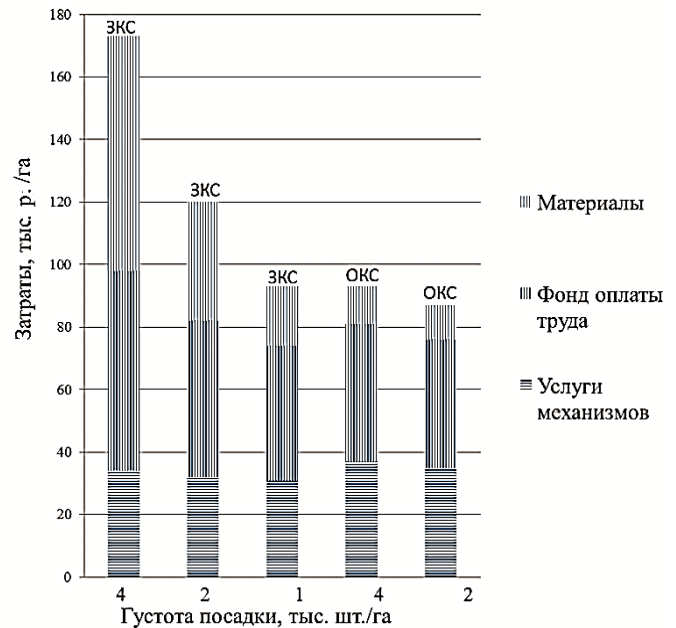


Рис. 5. Структура затрат на выращивание сеянцев дуба с ЗКС

Технологическая схема создания лесных культур дуба на вырубках, принятая нами для расчетов, включает подготовку участка, понижение пней бензопилой до уровня почвы, нарезку борозд плугом ПКЛ-70, посадку (механизированную – для сеянцев с ОКС, ручную – с ЗКС), агротехнические и лесоводственные уходы до 7-летнего возраста дуба.

При густоте посадки 4 тыс. шт. / га около половины всех затрат составляют затраты на посадочный материал с ЗКС (рис. 6).

Рис. 6. Прямые затраты на создание лесных культур дуба при разной густоте посадки с использованием сеянцев с ЗКС и ОКС





При густоте посадки 1...2 тыс. шт. / га уменьшаются общая стоимость, расходы на материалы и оплату ручного труда. Затраты на создание культур при густоте 1 тыс. шт. / га семян с ЗКС и 4 тыс. шт. / га семян с ОКС, что допускается действующими Правилами лесовосстановления [4], одинаковы (табл. 2).

Таблица 2

## Структура затрат на создание лесных культур дуба

Посадочный материал	Густота посадки, тыс. шт./га	Потребность		Затраты, тыс. р.			
		агрегата-смен	чел./дн.	Услуги механизмов	Фонд оплаты труда	Материалы	Всего основных
ЗКС	4	21	63	34	64	75	173
	2	19	47	32	50	38	120
	1	18	39	31	43	19	93
ОКС	4	21	36	37	44	12	93
	1	20	34	35	41	11	87

Такой формальный вывод, с нашей точки зрения, не совсем корректен, так как он базируется на предпосылке эффективности уменьшения густоты посадки сеянцами с ЗКС. Наши исследования в 2012–2015 гг. свидетельствуют о том, что использование сеянцев дуба с ЗКС, ввиду значительно большей их себестоимости, пока не достаточно обосновано даже при снижении плотности посадки до 2 тыс. шт. / га. Необходимо проводить дальнейший работы по снижению себестоимости посадочного материала и продолжать опытную проверку роста культур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцев Д.С., Масаралиев Т.С. Обзор мировой практики выращивания сеянцев дуба с закрытой корневой системой // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 22–24 мая 2013 г., С.-Петербург. Ч. 1. СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. С. 111–122.
2. Жигунов А.В., Гомельский Ю.Н., Маслаков Е.Л. Производство контейнеризированных сеянцев. Л.: ЛенНИИЛХ, 1990. 31 с.
3. Методические рекомендации по формированию цен на производимые товары, выполняемые работы и услуги, оказываемые организациями, находящимися в ведении Федерального агентства лесного хозяйства, на платной основе, и начальных (стартовых) цен на лесохозяйственные работы и услуги, закупаемые для государственных нужд. М.: Рослесхоз, 2005. 7 с.
4. Правила лесовосстановления: утв. приказом Министерства природных ресурсов РФ от 5 нояб. 2013 г. № 479. Режим доступа: <http://rosleshoz.gov.ru>
5. Развитие лесного хозяйства на 2013–2020 гг.: государственная программа Российской Федерации: утв. распоряжением Правительства РФ от 28 дек. 2012 г. № 2593-Р (в редакции Постановления Правительства РФ от 15 апр. 2014 г. № 318). Режим доступа: <http://rosleshoz.gov.ru>
6. Разработка предложений по совершенствованию лесного семеноводства и выращивания посадочного материала дуба: отчет о НИР (промежуточ.) / НИИ лесной генетики и селекции; рук. В.К. Ширнин. ГР 01201178395. Воронеж, 2011. 332 с.

7. Технологические карты на готовые объекты, продукцию и услуги в лесном хозяйстве. М.: ВНИИЦлесресурс, 1989. 191 с.

8. Карлссон С. Выращивание саженцев дуба с закрытой корневой системой (Советник по лесопитомническим хозяйствам, Арбос, Швеция): Режим доступа: <http://lessnabr.ru/pribory-i-oborudovanie-dlya-lesnogo-hozyajstva/lesovosstanovlenie/vyrashivanie-seyancev-s-zks>.

9. Jacobs D.F. *Nursery Production of Hardwood Seedlings*. Available at: [http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2003/nc\\_2003\\_jacobs\\_001.pdf](http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2003/nc_2003_jacobs_001.pdf).

10. Salifu K.F., Jacobs D.F., Birdge Z.K.D. Nursery Nitrogen Loading Improves Field Performance of Bareroot Oak Seedlings Planted on Abandoned Mine Lands // *Restoration Ecology*. 2009. No. 17(3). Pp. 339–349.

11. Tervo L. Technical Development in Seedling Production in Finland // *Baltic Forestry*. 1999. Vol. 5. No. 2. Pp. 60–66.

Поступила 14.11.16

UDC 630\*232.411.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.32

### English Oak Reforestation by Ball-Rooted Seedlings

*V.K. Shirnin, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher*

*V.A. Kostrikin, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher*

*L.V. Shirnina, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher*

*S.A. Kryukova, Research Assistant, Postgraduate Student*

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology,

ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: [ilgis@lesgen.vrn.ru](mailto:ilgis@lesgen.vrn.ru)

We conducted the ability and efficiency test of the use of the English oak ball-rooted seedlings to demonstrate the innovative value of this method for forestry. Silvicultural and economic efficiency of the process was studied during 2011–2015 in three forest districts of the Tambov region by planting bareroot and ball-rooted seedlings. The statistically significant difference in terms of survival, safety and rate of growth of seedlings of two types is not observed. The calculation of costs for a range of works on creation of partial oak plantations in the felling by planting bareroot and ball-rooted seedlings on straight strips with the advanced fall of the aerial parts of stumps and thinning up to 7 years of age is carried out taking into account the economic situation in the Voronezh forest selective seed center. The average price of one bareroot seedling in the market of the forest-steppe zone of the European part of Russia is by 6.4 times less than the cost of a ball-rooted seedling. When planting 4,000 seedlings per 1 ha the costs of the forest ball-rooted plantations establishing is twofold than the costs of the bareroot ones. The cultivation technology should be improved for a broad introduction of the oak ball-rooted seedlings into the silvicultural practices (to reduce cost).

*Keywords:* forest plantation, English oak, root-balled tree system, seedling growth, economic effectiveness.

---

*For citation:* Shirnin V.K., Kostrikin V.A., Shirnina L.V., Kryukova S.A. English Oak Reforestation by Ball-Rooted Seedlings. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 32–41. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.32

REFERENCES

1. Burtsev D.S., Masaraliev T.S. Obzor mirovoy praktiki vyrashchivaniya seyantsev duba s zakrytoy kornevoy sistemoy [A Review of the International Cultivation Practice of Oak Ball-Rooted Seedlings]. *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaystve–2013: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 22–24 maya 2013 g., S.-Peterburg, ch. 1* [Innovations and Technologies in Forestry–2013: Proc. 3d Intern. Sci. Pract. Conf. May 22–24, 2013, Saint Petersburg, Part 1]. Saint Petersburg, 2013, pp. 111–122.
2. Zhigunov A.V., Gomel'skiy Yu.N., Maslakov E.L. *Proizvodstvo konteynerizirovannykh seyantsev* [Production of Containerized Seedlings]. Leningrad, 1990. 31 p.
3. *Metodicheskie rekomendatsii po formirovaniyu tsen na proizvodimye tovary, vypolnyaemye raboty i uslugi, okazyvaemye organizatsiyami, nakhodyashchimisya v vedenii Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva, na platnoy osnove, i nachal'nykh (startovykh) tsen na lesokhozyaystvennye raboty i uslugi, zakupaemye dlya gosudarstvennykh nuzhd* [Methodical Recommendations on Price Formation of Manufactured Goods, Performed Works and Services Rendered by the Organizations, Administered by the Federal Forestry Agency, on a Fee Basis, and the Initial (Starting) Prices for Forestry Works and Services Procured by the Government]. Moscow, 2005. 7 p.
4. *Pravila lesovosstanovleniya: utv. prikazom Ministerstva prirodnnykh resursov RF ot 5 noyab. 2013 g. № 479* [Rules of Reforestation]. Available at: <http://rosleshoz.gov.ru>.
5. *Razvitie lesnogo khozyaystva na 2013–2020 gg.: gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 28 dek. 2012 g. № 2593-R (v redaktsii Postanovleniya Pravitel'stva RF ot 15 apr. 2014 g. № 318)* [The Development of Forestry for 2013–2020: State Program of the Russian Federation: Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 28 December 2012, No. 2593-R (in Edition of the Resolution of the Government of the Russian Federation of 15 April 2014, No. 318)]. Available at: <http://rosleshoz.gov.ru>.
6. *Razrabotka predlozheniy po sovershenstvovaniyu lesnogo semenovodstva i vyrashchivaniya posadochnogo materiala duba: otchet o NIR (promezhutoch.)* [Development of Proposals for Improving the Forest Seed Farming and Cultivation of Oak Seedlings]. *III lesnoy genetiki i selektsii* [Institute of Forest Genetics and Breeding]. Voronezh, 2011. 332 p.
7. *Tekhnologicheskie karty na gotovye ob"ekty, produktsiyu i uslugi v lesnom khozyaystve* [Technological Charts for Stock Objects, Products and Services in Forestry]. Moscow, 1989. 191 p.
8. Karlsson S. *Vyrashchivanie sazhentsev duba s zakrytoy kornevoy sistemoy (Sovetnik po lesopitomnicheskim khozyaystvam, Arbos, Shvetsiya)* [Growing of Oak Ball-Rooted Seedlings (Advisor in Forest Nursery Farms, Arbos, Sweden)]. Available at: <http://lessnabr.ru/pribory-i-oborudovanie-dlya-lesnogo-hozyajstva/lesovosstanovlenie/vyrash-ivanie-seyancev-s-zks>.
9. Jacobs D.F. *Nursery Production of Hardwood Seedlings*. Available at: [http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2003/nc\\_2003\\_jacobs\\_001.pdf](http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2003/nc_2003_jacobs_001.pdf).
10. Salifu K.F., Jacobs D.F., Birdge Z.K.D. Nursery Nitrogen Loading Improves Field Performance of Bareroot Oak Seedlings Planted on Abandoned Mine Lands. *Restoration Ecology*, 2009, no. 17(3), pp. 339–349.
11. Tervo L. Technical Development in Seedling Production in Finland. *Baltic Forestry*, 1999, vol. 5, no. 2, pp. 60–66.

Received on November 14, 2016

УДК 630\*5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.42

## **СВЯЗЬ МЕЖДУ СРЕДНИМИ ТАКСАЦИОННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДРЕВОСТОЕВ БЕРЕЗЫ В КРАСНОЯРСКО-АЧИНСКО-КАНСКОМ ЛЕСОСТЕПНОМ РАЙОНЕ**

*С.Л. Шевелев, д-р с.-х. наук, проф.  
М.Н. Ефремова, асп.*

Сибирский государственный технологический университет, пр. Мира, д. 82, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: taksator@sibstu.Rts.ru, tenia@mail.ru

В работе проведен анализ зависимостей между средними таксационными показателями лесных массивов с доминированием березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в лесостепной зоне Средней Сибири. Объектом исследования являлся лесной массив с абсолютным преобладанием березовых древостоев, который расположен на территории Манского лесничества Красноярского края. В основу изучения положены данные натурной таксации 1212 таксационных выделов. Выбранный лесной массив типичен для лесных систем Красноярско-Ачинско-Канского лесостепного района, в нем преобладают древостои травяной группы типов леса. Условия местопроизрастания березовых древостоев благоприятны и характеризуются средним классом бонитета – II. Основную массу березняков в лесном массиве представляют средневозрастные древостои. На первом этапе была проведена первичная статистическая обработка данных. Анализ рядов средних таксационных характеристик в пределах групп возраста показал, что они соответствуют рядам нормального распределения или близки к ним. Так как установление связей проводили на типологической основе, то на следующем этапе были проанализированы парные связи между средними таксационными показателями в древостоях преобладающих типов леса – березняках осочково-разнотравном и вейниково-разнотравном. Оказалось, что древостои двух типов леса можно отнести к одной генеральной совокупности. Также были вычислены уравнения, отображающие динамику средних высот и средних диаметров березняков, рассмотрена обусловленность формирования запаса древостоя величинами средних высот, средних диаметров и относительных полнот. В результате были получены уравнения множественной регрессии. Проверка точности определения запасов по уравнениям была проведена путем сопоставления с данными Стандартной таблицы Центрального научно-исследовательского института лесного хозяйства, а также с материалами пробных площадей. Оказалось, что величина отклонений близка к полученной по уравнениям. Завершающей частью работы явилось определение парной зависимости между средними высотами древостоев травяной группы типов леса и средними диаметрами. В результате были установлены множественные и парные регрессионные зависимости между средними таксационными показателями для березовых

---

*Для цитирования:* Шевелев С.Л., Ефремова М.Н. Связь между средними таксационными показателями древостоев березы в Красноярско-Ачинско-Канском лесостепном районе // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 42–51. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.42

древостоев травяной группы типов леса. Полученные уравнения могут быть использованы при дешифрировании данных лесной аэрофотосъемки и построении таксационных нормативов.

*Ключевые слова:* лесной массив, березовые древостои, средний диаметр, средняя высота, относительная полнота, запас стволовой древесины.

### *Введение*

Лесной массив, являясь структурной составляющей лесной системы, формируется далеко не случайно, а под воздействием ряда факторов (климатических, почвенных, орографических) и особенностей лесообразовательных процессов (характера смены древесных пород, динамики таксационных показателей, слагающих массив древостоев и др.). В работах ряда авторов [2, 3, 5, 8, 9] доказывается наличие математического единства в распределении древостоев с различными таксационными характеристиками в пределах лесных массивов.

По структуре лесного массива можно судить об этапах формирования древостоев на достаточно продолжительном временном отрезке и делать прогнозы. В то же время средние таксационные характеристики древостоев в массиве также взаимообусловлены. Установление закономерных связей между ними позволяет решать технические задачи, связанные с оптимизацией методов таксации древостоев, в том числе и с использованием методов дистанционного зондирования.

Береза повислая (*Betula pendula* Roth.) является одним из основных лесообразователей. Закономерностям роста и развития древостоев, сформированных различными видами березы, посвящен достаточно обширный ряд работ как отечественных [4, 6 и др.], так и зарубежных исследователей [7, 10, 11], однако некоторые аспекты взаимообусловленности отдельных характеристик этих ценозов требуют более пристального внимания.

Целью работы явилось установление зависимостей между средними таксационными характеристиками березовых древостоев на основе данных, представляющих лесной массив в Красноярско-Ачинско-Канском лесостепном районе. Этот район занимает значительную территорию на Среднесибирском плоскогорье и Западно-Сибирской равнине.

### *Объекты и методы исследования*

Объект исследования – лесной массив с абсолютным преобладанием березовых древостоев, расположенный на территории Манского лесничества Красноярского края.

Выделение массива из лесного фонда лесничества осуществлялось на базе методических положений, изложенных в работе И.И. Красикова, С.Л. Шевелева [3]. Эти авторы понимают лесной массив как биологическую лесную систему, сформировавшуюся в определенных географических условиях, соответствующую отдельным элементам ландшафта, занимающую целостную территорию с естественными границами, которой присущи опосредованные орографическими, почвенными, погодно-климатическими и другими факторами структуры биоценозов.

Район исследования характеризуется относительно равнинным рельефом. Речная сеть сформирована ручьями и мелкими реками. Преобладают древостои травяной группы типов леса. Лесной массив состоит из 1212 выделов, протаксированных методом глазомерно-измерительной таксации в процессе проведения лесоустроительных работ. Населенных пунктов нет.

Условия местопроизрастания березняков относительно благоприятны – средний класс бонитета древостоев II (к I классу бонитета относятся 0,2 % древостоев, к II – 82,7 %, к III – 17,1 %).

Преобладающими типами леса являются березняк осочково-разнотравный (Б<sub>осрт</sub>), на долю которого приходится 79,5 % древостоев, и березняк вейниково-разнотравный (Б<sub>врт</sub>) с долей участия 19,1 %. Кроме них, в незначительном количестве учтены березняки вейниковые и хвощово-осочковые.

Основную массу березняков в массиве представляют средневозрастные древостои, на их долю приходится 52,5 % по числу древостоев и 54,2 % по занимаемой ими площади. Приспевающие, спелые и перестойные древостои составляют 42,3 % от общего числа древостоев, занимая 37,2 % покрытой лесом площади.

Характер соотношения древостоев различных возрастных групп в массиве свидетельствует о том, что он испытал значительное антропогенное воздействие в виде рубок в 80–90-е гг. прошлого века.

Анализ рядов средних таксационных характеристик древостоев в пределах возрастных групп (запасов, средних высот и диаметров, относительных полнот, исключая ряды классов бонитета) показал, что они соответствуют или близки к рядам нормального распределения. Проверка рядов на нормальность велась в соответствии с возможностями программы SPSS. Такое распределение, по мнению ряда авторов [2, 3, 5], указывает на стабильное формирование массива на данном временном этапе.

Максимальная доля запасов березняков (84,9 %) приходится на древостои со средними диаметрами 20...24 см.

Приведенные выше характеристики объекта исследования весьма типичны для лесных систем Красноярско-Ачинско-Канского лесостепного района.

Установление связей между средними таксационными показателями велось на типологической основе.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

На первом этапе обработки данных была проведена первичная статистическая оценка рядов средних таксационных характеристик березовых древостоев в лесном массиве.

Оказалось, что средние значения высот и диаметров составляют соответственно 17,4 м и 17,3 см при среднем запасе 110 м<sup>3</sup>/га. Древостои в абсолютном преобладании модальны – средняя относительная полнота равна 0,59.

Наибольшую изменчивость имеют средние диаметры и запасы древостоев (39,7...39,4 %). Точность опыта лежит в пределах 0,9...1,6 %.

Далее были проанализированы парные связи между средними таксационными показателями в древостоях преобладающих типов леса – березняках осочково-разнотравном и вейниково-разнотравном. Этим также решалась задача установления степени различия в характере формирования древостоев двух типов леса, относящихся к одной группе. Для этой цели были проанализированы кривые, характеризующие динамику средних высот и средних диаметров березняков.

Оказалось, что динамика средних высот с высокой степенью адекватности отображается функцией вида

$$H = \frac{a + bA}{1 + cA + dA^2}, \quad (1)$$

где  $H$  – средняя высота древостоя, м;  
 $A$  – возраст, лет;  
 $a, b, c, d$  – коэффициенты уравнения (табл. 1).

Динамика средних диаметров аппроксимируется следующим уравнением:

$$D = a(1 - e^{-bA}). \quad (2)$$

Здесь  $D$  – средний диаметр древостоя, см.

Таблица 1

**Значения коэффициентов уравнений и показателей их адекватности**

Таксационный показатель	Тип леса	Коэффициенты уравнений				Коэффициент детерминации ( $R^2$ )	Стандартная ошибка $S$
		$a$	$b$	$c$	$d$		
Средняя высота, м	Босрт	-0,32135	0,48832	0,00155	9,15749e-005	0,98	0,75
	Бврт	-0,95226	0,63669	0,01164	4,06596e-005	0,98	0,53
Средний диаметр, см	Босрт	141,4598	0,002594	–	–	0,95	0,97
	Бврт	84,2104	0,004686	–	–	0,93	1,65

Графики динамики средних таксационных показателей практически совпадают (рис. 1) и даже без расчетов критериев согласия позволяют утверждать, что древостои двух типов леса относятся к одной генеральной совокупности и дальнейшую обработку данных можно проводить в целом, в пределах группы типов леса.

Далее были рассмотрены множественные зависимости, имеющие практическое значение при использовании методов дистанционного мониторинга лесов. Была изучена обусловленность формирования запаса древостоя ( $M$ ) величинами средних высот и диаметров, а также относительных полнот ( $P$ ). Характер формирования поля исходных данных по величине запасов березняков травяной группы типов леса в зависимости от средних диаметров и относительных полнот иллюстрирует рис. 2.

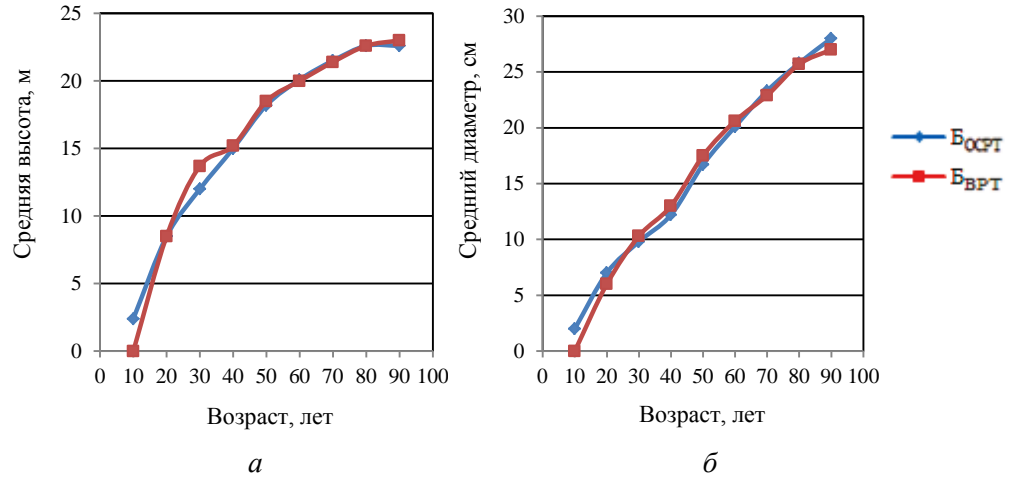
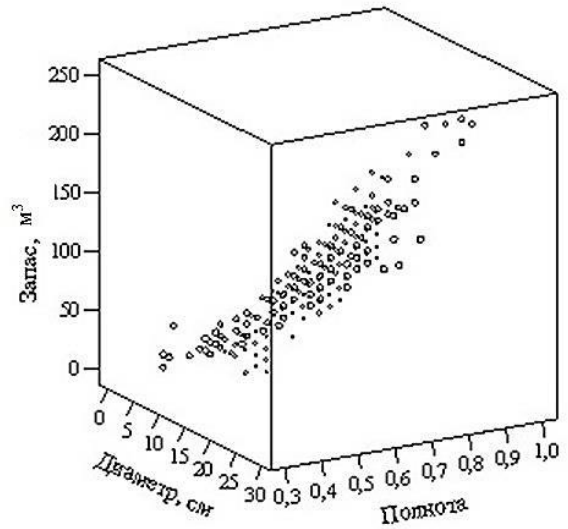


Рис. 1. Динамика средних высот (а) и диаметров (б) березняков травяной группы типов леса

Рис. 2. Запас березняков травяной группы типов леса различных средних диаметров и относительных полнот



Зависимость запаса древостоев от их таксационных характеристик (среднего диаметра и относительной полноты) с достаточно высокой степенью адекватности отображается следующим уравнением:

$$M = -105,107 + 5,693D + 197,254P. \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции, отражающий связь зависимой переменной с совокупностью независимых переменных,  $R = 0,920$ , при этом коэффициент детерминации ( $R^2$ ) = 0,846, т. е. 84,6 % дисперсии зависимой переменной обусловлено влиянием среднего диаметра и относительной полноты древостоев.



Стандартизованные коэффициенты регрессии  $\beta$  для диаметра и полноты соответственно составляют 0,901 и 0,598.

Стандартная ошибка уравнения – 17,1; стандартные ошибки коэффициентов, являющиеся мерой стабильности и равные стандартному отклонению их значений, для константы уравнения соответствуют 4,3, для диаметра – 0,1, для полноты – 5,6. Вероятность того, что результаты аппроксимации являются случайными, равна 0.

Ниже, в табл. 2, приведены результаты проверки точности работы уравнения по материалам шести пробных площадей с рубкой 147 модельных деревьев.

Таблица 2

**Сопоставление запасов, полученных по уравнению (3), с запасом древостоев на пробных площадях**

Номер пробной площади	Состав	Средние		Полнота	Запас, м <sup>3</sup> /га		Отклонение	
		высота, м	диаметр, см		на пробе	по уравнению (3)	м <sup>3</sup> /га	%
1	9Б1Ос	23,0	22,0	0,90	194	198	+4	+2,0
2	9Б1Лц	20,0	18,0	0,80	182	162	-20	-
3	10Б	21,4	21,1	0,75	176	163	-13	-7,4
4	10Бед.Лц	15,0	12,1	0,80	121	121	-	-
5	9Б1Лц	25,0	30,0	0,90	243	243	-	-
6	10Бед.Ос	21,6	20,4	0,74	166	157	-9	-5,4

Уравнение, объединяющее три независимых переменных (средние высота и диаметр, а также полнота древостоя) имеет следующий вид:

$$M = -108,849 + 4,703H + 2,199D + 167,246P. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации равен 0,868. Стандартизованные коэффициенты регрессии для диаметра, высоты и полноты соответственно равны 348, 554, 507. Критерий Дарбина–Ватсона составляет 1,6, распределение остатков близко нормальному. Вероятность случайности результата равна 0.

Однако введение в уравнение дополнительного предиктора не повлекло за собой значимого увеличения точности – коэффициент детерминации увеличился только на 0,022. По-видимому, оказала влияние высокая степень взаимной корреляции средних высот и диаметров древостоев.

Опосредованность запаса березовых древостоев средней высотой и относительной полнотой характеризуется уравнением множественной регрессии:

$$M = -108,385 + 7,496H + 148,605P. \quad (5)$$

Адекватность уравнения подтверждается коэффициентом детерминации:  $(R^2) = 0,867$ . Для высоты коэффициент  $\beta = 0,881$ , для полноты – 0,450. Стандартная ошибка уравнения – 15,8, ошибки коэффициентов уравнения: константа – 3,9, высота – 0,1, полнота – 4,9. Вероятность случайности результата равна 0.

Сопоставление результатов определения запасов по уравнению (5) со Стандартной таблицей Центрального научно-исследовательского института лесного хозяйства (ЦНИИЛХ) [1] показало, что при средних полнотах древостоев отклонения невелики. В табл. 3 приведены результаты сопоставления запасов при относительной полноте древостоев 0,5.

Таблица 3

**Сопоставление запасов, рассчитанных по уравнению (5) и определенных по Стандартной таблице ЦНИИЛХ**

Показатель	Значение показателя при средней высоте древостоя, м								
	10	12	14	16	18	20	22	24	25
Запас, м <sup>3</sup> /га:									
по таблице	44	53	67	82	98	114	134	153	163
по уравнению	41	56	71	86	101	116	131	146	153
Отклонение:									
м <sup>3</sup> /га	-3	3	4	4	3	2	-3	-7	-10
%	-6,8	5,7	6,0	4,9	3,1	1,8	-2,2	-4,6	6,1

Однако для высоко- и низкополнотных древостоев величина отклонений значительно возрастает. Поэтому на данном этапе целесообразно установить пределы работы уравнения при относительной полноте 0,5...0,7 и средней высоте древостоев 12...20 м и продолжить исследования в части оценки соответствия показателей Стандартной таблицы ЦНИИЛХ характеристикам березовых древостоев района исследования.

Проверка точности уравнения по материалам пробных площадей показала, что величина отклонений близка к определенной по уравнению (5).

Завершающей частью работы явилось установление парной зависимости между средними высотами и диаметрами древостоев травяной группы типов леса. Эта зависимость представляет значительный интерес при построении объемных таблиц, так как является основой для шкалы разрядов высот.

Зависимость отображается уравнением

$$H = \frac{-0,28519 + 1,40627D}{1 + 0,000172D + 0,00086D^2} \text{ при } R^2 = 0,974 \text{ и } S = 0,812. \quad (6)$$

#### Выводы

1. Использование полученных статистических моделей даст возможность усовершенствовать процесс дешифрирования аэрофотоснимков для лесостепной зоны Средней Сибири.

2. Парные взаимосвязи, характеризующие динамику средних высот и диаметров березняков травяной группы типов леса, позволят внести коррективы в региональные таблицы хода роста.

3. Сопоставление полученных результатов с данными Стандартной таблицы ЦНИИЛх позволит использовать их при дальнейших исследованиях в процессе анализа оценки соответствия показателей таблицы характеристикам низко- и высокополнотных березовых древостоев района исследования.

4. Зависимость между средними высотами и средними диаметрами древостоев может явиться основой для построения шкалы разрядов высот объемной таблицы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анучин Н.П.* Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 551 с.
2. *Глазов Н.М.* Статистический метод в таксации и лесоустройстве. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 144 с.
3. *Красиков И.И., Шевелев С.Л.* Структура лесных массивов в Республике Тыва. Красноярск: СибГТУ, 2013. 118 с.
4. *Морозов Л.М.* Основы организации хозяйства в таежных березняках Обь-Иртышского междуречья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1978. 23 с.
5. *Мошкалева А.Г., Книзе А.А., Ксенофонтов Н.И., Уланов Н.С.* Таксация товарной структуры древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 160 с.
6. *Тюрин А.В.* Таблицы сбега и объема стволов березы по бонитетам // Массовые таблицы для сосны, ели, дуба, березы и осины по классам бонитета. М.; Л.: Сельколхозгиз, 1931. С. 405–496.
7. *Emery M.R., Wrobel A., Hansen M.H., Dockry M., Moser W.K., Stark K.J., Gilbert J.H.* Using Traditional Ecological Knowledge as a Basis for Targeted Forest Inventory: Paper Birch (*Betula papyrifera*) in the US Great Lakes Region // *J. of Forestry*. 2014. No. 112(2). Pp. 207–214.
8. *Grossman H.* Ergebnisse der in Jahre 1957 durchgeführten Holzvorrats und Zuwachsinventur im Plenterwald Keula // *Arch. Fur Forstwesen*. 1959. No. 6/7. Pp. 666–689.
9. *Grossman H., Wolff G.* Versuche zur Rationalisierung der Methodik von Holzvarrotsinventuren auf mathematisch-statistischer Grundlage // *Arch. Fur Forstwesen*. 1963. No. 12. Pp. 77–101.
10. *Howard A.F., Yaussy D.A.* Multivariate Regression Model for Predicting Yields of Grade Lumber from Yellow Birch Sawlogs // *Forest Products J.* 1986. No. 36. Pp. 56–60.
11. *Moser W.K., Hansen M.H., Gormanson D., Gilbert J.H., Wrobel A., Emery M.R., Dockry M.J.* Paper Birch (Wiigwaas) of the Lake States, 1980–2010 // USA: Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 2015. 37 p.

Поступила 14.11.16

UDC 630\*5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.42

**The Relationship Between the Average Forest Inventory Indices of Birch Stands in the Krasnoyarsk-Achinsk-Kansk Forest-Steppe Area**

*S.L. Shevelev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

*M.N. Efremova, Postgraduate Student*

Siberian State Technological University, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: taksator@sibstu.Rts.ru, tenia@mail.ru

The paper analyzes the impact between the average forest inventory indices of the forestlands with the silver birch dominance (*Betula pendula* Roth.) in the forest-steppe zone of Middle Siberia. The study object is the forestland with an absolute birch stand predominance in the Mansky Forestry in the Krasnoyarsk region. The study is based on the data of the forest inventory of 1212 subcompartments. The selected forestland is typical for the forest systems of the Krasnoyarsk-Achinsk-Kansk forest-steppe area. The stands of the herbal group of the forest types are dominated. The birch stands are characterized by the 2nd soil-site index. The basic part of birch stands is the middle-aged stands. The primary statistical data processing is carried out on the first stage. The analysis of the series of the average forest inventory characteristics within the age groups demonstrates their correspondence to the rows of normal distribution. The establishment of connections is carried out on the typological basis. So, the pairwise connections are analyzed between the average forest inventory indices in the stands of the prevailing forest types – herb-grass-sedge and herb-grass-reed birch stands. Two types of forest stands can be attributed to the same general population. The equations of the dynamics of mean heights and mean diameters of birch stands are calculated. The conditionality of growing stock formation by the values of mean heights, mean diameters and relative stand densities is considered. As a result, the multiple regression equations are obtained. The accuracy test of determination of growing stocks according to the equations is carried out by the comparison with the data of the Standard table of the Central forestry scientific research institute and sample plots materials. The magnitude of deviation is close to the magnitude of equations deviations. The final part of the work is the establishment of the pairwise connection between the mean heights of the stands of the herbal group of the forest types and the mean diameters. As a result of the work, the multiple and pairwise regression connections between the average forest inventory indices for birch stands of the herbal group of the forest types are established. The obtained equations can be used when interpreting the data of forest aerial photography and adoption the forest inventory regulations.

*Keywords:* forestland, birch stand, mean diameter, mean height, relative density, stock of stem wood.

---

*For citation:* Shevelev S.L., Efremova M.N. The Connection Between the Average Forest Inventory Indices of Birch Stands in the Krasnoyarsk-Achinsk-Kansk Forest-Steppe Area. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 42–51. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.42

REFERENCES

1. Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest Taxation]. Moscow, 1982. 551 p.
2. Glazov N.M. *Statisticheskiy metod v taksatsii i lesoustroystve* [The Statistical Method in Inventory and Forest Management]. Moscow, 1976. 144 p.
3. Krasikov I.I., Shevelev S.L. *Struktura lesnykh massivov v Respublike Tyva* [The Structure of Forestlands in the Republic of Tyva]. Krasnoyarsk, 2013. 118 p.
4. Morozov L.M. *Osnovy organizatsii khozyaystva v taezhnykh bereznyakakh Ob'-Irtyskogo mezhdurech'ya*: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk [Fundamentals of Economy in the Taiga Birch Forests in the Ob-Irtys Interfluve: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Krasnoyarsk, 1978. 23 p.
5. Moshkalev A.G., Knize A.A., Ksenofontov N.I., Ulanov N.S. *Taksatsiya tovarnoy struktury drevostoev* [Taxation of Stand Commodity Composition]. Moscow, 1982. 160 p.
6. Tyurin A.V. *Tablitsy sbega i ob"ema stvolov berezy po bonitetam* [Taper and Volume Tables of Birch Trunks According to the Site Classes]. *Massovye tablitsy dlya sosny, eli, duba, berezy i osiny po klassam boniteta* [Mass Pine, Spruce, Oak, Birch and Aspen Tables According to the Site Classes]. Moscow; Leningrad, 1931, pp. 405–496.
7. Emery M.R., Wrobel A., Hansen M.H., Dockry M., Moser W.K., Stark K.J., Gilbert J.H. Using Traditional Ecological Knowledge as a Basis for Targeted Forest Inventory: Paper Birch (*Betula papyrifera*) in the US Great Lakes Region. *J. of Forestry*, 2014, no. 112(2), pp. 207–214.
8. Grossman H. Ergebnisse der in Jare 1957 durchgefuehrten Holzvorrats und Zuwachsinventur im Plenterwald Keula. *Arch. Fur Forstwesen*, 1959, no. 6/7, pp. 666–689.
9. Grossman H., Wolff G. Versuche zur Rationalisierung der Methodik von Holzvarrotsinventuren auf mathematisch-statistischer Grundlage. *Arch. Fur Forstwesen*, 1963, no. 12, pp. 77–101.
10. Howard A.F., Yaussy D.A. Multivariate Regression Model for Predicting Yields of Grade Lumber from Yellow Birch Sawlogs. *Forest Products J.*, 1986, no. 36, pp. 56–60.
11. Moser W.K., Hansen M.H., Gormanson D., Gilbert J.H., Wrobel A., Emery M.R., Dockry M.J. Paper Birch (Wiigwaas) of the Lake States, 1980–2010. *USA: Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station*, 2015. 37 p.

Received on November 14, 2016

---

УДК 502.74:591.95

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.52

## **ТРОФИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ЛОСЯ (*ALCES ALCES L.*) НА ТЕРРИТОРИИ СМЕШАННЫХ И ЛИСТВЕННЫХ МОЛОДНЯКОВ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД**

*Е.Н. Пилипко, канд. биол. наук*

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина,  
ул. Панкратова, д. 9-а, корп. 7, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555;  
e-mail: Karlovna@ukr.net

Происходящие под воздействием лесных копытных животных сукцессионные изменения могут быть как положительными, так и отрицательными. Целью работы является оценка влияния трофической деятельности самого крупного фитофага Северо-Запада России – лося, на некоторые древесно-кустарниковые породы в летний сезон. Исследования проводились на вырубках разной давности в период их естественного зарастания. Считается, что смешанные и лиственные молодняки на вырубках в возрасте 5...20 лет наиболее пригодны для местообитания лося в связи с высоким качеством кормовых угодий и присутствием фактора защищенности. В зависимости от интенсивности посещений в разное время года были выделены зимние и летние станции. Наиболее посещаемые площади летом – лиственные молодняки на вырубках 6- и 8-летней давности, зимой – смешанные молодняки на старой зарастающей вырубке 12-летней давности. Из-за добавления в кормовой рацион животных зеленой биомассы древесно-кустарниковых пород и травянистой растительности в летний сезон на древесно-веточные корма приходится меньший процент, чем в зимний. Наиболее предпочитаемыми, а поэтому повреждаемыми лосем являются рябина, ива и осина. Самые распространенные виды повреждений молодых деревьев и кустарников – заламывание верхушки, скусывание боковых побегов и обгрызание коры. Для каждой породы, возраста и степени повреждений дерева представлен коэффициент восстановления. Наиболее быстро адаптируются к повреждениям разные виды ив (в возрасте до 8...12 лет) и осина (4...6 лет). Повреждения растений, приводящие к гибели, были выявлены у рябины и осины (в основном до 4 лет). Трофическая деятельность лося способствует смене состава насаждений, так как предпочитаемые, а поэтому затравленные копытными древесные породы заменяются гораздо быстрее на малозначимые в рационе лося. Такими породами в основном являются хвойные.

*Ключевые слова:* лось (*Alces alces L.*), древесно-веточный корм, лиственные молодняки, смешанные молодняки, вырубки, коэффициент восстановления.

---

*Для цитирования:* Пилипко Е.Н. Трофическое влияние лося (*Alces alces L.*) на территории смешанных и лиственных молодняков Вологодской области в летний период // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 52–66. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.52

*Введение*

Необходимость охраны лесов от повреждений дикими копытными животными в нашей стране приобрела остроту в конце первого послевоенного десятилетия [1]. Под воздействием копытных происходят определенные сукцессионные изменения, которые могут быть как положительными (нейтральными), так и отрицательными (нежелательными) для лесного хозяйства. Деятельность лосей не только вызывает смену пород в молодых насаждениях по лесосекам и гарям, изменяет ярусность формирующегося древостоя, но и определяет состав и качество господствующих пород [17, 19, 20, 26]. При значительной плотности животные способны нанести существенный вред лесному хозяйству, повреждая подрост и молодняк, нередко сводя на нет усилия лесоводов по лесовосстановлению [15].

По данным Д.В. Владышевского [2], массовый, легкодоступный и наиболее питательный веточный корм животным может дать только подрост деревьев и кустарников. Поэтому он повреждается особенно часто и сильно. У подростка древесно-кустарниковых пород копытные объедают кору, листья и почки, боковые и вершинные побеги [5]. Эти явления имеют большое биоценотическое значение. Существенное воздействие на структуру растительных сообществ копытные оказывают в период сукцессий, при формировании смешанных насаждений. Например, в период зарастания вырубок и гарей резко обостряется конкуренция между древесной и травянистой растительностью. В этом случае даже небольшое повреждение подростка может привести к значительному снижению его участия в формирующемся сообществе [2]. Характер повреждений, которые наносят лоси, зависит от экологической обстановки.

Лесные копытные (потребители веточных кормов) в результате высокой кормовой избирательности используют лишь небольшой набор видов древесно-кустарниковых пород и, соответственно, осваивают незначительную часть доступного запаса веточной фитомассы. Характерно, что лоси при истощении запаса предпочитаемых кормов вынуждены использовать низкопитательные корма (например, ветки (хвою) ели), запасы которых в хвойно-широколиственных лесах в качестве корма неограничены [14]. Если судить об общих запасах доступной фитомассы, то в большинстве случаев ее количество для растительноядных млекопитающих достаточно, чтобы обеспечивать потребление корма до насыщения.

Предпочтение лосей каким-либо растениям связано с их химическим составом и содержанием питательных веществ. Эксперименты с одомашненными лосями показывают, что в июне–августе лоси съедают 30...40 кг сырой растительной массы, зимой – не более 11...15 кг. За год одно животное употребляет почти 7 т корма, большая доля которого (приблизительно 4 т) приходится на побеги древесно-кустарниковой растительности [8]. Таким образом, чем выше численность лосей в определенном месте обитания, тем больше ущерб, причиняемый ими подросту, в основном лиственных и отчасти хвойных пород. Однако причиняемый лосями урон зачастую необоснованно преувеличен.

Многие сотрудники лесных и охотничьих хозяйств считают, что ущерб, наносимый животными, почти не сказывается на формировании будущего леса, при условии немногочисленности популяции на единицу площади.

Основной кормовой базой лося являются лиственные древесно-кустарниковые породы, преимущественно молодняки. Также лось употребляет некоторые виды мхов, лишайников и грибов, объедает кору молодых осин, кормится околоводными и водными растениями.

Питание лося зависит от сезона года, что связано с разной доступностью кормов в течение года. Так, если зимой лось питается в основном древесно-веточными грубыми кормами, то летом он переходит на мягкие зеленые корма в виде травянистых растений (на гарях и лесосеках) и листьев, которые он употребляет на определенном высотном уровне.

#### *Материалы и методы исследования*

В ходе ранее проведенных на территории Никольского района Вологодской области исследований нами было выявлено, что запас доступных кормов для лося в различных типах охотугодий зависит от среднего состава и класса возраста древостоя [13].

Цель данных исследований – изучение трофического влияния лося на древесные породы в смешанных молодняках на вырубках (возраст 5...20 лет) в летний период.

Пробные площади находились на территории Шуйского участкового лесничества Междуреченского государственного лесничества Вологодской области. Исследования проводили в 2014–2016 гг. на вырубках после ельников черничниковых. Известно [7], что пик обилия веточного корма наступает раньше, чем в сосновых молодняках (уже к 7...9 годам).

Классификационной единицей при отборе вырубок и их качественной оценке был принят тип леса как показатель однородности условий местопроизрастания, роста и строения. Тип леса устанавливали по классификации, разработанной В.Н. Сукачёвым [16], с учетом состава, рельефа, почвенно-грунтовых условий, напочвенного покрова и других признаков. Динамику поврежденности древесных пород изучали на трех пробных площадях, заложенных в категории «лиственные молодняки на сплошной вырубке 5...20 лет» [6], или «смешанные лиственные молодняки» [3].

Закладку пробных площадей производили с учетом требований ОСТ 56-69–83 [10]. Размер пробной площади устанавливали в молодняках, на вырубках, как для изучения эффективности осветлений, что составляло не менее 0,25 га. Пробные площади располагали по диагонали вырубок, на расстоянии 50 м друг от друга. Общая площадь исследований – 23 га.

Для выявления типов повреждений и количества гибнущих и ослабленных в росте деревьев применяли методику учета ущерба, нанесенного лесному хозяйству копытными – дендрофагами [18]:



неповрежденные (слабоповрежденные) – деревья, у которых объедено менее 50 % всех побегов или менее 50 % коры по окружности ствола; эта степень повреждений для роста и развития деревьев не имеет существенного значения;

сильноповрежденные – скусана (сломана) верхушка, объедено более 50 % побегов или погрызы коры занимают более 50 % окружности ствола;

гибнущие – крона приобрела шапкообразную многовершинную форму, все побеги объедены, сломан или окольцован ствол; эти повреждения приводят к гибели дерева.

Кроме того, в зависимости от характера повреждений отдельных частей дерева выделяли еще четыре вида повреждений: обкусывание боковых побегов годичного прироста; скусывание верхушечных побегов; заломы стволов деревьев; погрызы коры.

Определение наиболее часто поедаемых кормов проводили на пробных площадях глазомерно. В целях установления количества веточного корма, потребляемого копытными, на каждой пробной площади за контрольный период нами были просуммированы диаметры всех скушенных побегов каждого из видов растений условного диаметра, т. е. не толще 0,5 см (по методике Ю.П. Лихацкого и Н.М. Киреева) [9]. Также подсчитывали наиболее поврежденные экземпляры, определяли породу, вид повреждения, процентное соотношение обилия и степень использования (поедаемость) растений на площади (по шкале И.В. Жаркова) [4].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

*Кормовая избирательность лося (предпочитаемые породы).* Рассмотрев виды, общие для всех пробных площадей (сосна, ель, осина, береза, ольха серая, ива козья), мы пришли к выводу, что наибольшее суммарное количество веточного корма в условных диаметрах было потреблено на вырубках с молодняками лиственных пород (возраст 2...10 лет). Это связано с достаточным количеством кормовых ресурсов, так как установлено, что кормовая производительность местообитаний после рубки по многим видам кормов увеличивается в 5–20 раз [6, 21–25]. Также предпочтение вырубкам лосями связано с легкостью (доступностью) обкусывания и сгрызания молодых ветвей и их сочностью. На некоторых площадях отмечено свежее, уже этого года – весной, в период сокодвижения, когда кора хорошо отходит от древесины, обгрызание (обдирание) коры. Таким образом, молодняки характеризуются обилием древесно-веточных кормов, наличием грибов и ягод в весенний и летне-осенний периоды, а также хороших защитных условий. Кроме того, частота посещаемости лосями пробных площадей, связана с составом и возрастом древесной растительности (табл. 1).

Лось в подросте ели, прежде всего, предпочитает примеси лиственных пород. На некоторых пробных площадях было хорошо заметно, что зверь, находясь в подросте ели, избирательно обкусывал ветки и побеги молодых деревьев осины, ивы, иногда березы и очень редко сосны. Повреждения ели в летний период зафиксированы не были.

Таблица 1

## Частота посещаемости лосями пробных площадей, связанная с составом и возрастом древесной растительности\*

Квартал	Выдел	Площадь, га	Состав, подрост	Элемент леса	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Бонитет	Тип леса, тип лесорастительных условий	Посещаемость пробных площадей, определенная глазомерно (балл оценки охотугодий)
202	14	9,0	3Е1С3ОС2Б1ИВ (СПР** после 12 лет зарастания)	Е	25	3,0	2	2	Е ЧЕР, ЧС	Зимняя стадия. Длительное пребывание лося в зимний период на данной территории, так как она обладает хорошей защищенностью. Кормовая база обозначена преимущественно древесно-веточным кормом (осина и ива козыя). Наблюдается повреждение боков побегов, залом верхушек и обдир коры на стволах молодых деревьев в зимнее время (4 балла).
				С	23	3,0	2			
				ОС	12	6,8	8			
				ИВ	10	5,7	-			
228	4	3,0	Вырубка – 0,5 га, пней – 700 шт./га, диаметр – 32 см, малинниковая (СПР после 6 лет)	ОС	6	3,8	-	1	Е ЧЕР, ЧС	Летняя стадия. Наблюдается скусывание веток и побегов у подроста осины и ивы, реже у березы, а также залом верхушек молодых деревьев. В летний период хорошая кормовая база (5 баллов).
				Б	6	3,5	-			
				ИВ	4	2,6	-			
228	4	3,0	Вырубка – 0,5 га, пней – 600 шт./га, диаметр – 30 см, малинниковая (СПР 8-летней давности)	ОС	8	5,3	-	2	Е ЧЕР, ТР	Летняя стадия. Зафиксировано скусывание веток и побегов у осины и ивы. В летний период хорошая кормовая база (5 баллов).
				Б	8	4,9	-			
				ИВ	7	3,8	-			

\* Дано подробное описание наиболее поврежденной растительности при полноте 0,8.

\*\*СПР – сплошная рубка.

*Воздействие лося на древесно-кустарниковые породы вырубок.* Летняя кормовая емкость угодий зависит от запаса кормов в зоне досягаемости лося. Это хвойные и лиственные молодняки в пределах I класса возраста, а также подлесочные кормовые породы во всех классах возраста древостоев. Для лося различные древесные и кустарниковые породы имеют неодинаковую кормовую ценность, в связи с этим они повреждаются им в различной степени. Такая закономерность была выведена нами при закладке пробных площадей на вырубках и еловых молодняках (табл. 2).

Наиболее посещаемые площади в летний период – это 6- и 8-летние вырубки (см. табл. 1), так как лось отдает предпочтение молоднякам как основной кормовой базе. В зимний период лось предпочитает молодняки 10... 25-летнего возраста. Это связано с тем, что лиственные молодняки 12-летнего возраста (5...8 м высотой и выше) имеют не только кормовой запас древесно-веточного корма, но и являются хорошим убежищем зимой, особенно в случае высокой полноты молодняка (не менее 0,8). Также в зимний период основным фактором при выборе места жировки является глубина снежного покрова, которая, как известно, больше на более открытых территориях, т. е. на молодых вырубках.

По породному составу наиболее предпочитаемыми породами в рационе лося (табл. 2) как в летний, так и в зимний период являются рябина – 30,2...80,0 %, ива – 26,6...57,7 %, осина – 2,5...51,3 %, самой неинтересной – ель (ее поедаемость составляет всего 0,5...2,4 %).

Характер повреждений деревьев больше зависит не от возраста, а от высоты деревьев на вырубках. У деревьев высотой до 3,0 м обкусывание побегов годовичного прироста и погрызы коры преобладают над другими видами повреждений. Наибольший урон от уничтожения вершинок несут деревья до 1,0 м. Для того, чтобы достать побеги высотой более 3,0 м, животные ломают стволы деревьев. Интенсивно увеличивается и количество осин с ободранной лосями корой. На интервал 0,82...1,54 м приходится более 50,0 % всех повреждений побегов растений лосями, далее по убывающей следуют: 1,54... 2,85 м (29,1 %) и 0,40...0,82 м (12,3 %) [12].

На долю древесно-веточных кормов в летний период приходится 68,5 %, остальные 31,5 % занимает травянистая растительность, а также кустарники и кустарнички (смородина черная, малина, черника).

Преимущественное значение в кормовом рационе лося имеет рябина – 23,0 % в летний период. О рябине как излюбленной породе для фитофага свидетельствует и большой процент ее повреждений (81,0 % к общему числу учтенных деревьев). Также лось предпочитает иву (16,0 % от общего объема кормов) и осину (14,0 %). В летнем рационе зверя сосне отводится всего 1,5 %.

Интенсивное повреждение рябины, ивы и осины связано с возрастными особенностями рассматриваемых пород на исследуемых пробных площадях, так как известно [3], что данные породы дают максимальный запас древесно-веточных кормов в возрасте 4...7 лет, крушина, береза, ольха и сосна – в 8...13 лет. Таким образом, лиственные молодняки на вырубках 2008 и 2010 гг. (в силу подходящего возраста молодняка) посещались интенсивнее в летний период, и были нами признаны как летние станции с хорошим запасом кормов.

Таблица 2

## Состав, обилие и поедаемость лесом древесно-кустарниковой растительности в летний период на вырубках (по шкале Жаркова)

Порода	Возраст, лет	Высота, м	Учено, экз.	Состав летних кормовых угодий, %	Повреждение, шт.			Объедены		Количество поврежденных деревьев, % к общему количеству
					Скусывание верхнего и боковых побегов	Полном ствола и верхушек	листья, хвоя	кора		
Ива	2...6	0,7...2,5	1 072	16,0	386	237	345	126	45	
	6...12	2,5...5,0	3 016		395		206	145		
	2...5	0,5...1,7	320	14,0	102	43	65	12		
Осина	5...7	1,7...4,5	5 300		974		573	53	33	
	2...8	0,5...1,6	420	7,0	87	23	41	–		
	8...12	1,6...4,5	4 600		716		338	–		
Сосна	6...7	0,8...1,5	210	1,5	9	–	6	–	7	
	2...4	0,8...1,5	1 324	23,0	184	91	116	78		
Рябина	4...7	1,5...3,0	534	4,0	139	80	71	–	24	
	2...10	0,6...2,8	876	3,0	80		39	3		
Крушина	2...10	0,6...2,8	876						16	
	3...10	0,7...2,8	760							

Смешанные молодняки на вырубке 2004 г. подходили для лося как зимние станции в связи с хорошими условиями защищенности, но уже с вышедшими из возраста кормовыми угодьями.

*Коэффициент восстановления веточного корма.* Для каждой породы (преимущественно III бонитета) и определенного процента повреждения существует коэффициент восстановления, который был взят из предложенной М.Д. Перовским таблицы. Коэффициент получен опытным путем [11] по Вологодской области и дополнен нами по двум видам ив (козья и пятитычинковая) и рябине после ряда экспериментов (табл. 3).

Таблица 3

**Восстановление веточного корма при интенсивной эксплуатации модельных пастбищ**

Порода деревьев и кустарников	Возраст модельных деревьев, лет	Усредненный коэффициент восстановления	Характеристика восстановления
Осина ( <i>Populus tremula</i> L.)	4...6	0,40	Поросль 4...6 лет восстанавливает побеги интенсивнее, чем насаждения 6...12 лет. Некоторые деревья восстанавливают за вегетационный период до 40 % поврежденных побегов. Повреждения 55...60 % практически не восстанавливаются. Береза в целом обладает невысокой способностью к восстановлению утраченных побегов (16...18 %), поэтому молодняки данной породы относительно легко затравливаются лосем.
	6...12	0,20	
Береза пушистая ( <i>Betula pubescens</i> L.)	4...10	0,15	Кустарник обладает довольно высокой способностью к восстановлению побегов (свыше 60 %).
Ива пепельная ( <i>Salix cinerea</i> L.)	2...12	0,50	
Ива козья ( <i>Salix caprea</i> L.)	2...10	0,40	Восстановление аналогично другим видам ив. Хорошая способность к восстановлению (свыше 50 %).
Ива пятитычинковая ( <i>Salix pentandra</i> L.)	2...8	0,35	
Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	2...8	0,20	Восстанавливается при незначительном повреждении (не более 20 %). При повреждении свыше 50 % в большинстве случаев погибает. Взрослые растения в случае обгрыза боковых побегов восстанавливаются легче.
	8...14	0,35	

В наибольшей мере подвержены гибели рябина, осина и ива, потому что лось в своем рационе использует эти древесные породы в первую очередь (рис. 1).

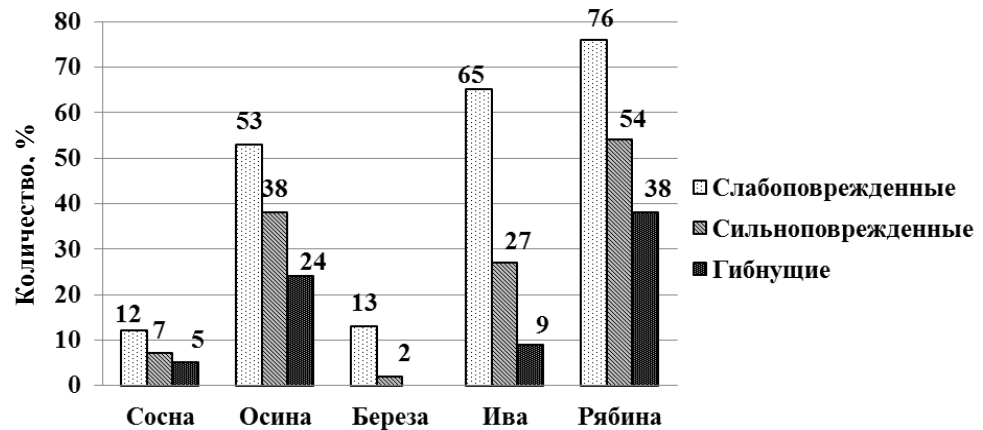


Рис. 1. Общее соотношение древесной растительности по характеру повреждения

Ива в силу своей высокой порослевой способности более устойчива к механическим повреждениям. Осина интенсивнее восстанавливается после повреждений в более раннем возрасте в отличие от рябины, которая в этом возрасте подвергается жесткому прессингу со стороны лося и в 30...40 % случаев погибает. Воздействие в меньшей степени сказывается на сосне, крушине и ольхе. За время исследования на пробной площади выявлены минимальные (до 5,4 % от общего количества деревьев) повреждения ели.

Для примера на рис. 2 приведены разные стадии повреждения и восстановления подроста одной из наиболее предпочитаемых пород – осины.

В летний период на древесно-веточный корм приходится 68,5 %, остальные 31,5 % занимают зеленые корма (травянистые растения, кустарники и кустарнички). За время проведенных нами исследований были выявлены разные стадии повреждений у молодых растений. Наибольшее количество затравленных (гибнущих) растений приходится на рябину (38,0 %) и осину (24,0 %). Высокий процент повреждаемости лосем древесно-кустарниковых пород в смешанных лиственных молодняках ведет к изменению состава насаждений и увеличивает сроки формирования высокопродуктивных насаждений. Территории с лиственным молодняком после сплошных рубок 5...20 лет считаются хорошими кормовыми угодьями и могут прокормить до 15 особей в зимний период без ущерба для древесно-веточных пород [3]. В летний период за счет зеленых кормов количество особей возрастает в среднем в 3 раза.



*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 2. Разные стадии повреждения подроста осины: *a* – слабое (20 %) повреждение деревца (незначительный сгрыз боковых и верхушечных побегов); *б* – восстановление осины в виде новых побегов после сильного (40...45 %) повреждения молодого деревца; *в* – слабое восстановление существенно поврежденного деревца (на 50...55 %); *г* – погибшее молодое дерево осины после сильного повреждения (сгрыз боковых и верхушечного побегов на 70 %)

#### *Заключение*

К рассмотрению трофического влияния лося на древесно-кустарниковые породы в летний период нельзя подходить однозначно. В этот период экологи-

ческая устойчивость и возобновляемость растений выше, чем в зимний. Территории выдерживают большее количество особей в летний сезон по сравнению с зимними стадиями в связи с добавлением в древесно-веточный рацион мягкой зеленой биомассы растений, в то время как с ноября по апрель зверь вынужден питаться преимущественно древесно-веточными кормами. В исследуемых нами лиственных молодняках на вырубках в возрасте 5...20 лет затравленность и ущерб, причиненные лосем, сказываются только на рябине, осине и иве, которые считаются малоценными для лесозаготовительной деятельности. В смешанных молодняках на вырубке после 12-летнего зарастания застравленность практически отсутствует в связи с выходом подроста из возраста кормов для животного. Было зафиксировано только повреждение рябины, а также незначительное (с минимальным процентом гибели – 5,0 %) – сосны.

Гибель осины и ивы положительно сказывается на развитии хвойных пород, особенно светлюбивой сосны, которая не выдерживает конкуренции с осинкой и плохо растет под ее пологом, но это происходит на более поздних возрастных стадиях. Подрост хвойных пород до 0,5 м нуждается в защите лиственного молодняка. Так как подрост лиственных пород растет быстрее хвойного молодняка, то по истечении времени лиственный подрост начинает заглушать хвойный молодняк. Кроме того, погрызы коры подростов разных пород сильно ослабляют сопротивляемость деревьев к энтомофитопатогенам и фитоболезням, что существенно снижает деловые качества древесины и может привести к очаговому значительному поражению всего насаждения. Поэтому лиственные породы желательно убирать, но не сразу, а через какое-то время.

Эти факты способствуют постепенной замене сильно поврежденных и затем гибнущих кормовых растений на слабоповрежденные не кормовые, которыми обычно являются хвойные породы – преимущественно ель. Таким образом, трофическая деятельность лоса способствует смене пород (изменению состава насаждений).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Л.А. Влияние косули на естественное и искусственное лесовосстановление Джабык-Карагайского бора: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2008. 17 с.
2. Владышевский Д.В. Экология лесных птиц и зверей (Кормодобывание и его биоценологическое значение). Новосибирск: Наука, 1980. 264 с.
3. Дунин В.Ф., Янушко А.Д. Оценка кормовой базы лоса в лесных угодьях: науч.-практ. пособие. Минск: Ураджай, 1979. 95 с.
4. Жарков И.В. О методах, применяемых в США при изучении роли копытных в лесу // Сообщения ин-та леса АН СССР. 1959. Вып. 13. С. 111–117.
5. Калинин М.И. Лес цел, и лосей много // Охота и охотн. хоз-во. 1984. № 3. С. 10–11.
6. Козлов В.М. Влияние рубок леса на среду обитания и популяции охотничьих животных европейской тайги: моногр. Киров: Вятская ГСМХА, 2010. 148 с.



7. Курхинен Ю.П., Данилов П.И., Ивантер Э.В. Млекопитающие Восточной Фенноскандии в условиях антропогенной трансформации таежных экосистем. М.: Наука, 2006. 208 с.
8. Кучерук В.В. Травоядные млекопитающие в аридных экосистемах внетропической Евразии // Млекопитающие в наземных экосистемах. М.: Наука, 1985. С. 166–223.
9. Лихацкий Ю.П., Киреев Н.М. Практикум по основам биотехнии: учеб. пособие. Воронеж, ВГЛТА, 2000. 92 с.
10. ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. Изд. офиц. М., 1983. 59 с.
11. Перовский М.Д. Методы управления популяциями охотничьих животных России. М.: Лион, 2003. 251 с.
12. Пилипко Е.Н. Влияние трофической активности лося (*Alces alces* L.) на под-рост вырубок в Вологодской области // «Вьдещите изследвания-2011»: материали за VII междунар. науч.-практ. конф., 17–25 февр. 2011 г. София: Бял ГРАД-БГ, 2011. С. 38–41.
13. Пилипко Е.Н. Кормовая емкость угодий лося (*Alces alces* L.) в Вологодском районе Вологодской области // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материали VI Междунар. науч.-практ. конф., 24–25 авг. 2015 г., США. С. 10–14.
14. Смирнов К.А. Использование лосем (*Alces alces* L.) кормовых ресурсов в южной тайге при высокой плотности популяции // Зоол. журн. 1986. Т. 65, вып. 3. С. 436–443.
15. Смирнов К.В. Плотность населения лося и косули и их влияние на лесово-зобновление по природным зонам Челябинской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2009. 24 с.
16. Сукачев В.Н. Растительные сообщества. М.; Л.: Книга, 1928. 232 с.
17. Филонов К.П. Лось. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 246 с.
18. Чуенков В.С., Федоров Ф.Ф., Воронков П.Т., Мамаев Ю.Ф., Любченко О.В., Рабинова Т.И. Методика учета ущерба, нанесенного копытными –дендрофагами лес-ному хозяйству. ВНИИЛМ, 1997. 62 с.
19. Bergstrom R. Dynamic Interactions Between Trees and Foraging Moose (*Alces alces*) // Acta Univ. Upsal. Compr. Summ. Uppsala Diss. Fac. Sci. 1987. No. 78. 25 p.
20. Bergstrom R., Danell K. Effects of Simulated Summer Browsing by Moose on Leaf and Shoot Biomass of Birch, *Betula pendula* // Oikos. 1995. No. 72. Pp. 132–138.
21. Harper J.A., Swanson D.O. The Use of Logged Timberland by Roosevelt Elk in Southwestern Oregon // Proc. 50th Annu. West. Assoc. State Game and Fish Comm. Meet- ing. 1970. Pp. 318–341.
22. Krefling L.W., Phillips R.L. Improving Deer Habitat in Upper Michigan by Cut- ting Mixed Conifer Swamps // J. Forest. 1970. No. 68(11). Pp. 701–704.
23. Mckee B. Winter Deer Food Production and Rabbit Utilization of Various Site Preparation Treatments // Proc. 26th Annu. Conf. Southeast. Assoc. Game and Fish Comm. 1972. Pp. 218–221.
24. Regelin W.L., Wallmo O.C., Nagy J., Dietz D.R. Effect of Logging on Forage Values for Deer in Colorado // J. Forest. 1974. No. 72. Pp. 285–285.
25. Telfer E.S. Relationships Between Logging and Big Game in Eastern Canada // Pulp and Paper Magazine of Canada. 1970. October issue. Pp. 69–73.
26. Telfer E.S., Cairns A. Stem Breakage by Moose // The Journal of Wildlife Man- agement. 1978. Vol. 42. No. 3. Pp. 639–642.

Поступила 27.12.16

UDC 502.74:591.95

DOI:10.17238/issn0536-1036.2017.2.52

**The Trophic Effect of Moose (*Alces alces* L.) in the Mixed and Deciduous Young Stands of the Vologda Region in Summer**

*E.N. Pilipko, Candidate of Biological Sciences*

Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, ul. Pankratova, 9a, bl. 7, Molochnoye, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: Karlovna@ukr.net

The successional changes under the influence of forest ungulates can be both positive and negative. The aim of the work is to evaluate the effect of the trophic activity of a moose as the largest phytophagan of the North-West of Russia on some hardy-shrub species in summer. The studies are conducted on felling of different time ranges during the period of their natural overgrowing. Mixed and deciduous young stands in felling of the age of 5...20 years are the most suitable habitat for moose because of the high quality of forage lands and a security factor. Depending on the visiting intensity at different time of the year the winter and summer habitats are distinguished. The most visited areas in summer are deciduous young stands in the 6- and 8-years old felling, in winter – mixed young forests in the 12-years old overgrown felling. Woody forage accounts for a smaller percentage in summer than in winter due to the addition of green biomass of hardy-shrub species and herbaceous vegetation into the animal balanced ration. Rowan, willow and aspen are the most preferred and damageable trees by moose. The most common types of young trees and shrubs damaging are tip breaking, stem shoot and bark browsing. A recovery rate is presented for every species, ages and tree damage degrees. Different species of willow (under the age of 8...12 years old) and aspen (4...6 years old) are the most rapidly adapting species to damaging. Plant damages resulting in death are detected in ash and aspen (mainly under 4 years old). Trophic activity of moose contributes to changing the composition of stands; as preferred and therefore damaged by the ungulate animals woody species are replaced much faster by the insignificant species in the moose diet. These species are mainly coniferous.

*Keywords:* moose (*Alces alces* L.), woody forage, deciduous young stand, mixed young stand, felling, recovery factor.

REFERENCES

1. Belov L.A. *Vliyanie kosuli na estestvennoe i iskusstvennoe lesovosstanovlenie Dzhabyk-Karagayskogo bora* [The Impact of Roe Deer on Natural and Artificial Reforestation of the Dzhabyk-Karagai Bor: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Yekaterinburg, 2008. 17 p.
2. Vladyshevskiy D.V. *Ekologiya lesnykh ptits i zverey (Kormodobyvanie i ego biotsenoticheskoe znachenie)* [Ecology of Forest Birds and Animals (Foraging and Its Biocenotic Value)]. Novosibirsk, 1980. 264 p.

---

*For citation:* Pilipko E.N. The Trophic Effect of Moose (*Alces alces* L.) in the Mixed and Deciduous Young Stands of the Vologda Region in Summer. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 52–66. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.52

3. Dunin V.F., Yanushko A.D. *Otsenka kormovoy bazy losya v lesnykh ugod'yakh: nauch.-prakt. posobie* [Evaluation of the Forage Base for Moose in the Forest Areas]. Minsk, 1979. 95 p.
4. Zharkov I.V. O metodakh, primenyaemykh v SShA pri izuchenii roli kopytnykh v lesu [On the Methods Used in the USA when Studying the Role of Ungulates in a Forest]. *Soobshcheniya in-ta lesa AN SSSR* [Proc. Forest Institute of the USSR Academy of Sciences], 1959, vol. 13, pp. 111–117.
5. Kalinin M.I. Les tsel, i losey mnogo [The Forest is Safe with a Great Number of Mooses]. *Okhota i okhotnich'e khozyaystvo* [Hunting], 1984, no. 3, pp. 10–11.
6. Kozlov V.M. *Vliyanie rubok lesa na sredu obitaniya i populyatsii okhotnich'ikh zivotnykh evropeyskoy taygi* [The Effect of Logging on Habitat and Populations of Game Animals of the European Taiga]. Kirov, 2010. 148 p.
7. Kurkhinen Yu.P., Danilov P.I., Ivanter E.V. *Mlekopitayushchie Vostochnoy Fennoskandii v usloviyakh antropogennoy transformatsii taezhnykh ekosistem* [Mammals of Eastern Fennoscandia Under Conditions of Anthropogenic Transformation of Taiga Ecosystems]. Moscow, 2006. 208 p.
8. Kucheruk V.V. *Travoyadnye mlekopitayushchie v aridnykh ekosistemakh vnetropicheskoy Evrazii* [Herbivorous Mammals in Arid Ecosystems of Extratropical Eurasia]. *Mlekopitayushchie v nazemnykh ekosistemakh* [Mammals in Terrestrial Ecosystems]. Moscow, 1985, pp. 166–223.
9. Likhatskiy Yu.P., Kireev N.M. *Praktikum po osnovam biotekhnii* [Workshop on the Foundations of Biotechnology]. Voronezh, 2000. 92 p.
10. OST 56-69–83. *Ploshchadi probnye lesoustroitel'nye Metod zakladki* [Industrial Standard 56-69–83. Sampling Forest Management Areas. The Coupe Demarcation Method]. Moscow, 1983. 59 p.
11. Perovskiy M.D. *Metody upravleniya populyatsiyami okhotnich'ikh zivotnykh Rossii* [Methods of Population Management of Game Animals in Russia]. Moscow, 2003. 251 p.
12. Pilipko E.N. *Vliyanie troficheskoy aktivnosti losya (Alces alces L.) na podrost vyrubok v Vologodskoy oblasti* [The Influence of Trophic Activity of Moose (*Alces alces* L.) on the Felling Undergrowth in the Vologda Region]. “*V*”*deshchite izsledvaniya – 2011*”: *Materiali za VII mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 17–25 fevr. 2011 g.* [“The Outstanding Investigations – 2011”: Proc. 7th Int. Sci. Prac. Conf. February 17–25, 2011]. Sofiya, 2011, pp. 38–41.
13. Pilipko E.N. *Kormovaya emkost' ugodiy losya (Alces alces L.) v Vologodskom rayone Vologodskoy oblasti* [Forage Capacity of Moose Lands (*Alces alces* L.) in the Vologda District of the Vologda Region]. *Materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Fundamental'nye i prikladnye nauki segodnya», 24–25 avg. 2015 g., SShA* [Proc. 6th Intern. Sci. Prac. Conf. “Fundamental and Applied Sciences Today”, August 24–25, 2015]. USA, pp. 10–14.
14. Smirnov K.A. *Ispol'zovanie losem (Alces alces L.) kormovykh resursov v yuzhnoy tayge pri vysokoy plotnosti populyatsii* [The Use (*Alces alces* L.) of Forage Resources by Moose in the Southern Taiga at the High Population Density]. *Zoologicheskiy zhurnal* [Russian Journal of Zoology], 1986, vol. 65, no. 3, pp. 436–443.
15. Smirnov K.V. *Plotnost' naseleniya losya i kosuli i ikh vliyanie na lesovozobnovlenie po prirodnykh zonam Chelyabinskoy oblasti: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* [Moose and Roe Deer Population Density and Their Impact on Reforestation in the Natural Areas of the Chelyabinsk Region: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Yekaterinburg, 2009. 24 p.

16. Sukachev V.N. *Rastitel'nye soobshchestva* [Plant Communities]. Moscow; Leningrad, 1928. 232 p.
17. Filonov K.P. *Los'* [Moose]. Moscow, 1983. 246 p.
18. Chuenkov V.S., Fedorov F.F., Voronkov P.T., Mamaev Yu.F., Lyubchenko O.V., Rabinova T.I. *Metodika ucheta ushcherba, nanesennogo kopytnymi – dendrofagami lesno-mu khozyaystvu* [The Accounting Treatment of Damage Caused by Ungulate – Dendrophile Animals to the Forestry]. Moscow, 1997. 62 p.
19. Bergstrom R. Dynamic Interactions Between Trees and Foraging Moose (*Alces alces*). *Acta Univ. Upsal. Compr. Summ. Uppsala Diss. Fac. Sci.*, 1987, no. 78. 25 p.
20. Bergstrom R., Danell K. Effects of Simulated Summer Browsing by Moose on Leaf and Shoot Biomass of Birch, *Betula pendula*. *Oikos*, 1995, no. 72, pp. 132–138.
21. Harper J.A., Swanson D.O. The Use of Logged Timberland by Roosevelt Elk in Southwestern Oregon. *Proc. 50th Annu. West. Assoc. State Game and Fish Comm. Meeting*, 1970, pp. 318–341.
22. Krefting L.W., Phillips R.L. Improving Deer Habitat in Upper Michigan by Cutting Mixed Conifer Swamps. *J. Forest*, 1970, no. 68(11), pp. 701–704.
23. Mckee B. Winter Deer Food Production and Rabbit Utilization of Various Site Preparation Treatments. *Proc. 26th Annu. Conf. Southeast. Assoc. Game and Fish Comm.*, 1972, pp. 218–221.
24. Regelin W.L., Wallmo O.C., Nagy J., Dietz D.R. Effect of Logging on Forage Values for Deer in Colorado. *J. Forest*, 1974, no. 72, pp. 285–285.
25. Telfer E.S. Relationships Between Logging and Big Game in Eastern Canada. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 1970, October issue, pp. 69–73.
26. Telfer E.S., Cairns A. Stem Breakage by Moose. *The Journal of Wildlife Management*, 1978, vol. 42, no. 3, pp. 639–642.

Received on December 27, 2016

---

УДК 581.55:595.768.24

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.67

**ИЗМЕНЕНИЕ НИЖНИХ ЯРУСОВ ФИТОЦЕНОЗОВ  
ПИХТОВЫХ ЛЕСОВ В ОЧАГАХ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ  
УССУРИЙСКОГО ПОЛИГРАФА (*POLYGRAPHUS PROXIMUS*  
BLANDF.) НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ\***

*О.М. Шабалина*<sup>1</sup>, канд. биол. наук, доц.

*И.Н. Безкоровайная*<sup>1</sup>, д-р биол. наук, проф.

*Ю.Н. Баранчиков*<sup>2</sup>, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; e-mail: shabalina11@bk.ru

<sup>2</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Академгородок, 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: baranchikov-yuri@yandex.ru

В настоящее время пристальное внимание лесопатологов привлек новый агрессивный вредитель пихты сибирской – уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae)). До недавнего времени вид был известен в Хабаровском и Приморском краях, на Сахалине, Курильских островах, в Корее, Японии и Северо-Восточном Китае, где обычно заселял ослабленные виды дальневосточных пихт, в основном *Abies nephrolepis* и *A. holophylla*. Первые деревья, погибшие под влиянием полиграфа в Красноярском крае, датировались 1976 г. Сейчас жук распространен на территории семи субъектов Сибирского федерального округа и встречен уже на 4,9 млн га пихтарников (или почти на трети ареала пихты сибирской, которая крайне неустойчива к воздействию *P. proximus*). Цель исследований – дать оценку состояния подроста, подлеска и травяного яруса в пихтовых древостоях, поврежденных полиграфом уссурийским на территории Красноярского края. Исследования проводились в южно-таежных травяных пихтарниках на территории Красноярского края. Изучены изменения нижних ярусов в пихтовых фитоценозах с различной степенью повреждения древостоя уссурийским полиграфом. Естественное возобновление пихты на всех пробных площадях удовлетворительное (количество стандартного крупного подроста превышает 1,0 тыс. шт./га). Однако отмечается снижение среднего балла жизнеспособности крупного подроста, что, по-видимому, связано с атаками полиграфа. В условиях полного отмирания пихтового древостоя жизнеспособный крупный подрост отсутствует.

---

\*Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ (гранты 14-05-00831 и 14-04-01235).

Авторы благодарят за помощь в работе научных сотрудников Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН В.М. Петько, Д.А. Демидко, магистранта кафедры экологии и природопользования СФУ О.П. Глазкову.

*Для цитирования:* Шабалина О.М., Безкоровайная И.Н., Баранчиков Ю.Н. Изменение нижних ярусов фитоценозов пихтовых лесов в очагах массового размножения уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandf.) на территории Красноярского края // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 67–84. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.67

При повышенной освещенности отмечена тенденция к увеличению средней высоты и среднего диаметра подроста пихты. На всех пробных площадях хорошо развит характерный для южно-таежных пихтарников подлесок. Его общая густота составляет 13,0...14,0 тыс. шт./га и не зависит от степени повреждения древостоя. В пределах одного очага, на участках с различной степенью дефолиации пихтового древостоя, обнаруживаются различия в плотности и некоторых морфометрических параметрах ценопопуляций кустарников. Так, на пробной площади со 100 %-м усыханием пихты отмечено разрастание малины, увеличение средней высоты куста у всех видов подлеска, за исключением спиреи. Кроме того, у спиреи и черемухи в этих условиях возрастает число стволиков в кусте. Зафиксировано меньшее видовое богатство травяного яруса в сообществе со 100 %-м усыханием пихты. В эколого-ценотической структуре этого фитоценоза понижена доля мелко- и разнотравья, растет доля крупнотравья и крупных папоротников. Повышено и проективное покрытие этих видов, особенно *Aconitum septentrionale* и *Dryopteris expansa*. Обнаружено также несколько большее покрытие злаков (*Calamagrostis obtusata*, *C. langsdorffii*), однако они не занимают доминирующих позиций, как это часто происходит в пихтарниках, поврежденных сибирским шелкопрядом. Пихтовый подрост в частично поврежденных пихтарниках приурочен преимущественно к мелко- и среднетравно-зеленомошным и разнотравно-мелкотравным микрогруппировкам, сохранившимся вблизи крупных живых пихт, а также весьма обилен на полуразложившемся валеже. На осветленных участках, занятых разросшимися видами кустарников и крупнотравьем, подрост и проростки пихты практически не встречаются.

*Ключевые слова:* уссурийский полиграф, пихта сибирская, подрост, подлесок, живой напочвенный покров, эколого-ценотическая структура.

### Введение

Появление в локальных фаунах новых инвазивных видов растительно-ядных насекомых с каждым годом увеличивается [3]. Оказавшись в новом местообитании на часто неустойчивом к ним растении-хозяине, обычно полностью свободные от своих естественных врагов виды-пришельцы имеют возможность резко повысить плотность популяций. Ущерб от вспышек массового размножения этих видов часто превышает потери от местных видов вредителей.

Уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae)) – новый для Южной Сибири и чрезвычайно агрессивный стволовой вредитель пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) [4]. В пределах своего естественного ареала на Дальнем Востоке этот короед не является значимым вредителем и повреждает в основном ослабленные фитофагами и болезнями дальневосточные виды пихт – белокорую (*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.)) и цельнолистную (*A. holophylla* Maxim.) [4]. Однако в южно-таежных и горных лесах Средней и Южной Сибири, где одной из основных лесообразующих пород является пихта сибирская, полиграф распространен уже на 4,9 млн га пихтарников, что составляет почти треть ареала пихты сибирской [15]. Очаги размножения нового инвайдера обнаружены

на территории Красноярского и Алтайского краев, Кемеровской, Томской, Новосибирской областей, республик Алтай и Хакасия [3, 18]. Официальные данные о площадях пихтарников, поврежденных полиграфом, крайне противоречивы. Более-менее полные данные имеются лишь по Красноярскому краю, где на 2014 г. методами дистанционного лесопатологического мониторинга отмечены повреждения пихтарников в 9 лесничествах на площади 49,9 тыс. га [1]. Наземная верификация, проведенная на около 12 % этих площадей, свидетельствует, что на 81 % обследованной территории леса повреждены именно уссурийским полиграфом [1], который в настоящее время достоверно продвинулся на запад до Московской области и однажды даже был найден под Санкт-Петербургом [19, 32]. Хозяйственная значимость и быстрое продвижение уссурийского полиграфа на запад обуславливают необходимость придания ему статуса карантинного вида для европейских стран [34].

Крайняя неустойчивость пихты сибирской к комплексу патогенных офиостомовых грибов, ассоциированных с полиграфом, приводит к чрезвычайно быстрому, в течение 2-3 лет, усыханию пораженных короедом деревьев [3]. Имеющиеся на сегодняшний день данные свидетельствуют, что нападение уссурийского полиграфа не только носит катастрофический характер, но и приводит к полному разрушению древесного яруса. Отпад деревьев в очагах размножения инвайдера может достигать 99,8 % [11, 12].

Снижение сомкнутости крон и увеличение площади окон в древесном пологе, связанное с повышением прозрачности кроны пихт и постепенным переходом их в сухостой и валеж в очагах массового размножения *P. proximus*, приводит к изменению состава и структуры подлеска, травяного и мохового ярусов в растительных сообществах пихтовых лесов [31]. Как показали исследования сотрудников Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН в пихтарниках Томской области, вызываемые трансформации в качественной и количественной структуре древостоев как прямо, так и косвенно, через изменение микроклиматических условий, сказываются и на других компонентах биоценоза: подросте, живом напочвенном покрове, составе и структуре энтомофауны [13, 14].

Нами сделана попытка оценить состояние подроста, подлеска и травяного яруса в пихтовых древостоях, поврежденных полиграфом уссурийским на территории Красноярского края.

#### *Объекты и методика исследования*

По данным С.А. Кривец [12], местообитаниями полиграфа во вторичном ареале являются чистые пихтарники, полидоминантные пихтово-кедровые леса с примесью осины и березы, с разным участием и возрастом пихты в составе древостоев, низкогорные черневые леса, припоселковые кедровники с пихтовым подростом. Очаги полиграфа наиболее часто встречаются в монодоминантных пихтовых древостоях, однако он способен наращивать численность, достаточную для атак внешне здоровых деревьев, даже в насаждениях с единичным присутствием пихты.

В качестве мониторинговых участков для наших исследований были подобраны пихтовые древостой в очагах массового размножения уссурийского полиграфа с различной степенью повреждения древостоя на территории Кемчугского (пробные площади ПП 1, ПП 2) и Козульского (ПП 3) лесничеств Красноярского края в пределах Кеть-Чулымского лесорастительного округа южно-таежных и подтаежных лесов [26]. По комплексу признаков состава и структуры изученные сообщества можно отнести к сложной группе типов пихтовых лесов, произрастающих в условиях достаточно теплого и влажного климата на плодородных почвах с хорошей аэрацией [28, 17]. Все изученные сообщества представляют собой монодоминантные пихтарники (табл. 1) с хорошо развитым многовидовым подлеском из *Sorbus sibirica* Hedl., *Padus avium* Mill., видов *Spiraea* и др. Травяной ярус сложного строения, разновысотный. В его верхнем подъярусе доминируют представители высокотравья (*Aconitum septentrionale* Koelle, *Cacalia hastata* L. и др.), крупные папоротники (*Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenkins & Jermy, *Athyrium filix-femina* (L.) Roth.), крупные злаки (преимущественно *Calamagrostis obtusata* Trin.), во втором-третьем подъярусах – представители лесного разнотравья (*Rubus saxatilis* L., *Stellaria bungeana* Fenzl, *Galium boreale* L., *Carex macroura* Meinsh и др.) и низкотравья (*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Paris quadrifolia* L., *Viola uniflora* L. и др.). Моховой покров развит слабо, его проективное покрытие не превышает 20 %.

ПП 1 и ПП 2 расположены в непосредственной близости друг от друга, в пределах одного очага. Согласно данным Д.А. Демидко с соавторами [8], начало отмирания деревьев в очаге датировано 1998 г. ПП 3 располагается в 70 км западнее. По данным Ю.Н. Баранчикова с соавт. [2], отмирание пихты в сообществе началось еще в 1976–1988 гг. На ПП 1 отмечено 100 % усыхание пихты (табл. 1), на ПП 2 и ПП 3 сохранилось значительное число живых деревьев 1-2 категорий состояния. Характеристика пробных площадей приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Общая характеристика пробных площадей и начало энтомогенного отпада пихт**

Но- мер ПП	Географи- ческие коор- динаты	Состав древостоя	Сумма площа- дей попереч- ных сечений, м <sup>2</sup> /400 м <sup>2</sup>	Средняя категория жизненного состояния древостоя	Количе- ство усохших деревьев, %	Начало отпада пихт
1	N56°11'32" E092°12'37"	10П+К,Ос,Л	24,4	5,9	100	1998
2	N56°10'54" E092°12'91"	10П+Ос	12,0	3,8	49	1998
3	N56°12'24,1" E091°12'53"	10П	14,4	3,7	43	1976– 1988



На каждой из пробных площадей (размером 400 м<sup>2</sup>), ориентированных по сторонам света, проводили сплошной пересчет деревьев (диаметром на высоте груди  $D_{1,3} > 6$  см) с измерением их высоты и диаметра. Для оценки жизненного состояния древостоя использовали следующие категории (в баллах): 1 – здоровые, 2 – ослабленные, 3 – сильно ослабленные, 4 – усыхающие деревья, 5 – свежий, 6 – старый сухостой [23].

Подлесок и подрост обследовали на учетных профилях 2×20 м, заложенных по три в пределах каждой пробной площади. Профиль разбивали на 10 площадок размером 2×2 м, на которых проводили сплошной пересчет растений подроста с определением возраста, высоты, диаметра у корневой шейки, категории жизненного состояния. К подросту относили растения с  $D_{1,3} < 6$  см [20]. По жизненному состоянию выделяли три категории подроста (в баллах): 1 – жизнеспособный, 2 – ослабленный, 3 – усохший. По высоте выделяли мелкий (< 0,5 м), средний (0,5...1,5 м) и крупный подрост (> 1,5 м). Возраст подроста определяли по мутовкам, затем уточняли по спилам у корневой шейки модельных экземпляров. Пересчет на «стандартный» крупный подрост проводили по методике М.А. Софронова с соавторами [25].

Плотность ценопопуляций подлеска оценивали по фитоценотическим счетным единицам. Для каждой счетной единицы указывали высоту, для многоствольных кустарников – число стволиков. Достоверность различий между средними значениями устанавливали с помощью однофакторного дисперсионного анализа.

Определены видовой состав живого напочвенного покрова и проективное покрытие каждого вида. Латинские названия сосудистых растений приведены по [29]. Выделение эколого-ценотических групп (ЭЦГ) выполнено с использованием классификаций Т.Н. Буториной [5] и Д.И. Назимовой [22].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В составе подроста на всех пробных площадях абсолютно преобладает пихта, подрост кедра, ели и сосны единичен. Подрост лиственных пород отсутствует. Густота жизнеспособного подроста пихты на ПП 1 составляет 6,625 тыс. шт./га, на ПП 2 – 9,750 тыс. шт./га, что является достаточным для нормального возобновления [17], однако не достигает значений, характерных для южно-таежных пихтарников. Наибольшее количество здорового пихтового подроста (15,625 тыс. шт./га) отмечено на ПП 3.

Пересчет подроста различных категорий высоты на стандартный крупный подрост предложено использовать в качестве своеобразного универсального стандарта успешности возобновления [25]. Проведенный пересчет показывает, что в количественном отношении лесовозобновление на всех пробных площадях следует считать успешным, поскольку количество стандартного крупного подроста превышает 1,0 тыс. шт./га, на ПП 3 оно приближается к 4,0 тыс. шт./га.

Подрост пихты считается благонадежным при достижении высоты 0,5 м (возраст 11...15 лет), однако наиболее ценным является крупный подрост высотой более 1,5 м. В составе подростка на пробных площадях доминируют особи высотой до 0,5 м (рис. 1), крайне малочисленна категория подростка высотой более 1,5 м, что в целом отражает особенности жизненной стратегии пихты, формирующей «банк проростков» [21]. Считается, что в молодом возрасте (до 7...9 лет) подрост пихты весьма теневынослив и даже под пологом высокополнотного древостоя не испытывает угнетения. Ухудшение его жизненного состояния после достижения возраста 17...20 лет связано с потребностью в более высоком световом довольствии [10].

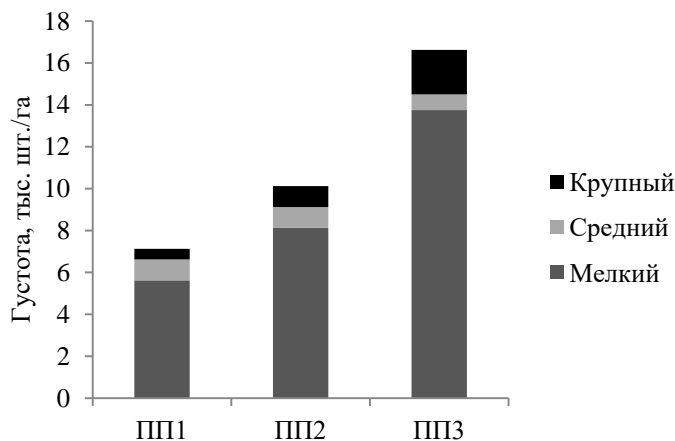


Рис. 1. Густота подростка пихты различных категорий высоты в очагах массового размножения *Polygraphus proximus*

Сравнительный анализ жизненного состояния подростка на пробных площадях показал, что вплоть до достижения высоты 1,5 м подрост пихты на всех участках вполне жизнеспособен (средний балл не превышает 1,1), однако затем его состояние резко ухудшается (рис. 2). Так, на сильно поврежденном участке (ПП 1) не обнаружено живых экземпляров подростка высотой более 1,5 м. На коре усохших экземпляров отмечены характерные следы втачивания короеда, а также смоляные потеки. На слабо поврежденных участках (ПП 2, ПП 3) встречается лишь единичный жизнеспособный подрост высотой 2,5...4,0 м. Гибель крупного подростка, вероятно, связана с нападением *P. proximus*. Так, в пихтарниках Томской области отмечен высокий (до 64 %) процент атак короедов на пихтовый подрост [14].

Морфометрические параметры подростка пихты на участках с различной степенью повреждения полиграфом в большинстве случаев достоверно не различаются. Однако отмечается явная тенденция к увеличению средней высоты и среднего диаметра подростка на ПП 1 по сравнению с ПП 2 и ПП 3 (рис. 3).

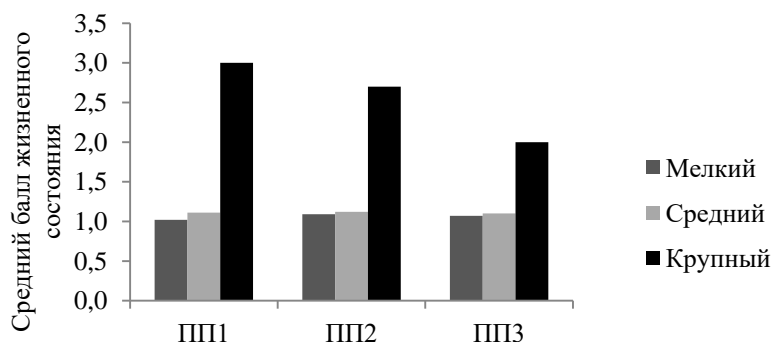
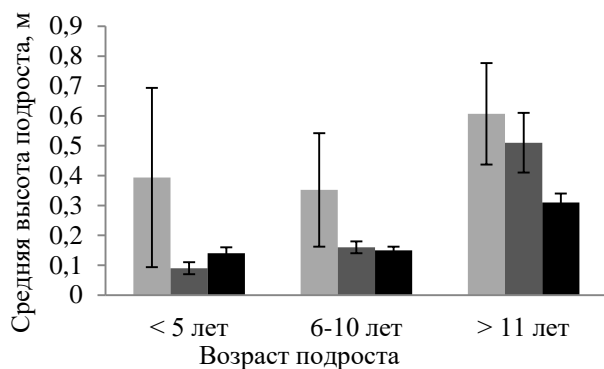
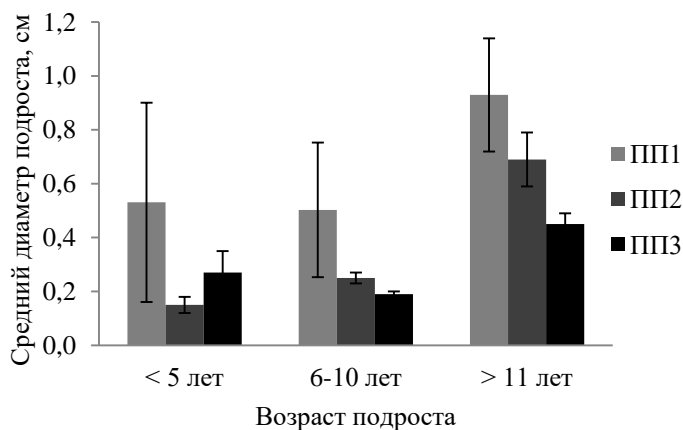


Рис. 2. Средний балл жизненного состояния подроста пихты различных категорий высоты в очагах массового размножения *Polygraphus proximus*



а



б

Рис. 3. Средние высота (а) и диаметр (б) подроста пихты разного возраста в очагах массового размножения *Polygraphus proximus*

По-видимому, это связано с повышенным световым довольствием в усохшем пихтарнике по сравнению с частично поврежденными: при полной деградации древостоя до нижних ярусов растительности проникает до 41 % солнечной радиации, в то время как при частичном повреждении – 24... 32 % [15]. Подобные эффекты наблюдались в пихтарниках, поврежденных сибирским шелкопрядом [33], что дополнительно было связано с улучшением трофических условий, вызванных активизацией минерализационных процессов в почве.

Пихтарники сложной группы типов леса, как правило, характеризуются наличием хорошо развитого подлеска [17], типичными представителями которого являются рябина сибирская (*Sorbus sibirica*), черемуха обыкновенная (*Padus avium*), спирея средняя (*Spiraea media* Schmidt), смородина колосистая (*Ribes spicatum* Robson) и др. Фитоценотическая роль подлеска неоднозначна. С одной стороны, подлесок сдерживает экспансию злаков, разрастание которых может привести к задернению почвы и практически подавить естественное возобновление хвойных пород [30], как это происходит, например, в таежных шелкопрядниках при полной дефолиации древостоя [33], с другой – в некоторых типах леса бурное развитие подлеска может привести к угнетению и даже гибели подроста хвойных пород вследствие конкуренции за свет и элементы питания [6]. Э.Н. Фалалеев [28] связывает негативное влияние подлеска на естественное возобновление пихты с образованием плотного слоя опавшей листвы, который не позволяет прорастающим семенам пробиться к почве.

На всех пробных площадях хорошо развит подлесок, образующий два подъяруса. Видовой состав подлеска типичен для южно-таежных пихтарников [17]. В первом подъярусе на всех трех пробных площадях встречаются рябина сибирская и черемуха обыкновенная, во втором подъярусе – смородина колосистая и малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.). Кроме того, на ПП 1 и ПП 2 отмечены спирея средняя и жимолость Палласа (*Lonicera Pallasii* Ledeb.), тогда как на ПП 3 произрастает другой вид спиреи – спирея дубровколистная (*S. chamaedrifolia* L.), а также – крушина ольховидная (*Frangula alnus* Mill.), бузина сибирская (*Sambucus sibirica* Nakai), волчегодник обыкновенный (*Daphne mezereum* L.), шиповник иглистый (*Rosa acicularis* L.). В целом видовой состав подлеска на ПП 3 богаче, чем на ПП 1 и ПП 2.

Общая густота подлеска на пробных площадях практически не различается и составляет 13,0...14,0 тыс. шт./га. В его составе преобладают рябина, виды спиреи, смородина, малина, черемуха (табл. 2).

При сравнении между собой всех трех пробных площадей каких-либо явных закономерностей изменения плотности и средней высоты ценопопуляций доминирующих видов подлеска в зависимости от степени повреждения древостоя не обнаружено (табл. 2). Однако, если учесть, что ПП 1 и ПП 2 находятся в непосредственной близости друг от друга, в одних лесорастительных условиях, и различаются лишь по степени повреждения древостоя, то можно найти явные отличия между ними по степени развития подлеска.

Таблица 2

Основные количественные параметры ценопопуляций подлеска на пробных площадях

Вид	Плотность, тыс. шт./га			Средняя высота куста, м			Среднее число стволиков в кусте, шт.		
	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 1	ПП 2	ПП 3
Рябина	4,75	4,00	2,25	2,37±0,17	1,50±0,20	2,08±0,26	1,00±0,00	1,00±0,00	1,00±0,00
Черемуха	0,88	2,12	0,75	2,92±0,40	1,70±0,29	2,11±0,30	2,33±1,33	1,24±0,14	2,33±0,80
Спирей	2,75	3,50	2,12	1,25±0,05	1,19±0,04	1,39±0,09	5,09±1,74	3,11±0,31	6,29±1,14
Смородина	2,00	1,25	2,62	1,47±0,08	1,13±0,19	1,60±0,17	1,47±0,17	1,40±0,22	2,10±0,36
Малина	3,37	1,00	4,37	1,40±0,08	0,92±0,19	1,18±0,07	1,08±0,08	1,50±0,19	4,17±0,92

Примечание. Средние значения высоты куста и числа стволиков в кусте приведены со статистической ошибкой.

Так, на ПП 1, где пихта погибла полностью, по сравнению с ПП 2 существенно выше плотность ценопопуляции малины, а также достоверно выше ( $F = 5,5-11,6$ ) средняя высота куста у всех видов кустарников, за исключением спиреи. Кроме того, на ПП 1 зафиксировано большее число стволиков в кусте у черемухи и спиреи (табл. 2).

Состав и степень развития живого напочвенного покрова могут оказать решающее влияние на естественное возобновление темнохвойных пород. Мелкотравно-зеленомошные ассоциации благоприятны для поселения и развития темнохвойных пород [7, 16, 27]. Однако изменение гидро-термического режима после осветления полога может привести к развитию дернового процесса почвообразования и развитию мощного травяного покрова из злаков, который, несомненно, препятствует формированию проростков пихты сибирской [33]. Негативное влияние на естественное возобновление темнохвойных пород может оказывать крупнотравье и крупные папоротники [9, 24].

Пробные площади различаются по видовому богатству травяного яруса. Минимальное флористическое богатство (23 вида сосудистых растений и 9 видов мхов) зафиксировано на ПП 1, максимальное (39 видов сосудистых растений и 11 видов мхов) – на ПП 3 (рис. 4). На ПП 2 общее число видов травяного яруса выше, чем на ПП 1, и составляет 27. Здесь, в условиях частичной дефолиации древостоя, в большей степени сохранились разнообразные микроместообитания, пригодные для существования видов теневого таежного мелкотравья, а также некоторых представителей разнотравья и крупнотравья.

Анализ эколого-ценотической структуры травяного яруса пихтарников с различной степенью дефолиации древостоя показывает, что на всех пробных площадях преобладают виды таежно-мелкотравной и разнотравной эколого-ценотических групп (ЭЦГ): *Oxalis acetosella* L., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Mitella nuda* L., *Rubus saxatilis* L., *Stellaria bungeana* Fenzl, *Galium boreale* L., *Viola uniflora* L. (рис. 4).

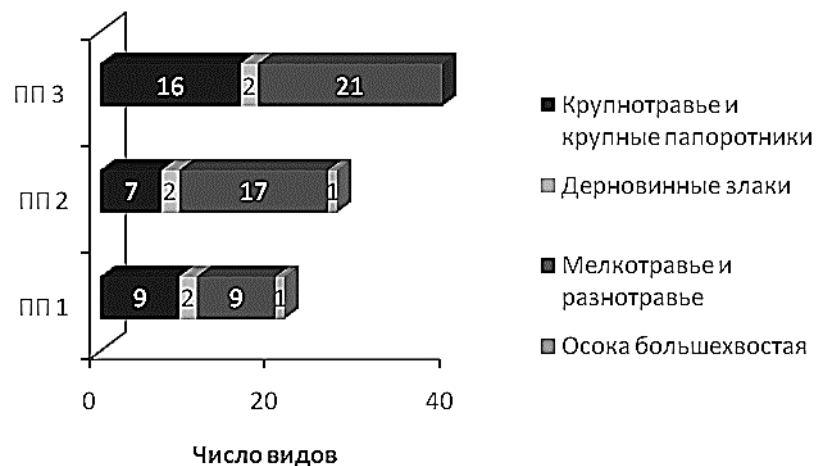


Рис. 4. Эколого-ценотическая структура травяно-кустарничкового яруса в очагах массового размножения *Polygraphus proximus*

Крупнотравная и крупнопапоротниковая ЭЦГ включают *Aconitum septentrionale*, *Athyrium filix-femina*, *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., *Dryopteris expansa*, *Cacalia hastata* L. и др. На участке со 100 %-м усыханием древостоя (ПП 1) отмечено резкое увеличение проективного покрытия и жизненности *Aconitum septentrionale* (50 %) и *Dryopteris expansa* (15 %).

Группа дерновинных злаков представлена на всех пробных площадях преимущественно *Calamagrostis obtusata* Trin. При этом в полностью поврежденном пихтарнике (ПП 1) проективное покрытие злаков составляет 7...10 %, тогда как в частично поврежденных – 3...5 %. В целом не отмечено существенного разрастания дерновинных злаков, столь характерного для зеленомошных и мелкотравно-зеленомошных пихтарников, поврежденных сибирским шелкопрядом [33], что объясняется тем обстоятельством, что в данных местообитаниях складываются благоприятные условия для развития подлесочных пород и представителей крупнотравья, которые успешно конкурируют с дерновинными злаками.

Осока большехвостая (осочка) – *Carex macroura* Meish – выделяется Т.Н. Буториной [5] и Д.И. Назимовой [22] в отдельную ЭЦГ, поскольку она может быть абсолютным доминантом в травяном покрове. Несмотря на довольно агрессивную жизненную стратегию [9], осочка в исследуемых сообществах, по-видимому, не оказывает существенного негативного воздействия на проростки хвойных пород и не препятствует их естественному возобновлению.

Основу мохового яруса на ПП 1 и ПП 2 составляют типичные для темнохвойной тайги виды: *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp, *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) DeNot, *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst. При этом на ПП 1 моховой покров в сильной степени дегради-

рован, его общее проективное покрытие не превышает 2...3 %. В условиях частичной дефолиации древостоя на ПП 2 моховой покров хорошо сохранился, проективное покрытие достигает 15...20 %. На ПП 3 видовой состав мхов отличается от ПП 1 и ПП 2. Здесь доминируют *Rhytidiadelphus triquetrus*, *Plagiochila porelloides* (Torr. ex Nees) Lindenb., *Rhodobryum roseum* (Hedw.) Limpr. Сомкнутый моховой покров отсутствует, что сближает данное сообщество с черневыми лесами.

Пробные площади резко различаются по степени выраженности горизонтальной структуры живого напочвенного покрова. Это отражается на пространственном распределении пихтового подроста. Так, на ПП 1 мозаичность выражена довольно слабо, что несомненно связано с отсутствием затенения вследствие гибели древесного яруса. Здесь хорошо развит мощный покров из представителей крупнотравья и злаков, достигающий высоты 1,5 м, т. е. фактически сливающийся со вторым кустарниковым подъярусом. Подрост пихты на ПП 1 относительно малочислен и распределен достаточно равномерно. На ПП 2, где древостой пострадал частично, сохранилось достаточно много затененных участков с мелкотравно-зеленомошным покровом, а также полуразложившегося валежа, представляющего собой идеальную среду для поселения пихтового подроста. Наиболее четко мозаичность проявляется на ПП 3. Здесь подрост пихты сконцентрирован вокруг крупных неповрежденных деревьев, где преобладают мелкотравно-разнотравные группировки, тогда как на осветленных участках, занятых разросшимися видами кустарников и крупнотравьем, молодые пихты практически не встречаются.

#### Заключение

Повреждение пихтовых лесов уссурийским полиграфом приводит к целому комплексу изменений в нижних ярусах фитоценозов.

Густота жизнеспособного подроста пихты сибирской в исследованных очагах массового размножения уссурийского полиграфа варьирует от 6,625 до 15,625 тыс. шт./га (более 1,0 тыс. шт./га в пересчете на крупный подрост), что считается достаточным для успешного естественного возобновления. Однако отмечаются нарушения, выражающиеся преимущественно в снижении среднего балла жизнеспособности крупного подроста, что, по-видимому, связано с атаками полиграфа. В условиях полного отмирания пихтового древостоя жизнеспособный крупный подрост отсутствует. При повышенной освещенности на пробной площади с полной дефолиацией пихтового древостоя отмечена тенденция к увеличению средних значений высоты и диаметра подроста пихты.

На всех пробных площадях хорошо развит характерный для южно-таежных пихтарников подлесок, включающий от 5 до 9 видов кустарников. Его общая густота составляет 13,0...14,0 тыс. шт./га и не зависит от степени повреждения древостоя. В пределах одного очага на участках с различной степенью дефолиации пихтового древостоя обнаруживаются различия в плотности и некоторых морфометрических параметрах ценопопуляций кустарников. Так, на пробной площади со 100 %-м усыханием пихты отмечено разрас-

тание малины, увеличение средней высоты куста у всех видов подлеска, кроме спиреи. При этом у спиреи и черемухи в таких условиях увеличивается число стволиков в кусте.

Зафиксировано меньшее видовое богатство травяного яруса в сообществе со 100 %-м усыханием пихты. В эколого-ценотической структуре этого фитоценоза понижена доля мелкотравья и разнотравья и, напротив, увеличена доля крупнотравья и крупных папоротников. Повышено и проективное покрытие данных видов, особенно *Aconitum septentrionale* и *Dryopteris expansa*. Обнаружено также несколько большее покрытие злаков (*Calamagrostis obtusata*, *C. langsdorfii*), однако они не занимают доминирующих позиций, как это часто происходит в пихтарниках, поврежденных сибирским шелкопрядом.

Пихтовый подрост в частично поврежденных пихтарниках приурочен преимущественно к мелкотравно-зеленомошным и разнотравно-мелкотравным микрогруппировкам, сохранившимся вблизи крупных живых пихт, а также весьма обилён на полуразложившемся валеже. На осветленных участках, занятых разросшимися видами кустарников и крупнотравьем, подрост и проростки пихты практически не встречаются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астапенко С.А., Ягунов М.Н., Голубев Д.В., Сашко Е.В. Оценка воздействия и распространения насекомых-вредителей в лесах Красноярского края на примере полиграфа уссурийского // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., г. Железногорск, 2014 г. Железногорск: СПСА, 2014. С. 46–51.
2. Баранчиков Ю.Н., Демидко Д.А., Лаптев А.В., Петько В.М. Динамика отмирания деревьев пихты сибирской в очаге уссурийского полиграфа // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 6. С. 132–138.
3. Баранчиков Ю.Н., Пашенова Н.В., Петько В.М. Факторы динамики численности популяций уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Scolytidae) на фронтах его инвазийного наступления // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 4. С. 100–104.
4. Баранчиков Ю.Н., Петько В.М., Астапенко С.А., Акулов Е.Н., Кривец С.А. Уссурийский полиграф – новый агрессивный вредитель пихты в Сибири // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2011. № 4(80). С. 78–81.
5. Буторина Т.Н. Эколого-ценотический анализ кустарничково-травяного яруса лесных ассоциаций // Типы лесов Сибири. М.: АН СССР, 1963. С. 30–52.
6. Грязькин А.В. Структурная организация фитоценозов южной тайги (на примере ельников зеленомошной группы типов леса). СПб.: СПб ГЛТА, 1999. 136 с.
7. Дебков Н.М. Количественные и качественные параметры возобновления под пологом древостоев, сформировавшихся из предварительных генераций // Лесн. журн. 2015. № 1. С. 35–44. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Демидко Д.А., Лаптев А.В., Петько В.М., Бабичев Н.С., Баранчиков Ю.Н. Радиальный прирост ствола как предиктор гибели деревьев пихты сибирской в очаге размножения уссурийского полиграфа // Лесные биогеоценозы boreальной зоны: география, структура, функции, динамика: материалы Всерос. науч. конф. с междунар.



участием, посвященной 70-летию создания Ин-та леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, Красноярск, 16–19 сент. 2014 г. Новосибирск: СО РАН, 2014. С. 677–679.

9. *Исмаилова Д.М., Назимова Д.И.* Долговременная динамика фитоценотической структуры черневых пихтово-осиновых лесов в предгорьях Западного Саяна // Лесоведение. 2007. № 3. С. 3–10.

10. *Калачев А.А., Архангельская Т.А., Парамонов Е.Г.* Влияние полноты и состава древостоя на жизнеспособность пихтового подростка в условиях Рудного Алтая // Мир науки, культуры, образования. 2013. № 1(38). С. 328–331.

11. *Керчев И.А.* Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Scolytidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии // Рос. журн. биол. инвазий. 2014. № 2. С. 80–94.

12. *Кривец С.А.* Заметки по экологии уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) в Западной Сибири // Изв. СПбЛТА. 2012. Вып. 200. С. 94–105.

13. *Кривец С.А., Бисирова Э.М., Демидко Д. А., Керчев И.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А.* Биогеоэкологические аспекты инвазии уссурийского полиграфа в темнохвойные леса Западной Сибири // Биогеоэкология и ландшафтная экология: итоги и перспективы: материалы IV Междунар. конф., посвященной памяти Ю.А. Львова (Томск, 28–30 нояб. 2012 г.). Томск: Том. гос. ун-т, 2012. С. 212–217.

14. *Кривец С.А., Бисирова Э.М., Керчев И.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А.* Трансформация таежных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // Рос. журн. биол. инвазий. 2015. № 1. С. 41–63.

15. *Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Пац Е.Н., Чернова Н.А., Демидко Д.А., Мухортова Л.В., Пашенова Н.В., Петько В.М., Баранчиков Ю.Н.* Механизмы экспансии и роль уссурийского полиграфа в современных сукцессионных процессах сибирской тайги: итоги 3-летних исследований: презентация на VIII чтении памяти О.А. Катаева. Режим доступа: <http://spbftu.ru/UserFiles/Image/kataev/2015/Krivets.pdf>. Дата обращения: 09.12.2014.

16. *Коновалова М.Е.* Восстановительная динамика леса на сплошных вырубках горных кедровников Южной Сибири // Лесоведение. 2015. № 4. С. 267–274.

17. *Крылов Г.В., Марадудин И.И., Михеев Н.И., Козакова Н.Ф.* Пихта. М.: Агропромиздат, 1986. 239 с.

18. *Леонов Д.С., Тараскин Е.Г.* Уссурийский полиграф в Кемеровской области – современное состояние. Режим доступа: [http://www.rcfh.ru/04\\_10\\_2012\\_8be8d.html](http://www.rcfh.ru/04_10_2012_8be8d.html).

19. *Мандельштам М.Ю., Поповичев Б.Г.* Аннотированный список видов короedов (Coleoptera, Scolytidae) Ленинградской области // Энтомолог. обозрение. 2000. Т. 79, № 3. С. 599–618.

20. Методы изучения лесных сообществ / отв. ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузова. СПб.: НИИХимии СПб ГУ, 2002. 240 с.

21. *Миркин Б.М., Наумова Л.Г.* Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа: Гилем, 2012. 488 с.

22. *Назимова Д.И.* Типы леса северной части Западного Саяна // Типы лесов Сибири. М.: АН СССР, 1963. С. 108–132.

23. Правила санитарной безопасности в лесах: утв. приказом Мин-ва природных ресурсов и экологии РФ от 24 дек. 2013 г. № 613. Режим доступа: [http://umocpartner.ru/assets/files/PDF/1/2014\\_08\\_281.pdf](http://umocpartner.ru/assets/files/PDF/1/2014_08_281.pdf).

24. *Смирнов Н.С.* Типологическое и видовое разнообразие темнохвойных лесов нижнего течения реки Б. Порожня (приток р. Печоры, Печоро-Илычский заповедник) // Экология. 2013. № 1. С. 30–38.

25. Софронов М.А., Волокитина А.В., Мартынов К.Н. Оценка успешности лесовозобновления с учетом разновозрастности подроста и неравномерности его размещения по площади // Лесн. хоз-во. 2003. № 5. С. 16–17.
26. Стаканов В.Д. Характеристика лесного покрова // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: СО РАН, 2002. С. 19–27.
27. Сташкевич Н.Ю., Исмаилова Д.М., Назимова Д.И. Роль синузальной структуры в возобновлении кедрового и пихтового подроста под пологом горных черневых кедровников // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 1-2. С. 116–122.
28. Фалалеев Э.Н. Пихта. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 85 с.
29. Флора Сибири. Т. 1–13. Новосибирск: Наука, 1988–1997.
30. Цветков В.Ф. Вопросы лесовозобновления в связи с рубками на Европейском Севере России // Некоторые вопросы лесоведения и лесоводства на Европейском Севере России. Архангельск: АГТУ, 2005. С. 29–76.
31. Чернова Н.А. Трансформация растительного покрова пихтовых лесов Томской области под влиянием уссурийского полиграфа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 3, № 2. С. 271–277.
32. Чилахсаева Е.А. Первая находка *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Scolytidae) в Московской области // Бюлл. Моск. общ-ва испытателей природы. Отд. биол. 2008. Т. 113, вып. 6. С. 39–41.
33. Шабалина О.М., Разнобарский В.Г., Гродницкий Д.Л. Живой напочвенный покров и подрост в таежных шелкопрядниках // Прил. к Сиб. эколог. журн. 2002. Т. IX, № 1. С. 23–32.
34. *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Scolytidae). Sakhalin-Fir Bark Beetle. *European and Mediterranean Plant Protection Organization. Panel Review Date 2015-03*. Available at: [www.eppo.int/QUARANTINE/Alert\\_List/insects/polygraphus\\_proximus.htm](http://www.eppo.int/QUARANTINE/Alert_List/insects/polygraphus_proximus.htm)

Поступила 20.04.16

UDC 581.55:595.768.24

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.67

#### Changes of Phytocenosis Understories of Fir Forests in the Breeding Grounds of Four-Eyed Fir Bark Beetle (*Polygraphus Proximus* Blandf.) in the Krasnoyarsk Territory

*O.M. Shabalina*<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

*I.N. Bezkorovaynaya*<sup>1</sup>, Doctor of Biological Sciences, Professor

*Yu.N. Baranchikov*<sup>2</sup>, Candidate of Biological Sciences, Senior Research Officer

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Svobodnyy pr., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; e-mail: shabalina11@bk.ru

<sup>2</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: baranchikov-yuri@yandex.ru

Currently, the attention of forest pathologists is directed to the problem of a new aggressive pest of Siberian fir – four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera,

---

*For citation:* O.M. Shabalina, I.N. Bezkorovaynaya, Yu.N. Baranchikov. Changes of Phytocenosis Understories of Fir Forests in the Breeding Grounds of Four-Eyed Fir Bark Beetle (*Polygraphus Proximus* Blandf.) in the Krasnoyarsk Territory. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 67–84. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.67

Scolytidae)). Until recently, the species was known in the Khabarovsk and Primorsky Territories, Sakhalin, the Kuril Islands, Korea, Japan, and northeast China, where usually colonized the weakened forms of Far Eastern firs, mainly *Abies nephrolepis* and *A. holophylla*. The first trees died of four-eyed fir bark beetle in the Krasnoyarsk Territory were dated by 1976. Now *Polygraphus proximus* is met in seven territorial entities of the Siberian Federal Districts, at 4.9 mln ha of fir forests (or nearly at one-third of the range of Siberian fir, which is extremely unstable to the action of *P. proximus*). The goal of research is to assess the condition of the undergrowth, understory and herb layer in fir stands, damaged by four-eyed fir bark beetle in the Krasnoyarsk Territory. The studies are conducted in the southern taiga grass fir forests in the Krasnoyarsk Territory. The changes in the understories of fir plant communities with varying degrees of stand damage by *P. proximus* are examined. The natural regeneration of fir in all test areas is satisfactory (the number of standard large undergrowth is more than 1.0 ths. pcs./ha). However, there is a decline in the average viability score of large undergrowth, that seems to be associated with the attacks of four-eyed fir bark beetle. In the context of complete dieback of fir stands large viable undergrowth is absent. In maximum light intensity the tendency to increase the average height and the average diameter of fir undergrowth is observed. The undergrowth typical for the southern taiga fir forests is well developed in all plots. Its total thickness is 13.0...14.0 ths pcs./ha, and it does not depend on the degree of stand damage. Within an outbreak area in the plots with varying defoliation degrees of fir stand we reveal the differences in the density and some morphometric parameters of shrubs coenopopulations. So, on the plot with 100 % fir defoliation we mark the raspberry accretive motion, increase of the average bush height for all types of understory, except spiraea. In addition, spiraea and bird cherry in these conditions increase the number of stalks in a bush. The lower species richness of the herb layer in a community with 100 % fir defoliation is established. The share of short and wild grasses is reduced in the ecological and cenotic structure of this phytocenosis; the share of high grasses and large ferns is increased. A projective cover of these species is also increased, especially *Aconitum septentrionale* and *Dryopteris expansa*. A few more crops cover is found (*Calamagrostis obtusata*, *C. langsdorfii*), but they do not occupy a dominant position, as it often happens in the fir forests damaged by Siberian silkworm moth. Fir undergrowth in the partially damaged fir stands is confined mainly to small grass-pleurocarpous moss and forb-small grass microgroups near large living firs, as well as on a semidecomposed windfall. Undergrowth and fir seedlings almost never occur in the illuminated areas occupied by overgrown species of shrubs and high grasses.

**Keywords:** four-eyed fir bark beetle, Siberian fir, undergrowth, understory, forest live cover, ecological and cenotic structure.

#### REFERENCES

1. Astapenko S.A., Yagunov M.N., Golubev D.V., Sashko E.V. Otsenka vozdeystviya i rasprostraneniya nasekomykh-vrediteley v lesakh Krasnoyarskogo kraya na primere poligrafa ussuriyskogo [Assessing the Impact and Spread of Pests in the Forests of the Krasnoyarsk Region on an Example of Four-Eyed Fir Bark Beetle]. *Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnykh prirodnykh yavleniy i chrezvychaynykh situatsiy: materialy IV Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Monitoring, Modeling and Prediction of Natural Hazards and Extremal Situations: Proc. 4th All-Russ. Sci. and Prac. Conf.]. Zheleznogorsk, 2014, pp. 46–51.
2. Baranchikov Yu.N., Demidko D.A., Laptev A.V., Pet'ko V.M. Dinamika otmiraniya derev'ev pikhty sibirskoy v ochage ussuriyskogo poligrafa [Dynamics of Siberian Fir Dieback in the Outbreak Area of the Bark Beetle]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2014, vol. 18, no. 6, pp. 132–138.

3. Baranchikov Yu.N., Pashenova N.V., Pet'ko V.M. Faktory dinamiki chislennosti populyatsiy ussuriyskogo poligrafa *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Scolytidae) na frontakh ego invazijnogo nastupleniya [Factors of Populational Dynamics in Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Scolytidae) on Frontiers of Its Invasion]. *Interekspos Geo-Sibir'* [Interexpo Geo Siberia], 2012, vol. 4, pp. 100–104.
4. Baranchikov Yu.N., Pet'ko V.M., Astapenko S.A., Akulov E.N., Krivets S.A. Ussuriyskiy poligraf – novyy agressivnyy vreditel' pikhty v Sibiri [*Polygraphus proximus* – a New Aggressive Invasive Pest of Firs in Siberia]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2011, no. 4(80), pp. 78–81.
5. Butorina T.N. Ekologo-tsenoticheskiy analiz kustarnichkovo-travyanogo yarusa lesnykh assotsiatsiy [Ecological and Coenotic Analysis of the Shrub-Grass Layer of Forest Phytocenoses]. *Tipy lesov Sibiri* [Types of Forests of Siberia]. Moscow, 1963, pp. 30–52.
6. Gryaz'kin A.V. *Strukturnaya organizatsiya fitotsenozov yuzhnoy taygi (na primere el'nikov zelenomoshnoy gruppy tipov lesa)* [Structural Phytocenoses Organization of the Southern Taiga (by the Example of Spruce Forests of Hylocomium Group of Forest Types)]. Saint Petersburg, 1999. 136 p.
7. Debkov N.M. Kolichestvennye i kachestvennye parametry vozobnovleniya pod pologom drevostoev, sformirovavshikhsya iz predvaritel'nykh generatsiy [Quantitative and Qualitative Parameters of Renewal Under the Canopy of Forest Stand, Formed from Preliminary Generations]. *Lesnoy zhurnal*, 2015, no. 1, pp. 35–44.
8. Demidko D.A., Laptev A.V., Pet'ko V.M., Babichev N.S., Baranchikov Yu.N. Radial'nyy prirost stvola kak prediktor gibeli derev'ev pikhty sibirskoy v ochage razmnozheniya ussuriyskogo poligrafa [The Radial Growth of a Trunk as a Predictor of Death of Siberian Fir Trees in the Outbreak Breeding of Four-Eyed Fir Bark Beetle]. *Lesnye biogeotsenozy boreal'noy zony: geografiya, struktura, funktsii, dinamika: materialy Vseros. nauch. konf. s mezhd. uchast. posv. 70-letiyu sozd. Inst-ta lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN, Krasnoyarsk, 16–19 sentyabrya 2014 g.* [Forest Ecosystems of the Boreal Zone: Geography, Structure, Functions, Dynamics: Proc. All-Russ. Sci. Conf. With Int. Part., Dedicated to the 70th Anniversary of the V.N. Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, September 16–19, 2014]. Novosibirsk, 2014, pp. 677–679.
9. Ismailova D.M., Nazimova D.I. Dolgovremennaya dinamika fitotsenoticheskoy struktury chernyevykh pikhtovo-osinovykh lesov v predgor'yakh Zapadnogo Sayana [Long-Term Dynamics of the Phytocenotic Structure of Taiga Fir-Aspen Forests in the Western Sayan Foothills]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 3, pp. 3–10.
10. Kalachev A.A., Arkhangel'skaya T.A., Paramonov E.G. Vliyanie polnoty i sostava drevostoya na zhiznesposobnost' pikhtovogo podrosta v usloviyakh Rudnogo Altaya [Influence of Normality and Composition of Stand on Viability of Fir Undergrowth in Rudny Altai]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya* [The World of Science, Culture and Education], 2013, no. 1(38), pp. 328–331.
11. Kerchev I.A. Ekologiya poligrafa ussuriyskogo *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) v Zapadno-Sibirskom regione invazii [Ecology of Four Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) in the West-Siberian Region of Invasion]. *Rossiyskiy Zhurnal Biologicheskikh Invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions], 2014, no. 2, pp. 80–94.
12. Krivets S.A. Zametki po ekologii ussuriyskogo poligrafa *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) v Zapadnoy Sibiri [Notes on the Ecology of the Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Scolytidae) in West Siberia]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii (Izvestia SPbLTA)*, 2012, no. 200, pp. 94–105.

13. Krivets S.A., Bisirova E.M., Demidko D. A., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. Biogeotsenologicheskie aspekty invazii ussuriyskogo poligrafa v temnokhvoynye lesa Zapadnoy Sibiri [Biogeocenological Aspects of Four-Eyed Fir Bark Beetle Invasion in the Dark Coniferous Forests of Western Siberia]. *Biogeotsenologiya i landshaftnaya ekologiya: itogi i perspektivy: materialy IV Mezhdunar. konf., posvyashchennoy pamyati Yu.A. L'vova (Tomsk, 28–30 noyab. 2012 g.)* [Biogeocenology and Landscape Ecology: Results and Prospects: Proc. 4th Int. Conf., Dedicated to the Memory of Yu.A. Lvov (Tomsk, 28–30 November, 2012)]. Tomsk, 2012, pp. 212–217.

14. Krivets S.A., Bisirova E.M., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. Transformatsiya taezhnykh ekosistem v ochage invazii poligrafa ussuriyskogo *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) v Zapadnoy Sibiri [Transformation of Taiga Ecosystems in Western Siberia in Invasion Focus of Four-Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus Proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae)]. *Rossiyskiy Zhurnal Biologicheskikh Invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions], 2015, no. 1, pp. 41–63.

15. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Pats E.N., Chernova N.A., Demidko D.A., Mukhortova L.V., Pashenova N.V., Pet'ko V.M., Baranchikov Yu.N. *Mekhanizmy ekspansii i rol' ussuriyskogo poligrafa v sovremennykh sutsessionnykh protsessakh sibirskoy taygi: itogi 3-letnykh issledov.: prezentatsiya na VIII chteniyakh pamyati O.A. Kataeva* [Mechanisms of Expansion and the Role of Four-Eyed Fir Bark Beetle in the Current Successional Processes of the Siberian Taiga: the Results of 3 Years of Research: Presentation at the 8th Readings to the Memory of O.A. Kataev]. Available at: <http://spbftu.ru/UserFiles/Image/kataev/2015/Krivets.pdf> (accessed 09.12.2014).

16. Konovalova M.E. Vosstanovitel'naya dinamika lesa na sploshnykh vyrubkakh gornyykh kedrovnikov Yuzhnoy Sibiri [Successive Dynamics of Forests on Clearcuts of the Montane Siberian Pine Forests in South Siberia]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 4, pp. 267–274.

17. Krylov G.V., Maradudin I.I., Mikheev N.I., Kozakova N.F. *Pikhta* [Fir Tree]. Moscow, 1986. 239 p.

18. Leonov D.S., Taraskin E.G. *Ussuriyskiy poligraf v Kemerovskoy oblasti – sovremennoe sostoyanie* [Four-Eyed Fir Bark Beetle in the Kemerovo Region: the Current State]. Available at: [http://www.rcfh.ru/04\\_10\\_2012\\_8be8d.html](http://www.rcfh.ru/04_10_2012_8be8d.html).

19. Mandel'shtam M.Yu., Popovichev B.G. Annotirovanny spisok vidov koroedov (Coleoptera, Scolytidae) Leningradskoy oblasti [Annotated List of Bark Beetles (Coleoptera, Scolytidae) of the Leningrad Region]. *Entomologicheskoe obozrenie* [Entomological Review], 2000, vol. 79, no. 3, pp. 599–618.

20. Yarmishko V.T., Lyanguzova I.V., eds. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods of Studying of Forest Communities]. Saint Petersburg, 2002. 240 p.

21. Mirkin B.M., Naumova L.G. *Sovremennoe sostoyanie osnovnykh kontseptsiy nauki o rastitel'nosti* [The Current State of the Basic Concepts of the Science of Vegetation]. Ufa, 2012. 488 p.

22. Nazimova D.I. Tipy lesa severnoy chasti Zapadnogo Sayana [Forest Types of the Northern West Sayan]. *Tipy lesov Sibiri* [Forest Types of Siberia]. Moscow, 1963, pp. 108–132.

23. *Pravila sanitarnoy bezopasnosti v lesakh: utv. prikazom Min-va prirodnykh resursov i ekologii RF ot 24 dek. 2013 g. № 613* [Rules of Sanitary Safety in the Forests: Appr. by the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of 24 December, 2013. No. 613]. Available at: [http://umocpartner.ru/assets/files/PDF/1/2014\\_08\\_281.pdf](http://umocpartner.ru/assets/files/PDF/1/2014_08_281.pdf).

24. Smirnov N.S. Tipologicheskoe i vidovoe raznoobrazie temnokhvoynnykh lesov nizhnego techeniya reki B. Porozhnyaya (pritok r. Pechory, Pechoro-Ilychskiy zapovednik) [Typological and Species Diversity of Dark Conifer Forests in the Lower Reaches of the Bol'shaya Porozhnyaya River (a Tributary of the Pechora River, Pechora-Ilych State Nature Reserve)]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2013, no. 1, pp. 30–38.
25. Sofronov M.A., Volokitina A.V., Martynov K.N. Otsenka uspeshnosti lesovozobnovleniya s uchetom raznovozrastnosti podrosta i neravnomernosti ego razmeshcheniya po ploshchadi [Evaluation of the Success Reforestation Based on the Undergrowth Age Difference and the Unevenness of Its Location in the Area]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2003, no. 5, pp. 16–17.
26. Stakanov V.D. Kharakteristika lesnogo pokrova [Characteristics of the Forest Cover]. *Lesnye ekosistemy Eniseyskogo meridiana* [Forest Ecosystems of the Yenisei Meridian]. Novosibirsk, 2002, pp. 19–24.
27. Stashkevich N.Yu., Ismailova D.M., Nazimova D.I. Rol' sinuzial'noy struktury v vozobnovlenii kedrovogo i pikhtovogo podrosta pod pologom gornyykh chernykh kedrovnikov [The Role of the Synusial Structure in the Reforestation of Cedar and Fir Undergrowth Under the Canopy of the Mountain Taiga Cedar Forests]. *Khvoynnye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2013, vol. XXXI, no. 1-2, pp. 116–122.
28. Falaleev E.N. *Pikhta* [Fir Tree]. Moscow, 1982. 85 p.
29. *Flora Sibiri. T. 1–13* [Flora of Siberia. Vol. 1–13]. Novosibirsk, 1988–1997.
30. Tsvetkov V.F. Voprosy lesovozobnovleniya v svyazi s rubkami na Evropeyskom Severe Rossii [The Issues of Reforestation in Connection with Felling in the European North of Russia]. *Nekotorye voprosy lesovedeniya i lesovodstva na Evropeyskom Severe Rossii* [Some Problems of Forest Science and Forestry in the European North of Russia]. Arkhangel'sk, 2005, pp. 29–76.
31. Chernova N.A. Transformatsiya rastitel'nogo pokrova pikhtovykh lesov Tomskoy oblasti pod vliyaniem ussuriyskogo poligrafa [Transformation of Vegetation in Tomsk Region Siberian Fir Forests Under the Influence of *Polygraphus proximus* Blandf]. *Interexpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo Siberia], 2014, vol. 3, no. 2, pp. 271–277.
32. Chilakhsaeva E.A. Pervaya nakhodka *Polygraphus proximus* (Coleoptera: Scolytidae) v Moskovskoy oblasti [The First Finding of *Polygraphus proximus* (Coleoptera: Scolytidae) in the Moscow Region]. *Byullyuten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologii* [Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series], 2008, vol. 113, no. 6, pp. 39–41.
33. Shabalina O.M., Raznobarskiy V.G., Grodnitskiy D.L. Zhivoy napochvennyy pokrov i podrost v taezhnykh shelkopryadnikakh [Forest Live Cover and Undergrowth in the Taiga Silkmoth Forests]. *Prilozhenie k Sibirskomu ekologicheskomu zhurnalu* [Contemporary Problems of Ecology. Appendix], 2002, vol. IX, no. 1, pp. 23–32.
34. *Polygraphus proximus* (Coleoptera: Scolytidae). Sakhalin-Fir Bark Beetle. *European and Mediterranean Plant Protection Organization. Panel Review Date 2015-03*. Available at: [www.eppo.int/QUARANTINE/Alert\\_List/insects/polygraphus\\_proximus.htm](http://www.eppo.int/QUARANTINE/Alert_List/insects/polygraphus_proximus.htm).

Received on April 20, 2016

УДК 582.475.4:631.524.82:631.524.5  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.85

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА У ПОЛОВЫХ ТИПОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ИЗБЫТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВ\*

*Е.А. Пинаевская, асп., мл. науч. сотр.*

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

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики Российской академии наук, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000;  
e-mail: aviatorov8@mail.ru, tarkse@yandex.ru

У сосны обыкновенной проявляется внутривидовая индивидуальная генетическая изменчивость по типу сексуализации. Цель исследований – оценка изменчивости радиального прироста у деревьев сосны разных половых типов в условиях длительного избыточного увлажнения почв в северной тайге европейской части России. Исследования проводили в сосняках кустарничково-сфагновых, произрастающих на болотных верховых почвах, в низовьях Северной Двины. В этих условиях по численности доминирует сосна (*Pinus sylvestris* L.) со смешанным типом сексуализации (около 85 %). Доля деревьев с женским половым типом составляет порядка 15 %, мужские деревья встречаются единично (менее 0,5 %). Тип сексуализации деревьев определяли по методике, предложенной С.А. Мамаевым. Для дендрохронологического анализа радиального прироста разных половых типов сосны использовали средние значения радиального прироста. Показано, что деревья с различной сексуализацией в 140–150-летнем возрасте существенно не различаются в годичном приросте по диаметру ствола (0,32 мм – для женского полового типа, 0,37 мм – для смешанного полового типа) и индексу прироста (102 % для обоих половых типов). Установлено, что во временных рядах проявляется преимущество по абсолютной величине радиального прироста у сосны смешанной сексуализации, особенно в 30–40-летнем возрасте. Уровни изменчивости годичного прироста высокие и очень высокие как в пределах кольцевой хронологии индивидуального дерева, так и между деревьями. По чувствительности к воздействию внешних факторов половые типы не отличаются (11...13 %). Для деревьев женского типа в течение жизни более характерен равномерный рост, для смешанного – интенсивный рост в «зрелом» возрасте. Цикличность колебаний ширины годичных колец у сосны разных типов сексуализации близка к 11-летнему солнечному циклу.

*Ключевые слова:* сосна обыкновенная, половые типы, радиальный прирост, изменчивость, постоянное избыточное увлажнение почв.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта государственного задания № 0410-2014-0025.

*Для цитирования:* Пинаевская Е.А., Тарханов С.Н. Изменчивость радиального прироста у половых типов сосны обыкновенной в условиях постоянного избыточного увлажнения почв // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 85–94. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.85

*Введение*

Деревья разного пола у двудомных видов различаются морфологически и другими признаками [9]. Слабее изучены голосеменные, которые имеют более узкий диапазон изменений в половой системе, 48 % голосеменных считаются однодомными, 52 % – двудомными [11]. У однодомных видов, к которым относится сосна обыкновенная [10], половые различия выражены не так определенно. Исследование полового диморфизма ряда однодомных видов, в том числе сосны, не дало определенных результатов. По мнению С.А. Мамаева [3], у сосны обыкновенной проявляется внутрипопуляционная индивидуальная генетическая изменчивость по типу сексуализации. Способность к образованию генеративных органов того или иного пола, по-видимому, также может варьировать, как и все другие признаки. В лесной зоне преобладают индивидуумы, продуцирующие и мужские, и женские шишки. При этом полностью однополых «женских» или «мужских» индивидуумов встречается очень немного [3]. Различия в географической среде существенно не влияют на изменение полового типа сосны. Многие авторы полагают, что пол у сосны в основном определяется условиями внешней среды и коррелятивными соотношениями ростовых процессов. Л.Ф. Правдиным была выдвинута гипотеза об эволюционном разделении полов, происходящем у *Pinus sylvestris* на современном этапе ее филогенеза [3]. В древостоях 110–150-летнего возраста различных типов леса, в основном в борах брусничных, в пределах лесной зоны, независимо от географического района, выявлено явное господство по численности сосны со смешанным половым типом, причем в северной тайге ее доля составляет порядка 85 %. Согласно приведенной методике [3], в северной тайге доля чисто женских или мужских индивидуумов не превышает 4...10 %, в южной тайге численность мужских особей фактически «нулевая». Согласно данным [5], в степных борах (бруснично-травяных) минусинской и балгазынской популяций, на юге Средней Сибири, доля мужских деревьев составляет порядка 5...7 %, женских – 18 %. Безусловно, доминируют по численности однодомные половые типы (75...80 %). Исследования сексуальной структуры в сосняках кустарничково-зеленомошных II класса возраста, проведенные на Кольском полуострове [6], также показывают, что доля особей чисто мужского типа не превышает 1 %.

Дифференциация деревьев по типу сексуализации представляет собой внутривидовые половые формы, хотя с возрастом, в связи со структурными преобразованиями в кроне дерева, может наблюдаться смена направления его сексуализации. Сведения по морфологическим характеристикам сосны с разным типом сексуализации противоречивы. Отмечены зависимости от пола деревьев индексов прироста [5]. Есть сведения [5], что с ухудшением условий среды связи изменчивости и чувствительности радиального прироста с полом усиливаются.

Целью работы является изучение изменчивости радиального прироста у деревьев сосны разных половых типов в условиях избыточного увлажнения почв северной тайги.



*Объекты и методика исследования*

Исследования проводили в низкопродуктивных (Va класс бонитета), низкополнотных (0,4–0,5) и чистых по составу древостоях (10 С) в разновозрастных сосняках кустарничково-сфагновых, произрастающих на болотных верховых почвах в низовьях Северной Двины (северная тайга). За основу выделения деревьев с разным половым типом взяли методику С.А. Мамаева [3]. При этом деревья были объединены в три группы: 1 – смешанного, 2 – женского, 3 – мужского типов сексуализации. К первой группе отнесены деревья с наличием в кроне мужских и женских стробилов, ко второй – только с наличием женских шишек, к третьей – только мужских стробилов. Во избежание ошибок выявление полового типа проводили в течение 3 лет, также определяли следы стробилов на побегах за прошлые годы. Как известно [3], у сосны следы генеративных органов долго сохраняются на ветвях и по ним легко установить пол дерева. Необходимо помнить, что деревья сосны не являются абсолютно однополыми и могут иметь в кроне мужские и женские стробилы, которые по тем или иным причинам не были сформированы за определенный временной период в процессе онтогенеза. Существует также вероятность ошибок при их визуальном подсчете. Согласно данной методике, в сосняках кустарничково-сфагновых северной тайги установлено доминирование по численности сосны со смешанным типом сексуализации (около 85 %). Доля деревьев с женским половым типом составляет порядка 15 %, мужские деревья встречаются единично (менее 0,5 %). Таким образом, частота встречаемости деревьев разных половых типов в условиях постоянного избыточного увлажнения в основном соответствует их численности в сосняках на дренированных почвах.

На постоянных пробных площадях (ПП) со сходными таксационными характеристиками (с маркировкой деревьев) определяли высоту и диаметр ствола деревьев на высоте 1,3 м, проводили отбор кернов древесины (табл. 1). Объем выборки составил 32 дерева смешанного и женского половых типов 140–150-летнего возраста. У деревьев сосны мужского полового типа керны древесины не отбирали, поскольку они встречались единично.

Таблица 1

**Краткая таксационная характеристика сосновых древостоев**

№ ПП	Возраст, лет	Полнота	Высота, м	Диаметр ствола, см, на высоте 1,3 м
34	60...170	0,5	4...8	7...13
34А	60...180	0,4	3...7	4...16
45	60...180	0,5	4...8	6...15
46	60...180	0,4	3...7	8...18
46А	70...170	0,4	3...6	10...17

Исходными данными для дендрохронологического анализа радиального прироста разных половых типов сосны служили средние значения прироста, рассчитанные по измерениям ширины годичных слоев в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Измерения ширины годичных слоев проводили методом световой микроскопии с точностью  $\pm 0,05$  мм [8]. Далее строили графики динамики годичного прироста отдельных деревьев анализируемых половых типов, определяли средние показатели их радиального прироста с использованием стандартных статистических методов [7]. Синхронизацию рядов осуществляли посредством автокорреляции, перекрестную датировку – с использованием указательных дат. Для выявления цикличности радиального прироста разных форм сосны использовали календарные даты наступления экстремальных приростов и значения норм годичного прироста, рассчитанные по 5-летним скользящим кривым. Методом 5-летнего скользящего сглаживания определяли относительные индексы прироста (в процентах) [1]:

$$I = \frac{i_{\text{ф}}}{i_{\text{сгл}}} 100 \%, \quad (1)$$

где  $i_{\text{ф}}$  – фактическая ширина годичного кольца;

$i_{\text{сгл}}$  – сглаженная ширина годичного кольца (или норма прироста данного года, вычисленная любым конкретным способом).

Данный способ расчетов обеспечивает удаление возрастного тренда.

Рассчитывали показатель чувствительности дерева (в процентах) к условиям внешней среды [1]:

$$K_s = \frac{\sum |\Delta i|}{\sum i} 100 \%, \quad (2)$$

где  $\sum |\Delta i|$  – абсолютная разность ширины соседних годичных колец деревьев независимо от знака;

$\sum i$  – сумма годичных колец деревьев за весь исследуемый период.

Уровни изменчивости определяли по шкале С.А. Мамаева [3].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В насаждениях сосны на болотных верховых почвах в исследуемом районе для деревьев женского и смешанного типов сексуализации установлены сходные статистические характеристики вариационных рядов, абсолютной величины и индекса прироста (табл. 2). Коэффициенты вариации абсолютной величины годичного прироста (в пределах дерева) у сосны с женским и смешанным типом сексуализации существенно не различаются и соответствуют очень высокому уровню изменчивости этого показателя.

Индивидуальная изменчивость радиального прироста (между деревьями) также соответствует высокому и очень высокому уровню ( $CV = 38\%$  – для женского типа,  $CV = 44\%$  – для смешанного типа). Следовательно, уровни изменчивости радиального прироста в пределах одного дерева и между деревьями разных половых типов близки. Эти результаты не противоречат

Таблица 2

**Изменчивость радиального годовичного прироста и параметров ствола  
у разных половых типов сосны**

Половой тип	Абсолютная величина годовичного прироста, мм			Индекс годовичного прироста, %			Средняя высота, м	Средний диаметр ствола, см
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	min–max	CV, %	<i>I</i>	min–max	CV, %		
Женский	0,32±0,02	0,10–0,72	49	102	83–167	11	4,9±0,2	9,4±0,4
Смешанный	0,37±0,03	0,13–0,84	46	102	81–167	11	5,0±0,2	10,8±0,5

Примечание.  $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$  – среднее значение с ошибкой; min–max – минимальное и максимальное значения; CV – коэффициент вариации.

полученным ранее выводам о сходстве уровней эндогенной и индивидуальной изменчивости других морфоструктурных признаков сосны. В пределах одного дерева они подвержены колебаниям, обусловленным как действием хронологических факторов, так и микроусловиями внешней среды. Эти колебания связаны с нормореакцией генотипа на изменение внешних условий [4]. Вариабельность индекса годовичного прироста в пределах одного дерева соответствует низкому уровню (табл. 2), но между деревьями – очень высокому уровню (CV = 43 % – для женского, CV = 51 % – для смешанного типов).

Сосна женского полового типа в 140–150-летнем возрасте уступает на 16 % по радиальному годовичному приросту деревьям смешанного типа, однако статистически достоверных различий средних значений при критических значениях t-критерия между выборками деревьев разной сексуализации не установлено ( $t < t_{0,05}$ ). В отдельные временные периоды наблюдается существенное доминирование ( $t > t_{0,05}$ ) радиального прироста у сосны со смешанным половым типом (рис. 1).

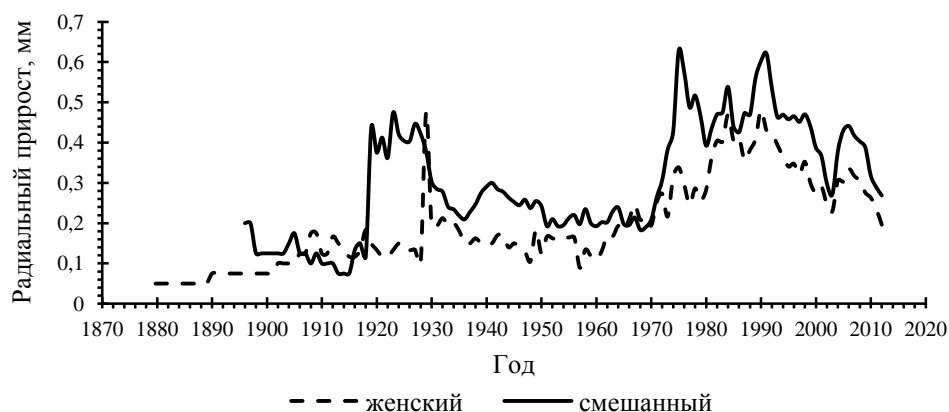


Рис. 1. Динамика средних значений радиального прироста у сосны разных половых типов

Особенно значительное преимущество деревьев смешанного типа по радиальному приросту наблюдается в 30–40-летнем возрасте. По-видимому, это может быть связано с их наследственными особенностями. По диаметру ствола сосна смешанного полового типа превосходит сосну женского типа на 15 %, что является для данной выборки деревьев достоверным (t-критерий,  $p < 0,05$ ). Существенных различий этих форм по высоте ствола не наблюдается (табл. 2). Хронологические изменения индекса радиального прироста в выборках деревьев женского и смешанного сексуальных типов происходят до-вольно синхронно (рис. 2).

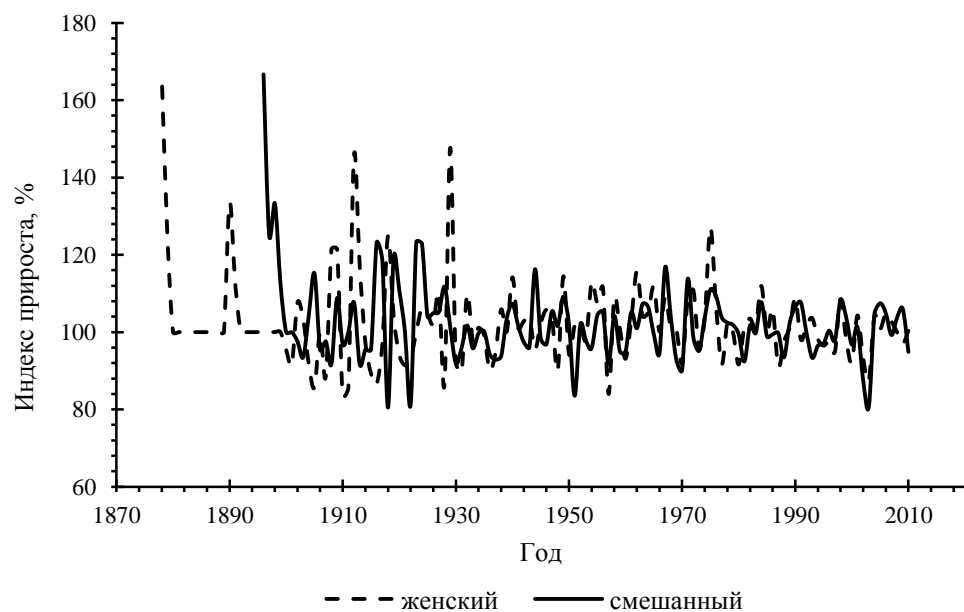


Рис. 2. Динамика средних значений индексов прироста у сосны разных половых типов

При элиминации возрастного фактора на динамику радиального годовичного прироста (индекс прироста) оказывают влияние условия внешней среды. Одновременно с осциллирующими колебаниями радиального прироста, вызванными влиянием погодных условий, здесь имеют место длинноволновые трендовые колебания, связанные с изменением экологических условий [2]. В возрасте до 20 лет радиальный прирост у деревьев обоих типов незначителен (см. рис. 1), что, по-видимому, связано с их приспособлением к существующим экологическим условиям. В 20–50-летнем возрасте наблюдается резкое повышение абсолютной величины годовичного прироста. В этот период, вероятно, наиболее полно проявляются наследственные особенности деревьев сосны, реализованные и фиксированные во временных рядах. Следующие 40 лет камбиальная активность деревьев стабилизируется, хотя радиальный прирост деревьев обоих типов ниже по сравнению с предыдущим периодом.

В возрасте спелости (100...120 лет) наблюдается кульминация радиального прироста, по мере старения происходит его неуклонное снижение независимо от полового типа деревьев.

Довольно низкие значения показателя чувствительности (11...13 %) к воздействию факторов внешней среды у деревьев женского и смешанного половых типов свидетельствует об их устойчивости (независимо от половой принадлежности) к изменению экологических факторов в условиях постоянного избыточного увлажнения почв.

В динамике радиального прироста деревьев сосны выявлено три типа возрастных кривых: «большого роста», равномерная кривая и кривая увеличения в более старшем возрасте. Для 41 % деревьев с женским половым типом выявлена равномерная кривая, для 34 % – кривая увеличения прироста в старшем возрасте, для 25 % – кривая большого роста. Для 47 % деревьев со смешанным типом свойственна кривая увеличения прироста в старшем возрасте, для 32 % – равномерная кривая, для 21 % – кривая большого роста. Можно полагать, что сосна с разной сексуализацией имеет отличия в типе роста. Для деревьев женского полового типа в период онтогенеза характерен более равномерный рост, для смешанного типа свойственно значительное повышение прироста по диаметру в зрелом возрасте.

Для сосны разных половых типов были определены диапазоны пространственно-временной изменчивости ширины годичных колец. Средние значения циклов для сосны смешанного полового типа между максимальными пиками составляют 11,4, между минимальными – 8,9 года. Средние значения для сосны женского типа между максимальными пиками – 9,1, между минимальными – 12,1 года (рис. 3). Цикличность колебаний ширины годичных колец у сосны разных типов сексуализации близка к 11-летнему солнечному циклу.

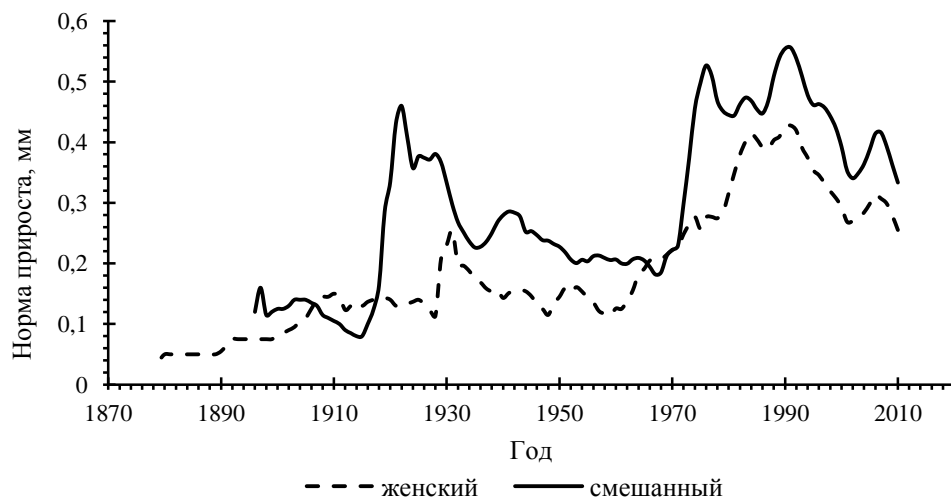


Рис. 3. Цикличность в динамике радиального прироста у сосны разных половых типов

## Заключение

В условиях постоянного избыточного увлажнения почв в 140–150-летнем возрасте сосна женского полового типа уступает по диаметру ствола деревьям со смешанным типом сексуализации в среднем на 15 %. Наблюдается существенное преимущество сосны смешанного типа по сравнению с женским по радиальному приросту в отдельные временные периоды, особенно в 30–40-летнем возрасте. Однако статистически значимых различий между средними значениями радиального годового прироста в выборках деревьев этих половых типов не установлено. При этом преимущество сосны смешанного типа сексуализации по данному показателю составляет 16 %. Можно полагать, что характер роста деревьев разных половых типов обусловлен их наследственными особенностями. Уровни изменчивости радиального прироста у сосны с различной сексуализацией в пределах одного дерева и между деревьями (индивидуальная изменчивость) высокие ( $CV > 30\%$ ) и очень высокие ( $CV > 40\%$ ). Разные половые типы сосны характеризуются высокой амплитудой колебаний и сходным распределением индексов прироста. Сосны женского и смешанного типов сексуализации существенно не различаются по чувствительности к воздействию факторов внешней среды. В динамике радиального прироста у сосны с различной сексуализацией выявлено три типа возрастных кривых. Для деревьев женского типа в течение жизни характерен более равномерный рост, смешанному типу свойственно увеличение радиального прироста в зрелом возрасте. Цикличность колебаний радиального прироста у сосны обоих типов сексуализации близка к 11-летнему циклу. Судя по диаметру ствола, сосна со смешанным половым типом более продуктивна и может иметь большие показатели по объему ствола и запасу древесины на болотных верховых почвах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битвинкас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с.
2. Ваганов Е.А., Терсков И.А. Анализ роста дерева по структуре годичных колец. Новосибирск: Наука, 1977. 93 с.
3. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере сем. *Pinaceae*) на Урале. М.: Наука, 1973. 283 с.
4. Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. Морфоструктура и изменчивость биохимических признаков популяции сосны (*Pinus sylvestris* L.) в стрессовых условиях устья Северной Двины // Сиб. эколог. журн. 2014. № 2. С. 319–327.
5. Тихонова И.В. Изменчивость годичных колец у разных половых типов деревьев сосны обыкновенной на юге Средней Сибири // Лесоведение. 2007. № 3. С. 40–45.
6. Цветков В.Ф., Цветков И.В. Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск: АГТУ, 2003. 354 с.
7. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 137 с.

8. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии: учеб.-метод. пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. Ч. 1. 80 с.

9. Charlesworth D. Plant Sex Determination and Sex Chromosomes // *Heredity*. 2002. No. 88. Pp. 94–101.

10. Correns C. Bestimmung, Vererbung und Verteilung des Geschlechtes bei den hoeheren Pflanzen. Berlin. 1928. 138 p.

11. Givnish T.J. Ecological Constraints on the Evolution of Breeding Systems in Seed Plants: Dioecy and Dispersal in Gymnosperms // *Evolution*. 1980. No. 34. Pp. 959–972.

Поступила 06.10.16

UDC 582.475.4:631.524.82:631.524.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.85

### **The Variability of Radial Increment of Sexual Types of Scotch Pine Under Hydrogenic Conditions**

*E.A. Pinaevskaya, Postgraduate Student, Research Assistant*

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

Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences,

Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;

e-mail: aviatorov8@mail.ru, tarkse@yandex.ru

*Pinus sylvestris* L. manifests the intrapopulation individual genetic variation by the sexual type. The goal of research is the evaluation of variability in radial increment of pine trees of different sexual types under hydrogenic conditions in the northern taiga of the European part of Russia. The research is carried out in the shrub-sphagnum pine forests on wetland upland soils in the lower reaches of the Northern Dvina. In these conditions pine (*Pinus sylvestris* L.) of mixed sexual type (about 85 %) is dominated. The proportion of trees with female sexual type is about 15 %, and male trees occur singly (less than 0.5 %). The sexual type of trees is determined by the method proposed by S.A. Mamaev. The mean values of radial increment are used for the tree-ring analysis of radial growth of different sexual types of *Pinus sylvestris* L. Trees of different sexual types in 140–150 years of age demonstrate similar parameters in the annual stem diameter growth (0.32 mm – for the female sexual type and 0.37 mm – for the mixed sexual type) and the index of increment (102 % for both sexual types). In the time series the advantage of the absolute value of the pine radial increment of mixed sexual type is shown, especially in 30–40 years of age. Variability levels of annual growth are high and very high within the individual tree ring chronology and between trees. Sexual types do not differ in sensitivity to external factors (11...13 %). The trees of female type are characterized by the uniform growth and the trees of mixed type – by the intensive growth in the “mature” age. Cyclical fluctuations of the width of pine annual rings of different sexual types are close to the 11-year solar cycle.

**Keywords:** Scotch pine, sexual type, radial increment, variability, constant overwetting of soils.

---

*For citation:* Pinaevskaya E.A., Tarkhanov S.N. The Variability of Radial Increment of Sexual Types of Scotch Pine Under Hydrogenic Conditions. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 85–94. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.85

REFERENCES

1. Bitvinskas T.T. *Dendroklimaticheskie issledovaniya* [Dendroclimatic Research]. Leningrad, 1974. 172 p.
2. Vaganov E.A., Terskov I.A. *Analiz rosta dereva po strukture godichnykh kolets* [Analysis of Tree Growth on the Structure of Annual Rings]. Novosibirsk, 1977. 93 p.
3. Mamaev S.A. *Formy vnutrividovoi izmenchivosti drevesnykh rastenii (na primere sem. Pinaceae) na Urale* [Forms of Intraspecific Variation of Tree Plants (for Example of the Family *Pinaceae*) in the Urals]. Moscow, 1973. 283 p.
4. Tarkhanov S.N., Biryukov S.Yu. Morfostruktura i izmenchivost biokhimicheskikh priznakov populyatsii sosny (*Pinus sylvestris* L.) v stressovykh usloviyakh ust'ya Severnoi Dviny [The Morphological Structure and Variability of the Biochemical Features of the Pine Population (*Pinus sylvestris* L.) Under Stress Conditions in the Mouth of the Northern Dvina]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2014, no. 2, pp. 319–327.
5. Tikhonova I.V. Izmenchivost godichnykh kolets u raznykh polovykh tipov derevev sosny obyknovЕННОI na yuge Srednei Sibiri [Variability of Tree Rings in Different Sexual Types of Scots Pine Trees in the South of Central Siberia]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 3, pp. 40–45.
6. Tsvetkov V.F., Tsvetkov I.V. *Les v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya* [Forest in Terms of Environmental Contamination]. Arkhangelsk, 2003. 354 p.
7. Shiyatov S.G. *Dendrokronologiya verkhney granitsy lesa na Urale* [The Dendrochronology of the Upper Forest Border in the Urals]. Moscow, 1986. 137 p.
8. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdeyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. *Metody dendrokronologii: uchebno-metodicheskoe posobie* [Dendrochronology Methods]. Krasnoyarsk, 2000, part 1. 80 p.
9. Charlesworth D. Plant Sex Determination and Sex Chromosomes. *Heredity*, 2002, no. 88, pp. 94–101.
10. Correns C. *Bestimmung, Vererbung und Verteilung des Geschlechtes bei den hoeheren Pflanzen*. Berlin, 1928. 138 p.
11. Givnish T.J. Ecological Constraints on the Evolution of Breeding Systems in Seed Plants: Dioecy and Dispersal in Gymnosperms. *Evolution*, 1980, no. 34, pp. 959–972.

Received on October 06, 2016

---



УДК 630\*11

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.95

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ (*LARIX SIBIRICA*) В ОЗЕЛЕНЕНИИ Г. ВОЛОГДЫ

**С.Е. Грибов, канд. с.-х. наук, доц.**

**А.А. Карбасников, асп.**

**Е.Б. Карбасникова, канд. с.-х. наук, доц.**

**С.А. Корчагов, д-р с.-х. наук, проф.**

Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Панкратова, д. 9-а, корп. 7, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555;  
e-mail: griboff.s.e.@mail.ru, Alexkarbon@yandex.ru, helen15@yandex.ru, kors45@yandex.ru

Северные города, как правило, имеют скудный породный состав дендрофлоры. Для расширения ассортимента урбанофлоры необходимо введение перспективных видов. Одной из пород, возможной для внедрения в городские посадки, является лиственница сибирская. В условиях г. Вологды весь цикл сезонного развития она успевает пройти за теплый период времени и завершить его к началу зимы. Период начала роста наблюдается в первой половине мая, когда происходит пробуждение почек. Начало роста побегов тесно связано с температурой воздуха и почвы. Период, характеризующийся максимальным ростом, приходится на середину июня, когда среднесуточная температура воздуха резко повышается и выпадает достаточное количество осадков. При накоплении суммы положительных температур 1265,3 °С рост растения заканчивается. В изучаемых условиях побеги лиственницы сибирской не обмерзают. К началу зимних холодов растение успевает к ним подготовиться (рост побегов прекращается, они одревесневают, плоды созревают, хвоя желтеет и опадает). Все взрослые особи лиственницы, достигшие репродуктивной стадии онтогенеза, в условиях г. Вологды образуют шишки с семенами. Плодоношение обильное как в глубине парков и скверов, так и вдоль дорог. Семена лиственницы имеют очень низкую всхожесть и признаются нестандартными. Возможность семенного размножения тоже очень низкая и требует дополнительных мер для увеличения всхожести семян (флотация, снегование, обработка стимуляторами роста). Такая способность к размножению уменьшает балл перспективности вида. Сохранение жизненной формы дерева, вызревание побегов и побегообразовательная способность, высокая зимостойкость характерны для лиственницы сибирской в условиях г. Вологды. С учетом всех факторов лиственница сибирская признана в качестве перспективной породы для использования в озеленении г. Вологды.

**Ключевые слова:** лиственница сибирская, озеленение, адаптация, репродуктивные свойства, фенология.

---

**Для цитирования:** Грибов С.Е., Карбасников А.А., Карбасникова Е.Б., Корчагов С.А. Оценка перспективности использования лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) в озеленении г. Вологды // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 95–106. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.95

*Введение*

Городские насаждения являются неотъемлемой частью градостроительной структуры. Северные города, как правило, имеют скудный породный состав дендрофлоры, что связано с рядом факторов, среди которых сложные климатические условия, ограниченный ассортимент аборигенных видов, экологические факторы урбанизированной среды.

Для расширения ассортимента урбанофлоры необходимо введение в состав парков, скверов и садов перспективных видов. Включение новых пород в городские посадки улучшает экологическую ситуацию и комфортность среды, формирует особенные микроклиматические условия. На микроклимат города, кроме погодных условий, большое влияние оказывают автотранспорт, промышленные предприятия, особенности городской застройки. Тем самым формируется специфическая среда, характеризующаяся повышенным температурным режимом, пониженной влажностью воздуха и его загрязненностью, сниженным уровнем испарения, высокой степенью уплотненности почвы.

Один из видов, возможных для внедрения в городские посадки – лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). Она обладает большой пластичностью, отражает стрессовые воздействия городской среды и является эффективным видом-индикатором, который по динамике роста и степени фитонасыщенности крон выступает одним из основных маркеров уровня экологической комфортности городских территорий [1, 4, 27]. Исследования М.А. Карасева (2003) показали, что при использовании лиственницы в озеленении городов необходимо учитывать, что в насаждениях, подвергающихся сильной антропогенной нагрузке, в первую очередь вытесняемым, эта порода может произрастать без снижения темпов роста, т. е. целесообразно более широкое введение ее в состав городских насаждений [12].

Систематика рода лиственниц очень сложна, и до сих пор нет единого мнения по поводу статуса многих ее видов. При выполнении исследований, мы придерживались мнения ряда авторов [8, 14, 19, 25, 28 и др.] о том, что лиственница сибирская и лиственница Сукачева являются отдельными таксонами.

Наши исследования посвящены лиственнице сибирской как отдельному виду. При их выполнении перед нами стояла цель изучить специфику роста и развития лиственницы сибирской в условиях г. Вологды и дать оценку перспективности ее использования в городских насаждениях.

*Объекты и методы исследования*

При выполнении работ использовались основные положения методических разработок И.Н. Бейдемана (1954), И.Н. Елагиной (1970), Ф. Шнелле (1961), А.А. Молчанова и В.В. Смирнова (1967), В.П. Тимофеева (1973), Н.Е. Булыгина (1979), И.Н. Елагиной, А.И. Лобанова (1979), А.И. Писаренко, М.Д. Мерзленко (1990), П.М. Малаховца, В.А. Тисовой (1999), Н.А. Бабича, О.С. Залывской, Г.И. Травниковой [3, 5, 6, 9, 10, 14, 16–18, 22, 23].

Город Вологда – это крупный северный город и областной центр. В настоящее время в насаждениях общего пользования произрастает 59 видов деревьев и кустарников. Вологда и ее окрестности, по классификации климата Б.П. Алисова, относятся к атлантико-континентальной климатической области умеренного пояса. Характеризуется умеренно-континентальным климатом с продолжительной холодной многоснежной зимой, короткой весной, относительно коротким умеренно теплым увлажненным летом, продолжительной и сырой осенью. В связи с этим особое внимание необходимо обратить на введение в городские посадки видов из регионов с подобным климатом, в частности на ассортимент растений сибирской флоры.

Попадая в условия города, древесные растения оказываются в очень непростой обстановке. Повышенный температурный и инсоляционный режим, неблагоприятные почвенные условия осложняются еще и высокой концентрацией токсичных веществ. Анализ состояния воздушной среды города показывает, что уровень загрязнения атмосферного воздуха ежегодно растет. Значительный вклад в это вносит автотранспорт. Кроме того, в настоящее время в городе функционируют 108 стационарных источников загрязняющих веществ, основными из которых являются ТЭЦ, котельные предприятий металлообрабатывающей промышленности и строительной индустрии [24].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Проведенные исследования показали, что в условиях г. Вологды лиственница сибирская сохраняет свою жизненную форму. Средние показатели для насаждений общего пользования: диаметр – 24 см, высота – 20 м, возраст – 57 лет. Встречаются растения в возрасте более 150 лет с диаметром 28 см и более.

Важным показателем успешной адаптации растений в условиях города является прохождение фенологических фаз, т. е. полного цикла сезонного развития. Нарушение естественных ритмов приводит к стрессу и ускорению процессов старения древесного растения. Нами наблюдались важнейшие фенофазы: распускание почек, начало цветения, конец цветения, созревание плодов, семян, расцветивание отмирающих листьев, опадение листьев. Даты прохождения лиственницей сибирской фенологических фаз приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### **Важнейшие фазы развития лиственницы сибирской**

Фенологическая фаза	Даты прохождения
Распускание почек П <sub>б</sub> <sup>2</sup>	16.04 – 24.04
Начало цветения Ц <sup>2</sup>	20.04 – 26.04
Конец цветения Ц <sup>3</sup>	17.05 – 21.05
Созревание плодов, семян П <sub>л</sub> <sup>3</sup>	23.09 – 8.10
Расцветивание отмирающих листьев Л <sup>3</sup>	19.09 – 7.10
Опадение листьев Л <sup>4</sup>	15.10 – 22.10

Установлено, что в условиях г. Вологды лиственница сибирская проходит все важнейшие фенологические фазы. Весеннее развитие начинается с установлением активных температур выше +9 °С. Этот период приходится на конец апреля. Аборигенные породы начинают вегетировать чуть раньше (2–15 апреля). Затем наступает довольно продолжительное цветение (примерно 3 нед.), увеличение этого периода – один из способов адаптации вида к новым условиям. Созревание плодов приходится на конец сентября–начало октября, что свойственно данной породе и характерно для нее. Расцветивание листьев и их опадение занимает длительный промежуток времени (примерно 1 мес.) и завершается до выпадения стойкого снежного покрова. Надо отметить, что изучаемый нами вид в условиях города хорошо адаптировался: за теплый период времени лиственница сибирская успевает пройти все фенологические фазы, завершить свой сезонный цикл развития и подготовиться к зиме.

Для Вологды характерна частая смена воздушных масс, связанная с прохождением циклонов и антициклонов. Нередко поздно весной или рано осенью бывают заморозки. Поздневесенние заморозки наблюдаются до третьей декады мая, первые осенние – в конце второй декады сентября. Такие погодные явления очень часто отрицательно отражаются на росте растений, могут погубить молодые и еще не одревесневшие побеги. Кроме того, зима на этой территории продолжительная (в среднем 156 дн.), температуры могут опускаться ниже 30 °С. Не редки и зимние оттепели, когда воздух прогревается до 0 °С и выше. В связи с тем, что климатические условия неоднородны, для озеленения города важно использовать древесные виды, обладающие высокой морозоустойчивостью и зимостойкостью.

Оценку зимостойкости и морозоустойчивости лиственницы сибирской проводили на побегах после окончания поздневесенних заморозков. В изучаемых условиях побеги лиственницы сибирской не обмерзают (табл. 2). Это свидетельствует о том, что наступление климатической зимы совпадает с периодом покоя вида. Растение успевает подготовиться к началу наступления холодов (рост побегов прекращается, они одревесневают, плоды созревают, хвоя желтеет и опадает).

Зимние оттепели не наносят корневой системе и стволу большого вреда. Все это характеризует лиственницу сибирскую как морозоустойчивый и зимостойкий вид. Высокая зимостойкость и морозоустойчивость породы позволяет рекомендовать ее для более активного использования в озеленительных городских посадках.

Таблица 2

**Оценка зимостойкости и морозоустойчивости лиственницы сибирской  
в условиях г. Вологды**

Показатель	Значение показателя
Характеристика обмерзания (индекс обмерзания)	Не обмерзает (0)
Зимостойкость, балл	Очень высокая (1)
Морозоустойчивость	Очень высокая

Прирост побегов зависит от географического происхождения, возраста, благоприятного сочетания погодных условий вегетационного периода, прежде всего от количества осадков, температуры воздуха и почвы, а также от приемов агротехники. С переносом в культуру происходят изменения не только во внешнем облике, но и в сезонном развитии, например изменяются сроки начала и окончания вегетации и весь цикл перехода от активного состояния к покою и обратно [20].

Растения, произрастающие в городской черте, испытывают стресс, который выражается в изменении биохимического состава, физиологических особенностей и, как следствие, морфологических признаков. Условия техногенной среды, безусловно, влияют на систему побегообразования древесных растений [7, 26].

По данным Л.И. Сергеева, К.А. Сергеевой, В.К. Мельникова (1961) [21], морфофизиологическая периодичность годового цикла растений тесно связано с их зимостойкостью. В условиях климата северных регионов большое значение имеют начало и продолжительность периода роста побегов и формирования ассимиляционного аппарата. По данным автора, чем раньше заканчивается рост побегов и формирование листовой поверхности, тем лучше растения подготовятся к зиме.

При изучении роста в высоту у древесных растений нами выделено три периода: начало роста; максимальный рост; окончание роста.

Период начала роста наблюдается в первой половине мая (табл. 3) и тесно связан с температурой воздуха и почвы. В этот период происходит пробуждение почек. В фазу вегетации лиственница сибирская вступает при установлении среднесуточной температуры +9 °С, сумма положительных температур к этому времени составляет 166,7 °С. При значительном повышении температуры отмечается и более интенсивный прирост побегов.

Период, характеризующийся максимальным ростом, приходится на середину июня, когда среднесуточная температура воздуха резко возрастает и выпадает достаточно осадков. В это время интенсивно идут ростовые процессы, прирост резко увеличивается. На период максимального роста приходится 93 % от общего прироста за сезон. Рост древесных растений в этот период зависит от суммы положительных температур. Для лиственницы сибирской период максимального роста начинается при достижении суммы положительных температур 472,8 °С.

Таблица 3

**Рост годовых побегов лиственницы сибирской**

Период роста	Средняя дата наступления периода	Продолжительность периода, дн.	Прирост в высоту	
			мм	%
Начало роста	15.05	18	20	5
Максимальный рост	12.06	42	387	93
Окончание роста	10.08	27	7	2

На период окончания роста приходится 2 % от всего прироста за сезон. При накоплении суммы положительных температур 1265,3 °С рост растения заканчивается. Растение начинает готовиться к грядущим неблагоприятным факторам и переходит в состояние покоя.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что начало роста побегов в высоту приходится на середину мая (в среднем 15.05), окончание – на первую декаду августа (в среднем 10.08). Этот период характеризуется активным повышением температур и выпадением осадков. Всего длительность роста побегов составляет 84...90 дн. Снижение среднесуточной температуры воздуха приводит к уменьшению скорости роста побегов, а потом и к остановке роста. После чего наступает период подготовки растения к зиме. Очень важно, чтобы интродуценты все процессы роста в новых условиях среды успевали завершить до начала неблагоприятного периода. Средний прирост побега за 1 сут – около 4,7 мм. Это высокий показатель, он характеризует растение как быстрорастущее.

Важным этапом изучения адаптации древесных растений в условиях города является исследование их репродуктивной способности. Известно, что основной показатель устойчивости вида – способность давать семенное потомство [7].

Все взрослые особи лиственницы сибирской, достигшие репродуктивной стадии онтогенеза, в условиях Вологды образуют шишки с семенами. Плодоношение обильное как в глубине парков и скверов, так и вдоль дорог. Балл плодоношения в зеленых насаждениях в среднем составляет 4-5.

Одним из обязательных показателей качества семян является масса 1000 шт. семян в воздушно сухом состоянии (обычно в таком состоянии семена хранятся до посева). Более крупные и тяжелые семена содержат больше питательных веществ и в большинстве случаев обладают большей всхожестью, более высокой энергией прорастания, дольше сохраняют всхожесть при хранении.

Масса семян изменяется в зависимости от различных факторов: географического положения, условий местопрорастания, высоты над уровнем моря, возраста растения, времени сбора и т. д. [2]. Сравнительные данные по массе 1000 шт. семян лиственницы сибирской приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Масса (г) 1000 шт. семян лиственницы сибирской**

Автор	Min...max	Среднее значение
Наши данные (г. Вологда)	6,78...7,02	6,9±0,03
Малаховец, Тисова (г. Архангельск, 1998) [15]	10...15	11,6
Кречетова и др. (в целом по ареалу, 1978) [13]	Нет данных	7,17

Полученные данные массы 1000 шт. чуть ниже (на 4 %) средних показателей по ареалу в целом и на 40 % ниже данных по г. Архангельску. Этот показатель зависит от крупности и степени выполненности семян. Низкие значения могут свидетельствовать о том, что в период образования и созревания семян условия г. Вологды были не достаточно благоприятными.

Показатели качества семян определяют пригодность семян к посеву, дают возможность уточнять норму высева, прогнозировать выход посадочного материала с единицы площади, оценивать степень адаптации вида в условиях города.

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что семена лиственницы в условиях Вологды имеют очень низкую всхожесть, так как 91 % их представлен нежизнеспособными семенами. Кроме того, 92 % невсхожих семян – загнившие, 8 % – пустые. Семена со всхожестью менее 10 %, как в нашем случае, считаются нестандартными.

Низкая всхожесть семян лиственницы признается многими учеными ее биологической особенностью. Это объясняется тем, что пыльца лиственницы лишена воздушных мешков и разносится на сравнительно небольшие расстояния. В смешанных насаждениях переносу пыльцы мешают кроны соседних деревьев других пород, и, чем меньше доля лиственницы в составе насаждения, тем больше образуется при самоопылении пустых (без зародыша и эндосперма) семян. Как отмечают С.А. Алексеев и А.А. Молчанов (1938) [2], единично разбросанные представители лиственницы сибирской в условиях Севера дают иногда ничтожный процент полнозернистых семян. Однако, используя метод флотации, можно повысить качество партии семян и получить необходимое их количество для дальнейшего практического применения.

Перспективность использования лиственницы сибирской для озеленения в условиях Вологды оценивали по 100-бальной шкале интегральной оценки перспективности выращивания [11]. При этом устанавливали такие наиболее важные при изучении адаптации древесных растений в новых условиях показатели, как вызревание побегов, зимостойкость, сохранение габитуса, побегообразовательная способность, способность растения к генеративному размножению, возможный способ размножения (вегетативный). Перечисленные показатели позволяют сделать комплексный анализ успешности вида (табл. 5).

Таблица 5

**Оценка перспективности использования лиственницы сибирской в условиях г. Вологды**

Показатель	Значение показателя, балл
Вызревание побегов	20
Зимостойкость	25
Сохранение габитуса	10
Побегообразовательная способность	5
Способность растения к генеративному размножению	5
Возможный способ размножения	15
Сумма баллов	80
Оценка успешности	Перспективный вид

Сохранение жизненной формы дерева, вызревание побегов и побегообразовательная способность, высокая зимостойкость характерны для лиственницы сибирской в условиях г. Вологды. Этот вид характеризуется низкими показателями способности к размножению. Возможность семенного размножения очень низкая и требует дополнительных мер для увеличения всхожести семян (флотация, снегование, обработка стимуляторами роста). Такая способность к размножению уменьшает балл перспективности вида. Тем не менее, общая сумма баллов всех показателей характеризует вид как перспективный для использования в озеленении г. Вологды.

#### Выводы

1. В условиях г. Вологды лиственница сибирская проходит все важнейшие фенологические фазы. Весь цикл сезонного развития она успевает пройти за теплый период времени и завершить его к началу зимнего периода.

2. В изучаемых условиях побеги лиственницы сибирской не обмерзают. К началу зимних холодов растение успевает подготовиться (рост побегов прекращается, они одревесневают, плоды созревают, хвоя желтеет и опадает).

3. Начало роста побегов в высоту приходится на середину мая (в среднем 15.05), окончание – на первую декаду августа (в среднем 10.08). Этот период характеризуется активным повышением температуры и выпадением осадков. Длительность роста побегов составляет 84...90 дн., средний прирост побега за сутки – около 4,7 мм.

4. Все взрослые особи лиственницы сибирской, достигшие репродуктивной стадии онтогенеза, в условиях г. Вологды образуют шишки с семенами. Плодоношение обильное как в глубине парков и скверов, так и вдоль дорог. Средний балл плодоношения в зеленых насаждениях составляет 4-5.

5. Семена лиственницы сибирской в условиях г. Вологды имеют очень низкую всхожесть и признаются нестандартными.

6. Общая сумма баллов при интегральной оценке перспективности выращивания вида составляет 80 и характеризует лиственницу сибирскую как перспективную породу для использования в озеленении г. Вологды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева Е.В., Кузьмичев В.В. Специфика онтогенеза и индикаторная роль лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) в условиях городской среды // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. XXIV, № 4-5. С. 362–366.
2. Алексеев С.В., Молчанов А.А. Плодоношение сибирской лиственницы в северных условиях // Советский Север. 1988. № 8. С. 62–72.
3. Бабич Н.А., Залывская О.С., Травникова Г.И. Интродуценты в зеленом строительстве северных городов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 144 с.
4. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Долинская И.С. Интродуценты и экстраординарные виды в антропогенной среде (на примере г. Вологды): моногр. Архангельск: САФУ, 2012. 184 с.
5. Бейдеман И.Н. Методика фенологических наблюдений при геоботанических исследованиях. М.; Л.: АН СССР, 1954. 128 с.



6. Бульгин Н.Е. Дендрология. Фенологические наблюдения над древесными растениями. Л.: ЛТА, 1979. 96 с.
7. Бухарина И.Л., Поварничина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде: моногр. Ижевск: Ижев. ГСХА, 2007. 216 с.
8. Дылис Н.В. Сибирская лиственница. М.: МОИП, 1947. 137 с.
9. Елагин И.Н. Применение методов фенологии при изучении динамики роста и развития растений // Лесоведение. 1970. № 1. С. 91–92.
10. Елагин И.Н., Лобанов А.И. Атлас-определитель фенологических фаз растений. М.: Наука, 1979. 95 с.
11. Залесов С.В., Платонов Е.П., Гусев А.В. Перспективность древесных интродуцентов для озеленения в условиях средней подзоны тайги Западной Сибири // Аграр. вестн. Урала. 2011. № 4(83). С. 56–58.
12. Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмоскovie путем интродукции лиственницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2009. 19 с.
13. Кречетова Н.В., Крестова Н.В., Любич Е.С., Новосельцева А.И., Собинов А.М., Шахова Е.А. Справочник по лесосеменному делу. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 336 с.
14. Кулагин А.А., Зайцев Г.А. Лиственница Сукачева в экстремальных лесорастительных условиях Южного Урала. М.: Наука, 2008. 173 с.
15. Малаховец П.М., Тисова В.А. Интродукция древесной растительности в условиях Севера // Искусственное лесовосстановление и интродукция на Европейском Севере. Архангельск: АГТУ, 1998. С. 127–171.
16. Малаховец П.М., Тисова В.А. Фенологические наблюдения за сезонным развитием деревьев и кустарников: учеб.-метод. пособие. Архангельск: АГТУ, 1999. 47 с.
17. Молчанов А.А., Смирнов В.В. Методика определения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 27 с.
18. Писаренко А.И., Мерзленко М.Д. Создание искусственных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.
19. Путенихин В.П., Фарукишина Г.Г., Шигапов З.Х. Лиственница Сукачева на Южном Урале. М.: Наука, 2004. 280 с.
20. Романова А.Ю. Обогащение культурной дендрофлоры Якутии: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 19 с.
21. Сергеев Л.И., Сергеева К.А., Мельников В.К. Морфофизиологическая периодичность и зимостойкость древесных растений. Уфа: АН СССР, 1961. 211 с.
22. Тимофеев В.П. Лиственница в повышении продуктивности и улучшении качественного состава лесов европейской части СССР // Науч. тр. ЛитНИИЛХ. Т. XI. Каунас, 1973. С. 27–52.
23. Шнелле Ф. Фенология растений. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 259 с.
24. Экология-97. Вологодская область: аналит. докл. о состоянии природной среды на 01.01.98. Вологда, 1998. 153 с.
25. Gower S.T., Richards J.H. Lardeches: Deciduous Conifers in an Evergreen World // BioScience. 1990. Vol. 40. No. 11. Pp. 818–826.
26. Iroshnikov A.I. Selection of Siberian Larch Trees Tolerant to *Dasyneura laricis* F.Lw. // Northern Silviculture and Management. Krasnoyarsk. 1988. Pp. 41.
27. Paves H. Larches (*Larix* sp.) // Forest Tree Breeding in Estonia. Tartu. 1996. Pp. 29–31.
28. Waring R.H., Franklin J.F. Evergreen Coniferous Forests of the Pacific Northwest // Science. 1979. Vol. 204. Pp. 1380–1386.

Поступила 22.11.16

UDC 630\*11

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.95

**Prospective Assessment of Siberian Larch (*Larix sibirica*) in the Landscaping of the City of Vologda**

*S.E. Gribov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor*

*A.A. Karbasnikov, Postgraduate Student*

*E.B. Karbasnikova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor*

*S.A. Korchagov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, ul. Pankratova, 9a, bl. 7, Molochnoye, Vologda, 160555, Russian Federation;

e-mail: griboff.s.e.@mail.ru, Alexkarbon@yandex.ru, helen15@yandex.ru, kors45@yandex.ru

Northern cities, as a rule, have poor species composition of dendroflora. The introduction of promising species is necessary to expand the range of urban flora. Siberian larch is one of the species, possible for urban planting. It passes the whole cycle of seasonal development during the warm period and complete it by the beginning of winter in terms of Vologda. The period of germination is observed in the first half of May, when buds evocation. The beginning of shoot germination is closely connected with the air and soil temperature. The middle of June is characterized by the highest growth, when the average air temperature rises sharply, and sufficient amount of precipitation falls out. Plant growth ends at the accumulation of the sum of positive temperatures of 1265.3 °C. In the studied conditions the Siberian larch shoots are not frosted up. By the beginning of the winter cold the plant has time to prepare for it (shoots growth stop, and they are lignified, the fruit ripens, the needles turn yellow and fall off). All adults of larch in the reproductive stage of ontogenesis in the conditions of Vologda form cones with seeds. Fruiting is abundant in the parks, gardens and along the roads. Larch seeds have a very low germination and are considered as non-standard. The possibility of seed propagation is very low and requires additional measures to increase the seed germination (flotation, snow retention, treatment by the growth promoters). This reproductive capacity decreases the rank of the species prospectiveness. Tree life conservancy, shoots ripening and shoot-forming capacity, high winter hardiness are characteristic for Siberian larch in conditions of Vologda. Taking into account all factors, Siberian larch is considered as a promising species for landscaping of Vologda.

*Keywords:* Siberian larch, landscaping, adaptation, reproductive characteristics, phenology.

REFERENCES

1. Avdeeva E.V., Kuz'michev V.V. Spetsifika ontogeneza i indikatornaya rol' listvennitsy sibirskoy (*Larix sibirica*) v usloviyakh gorodskoy sredy [The Ontogenesis Specifics and the Indicator Role of Siberian Larch (*Larix sibirica*) in the Urban Environment]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2007, vol. XXIV, no. 4-5, pp. 362–366.

---

*For citation:* Gribov S.E., Karbasnikov A.A., Karbasnikova E.B., Korchagov S.A. Prospective Assessment of Siberian Larch (*Larix sibirica*) in the Landscaping of the City of Vologda. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 95–106. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.95

2. Alekseev S.V., Molchanov A.A. Plodonoshenie sibirskoy listvennitsy v severnykh usloviyakh [Fruiting of Siberian Larch in Northern Conditions]. *Sovetskiy Sever*, 1988, no. 8, pp. 62–72.

3. Babich N.A., Zalyvskaya O.S., Travnikova G.I. *Introdutsenty v zelenom stroitel'stve severnykh gorodov: monogr.* [Exotic Species in Green Building of the Northern Cities]. Arkhangelsk, 2008. 144 p.

4. Babich N.A., Karbasnikova E.B., Dolinskaya I.S. *Introdutsenty i ekstrazonal'nye vidy v antropogennoy srede (na primere g. Vologdy): monogr.* [Exotic Species and Extrazonal Species in the Urban Environment (in Terms of Vologda)]. Arkhangelsk, 2012. 184 p.

5. Beydeman I.N. *Metodika fenologicheskikh nablyudeniy pri geobotanicheskikh issledovaniyakh* [Methods of Phenological Observations in Geo-Botanical Studies]. Moscow; Leningrad, 1954. 128 p.

6. Bulygin N.E. *Dendrologiya. Fenologicheskie nablyudeniya nad drevesnymi rasteniyami* [Dendrology. Phenological Observations of Woody Plants]. Leningrad, 1979. 96 p.

7. Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E. *Ekologo-biologicheskie osobennosti drevesnykh rasteniy v urbanizirovannoy srede: monogr.* [Ecological and Biological Characteristics of Woody Plants in the Urban Environment]. Izhevsk, 2007. 216 p.

8. Dylis N.V. *Sibirskaya listvennitsa* [Siberian Larch]. Moscow, 1947. 137 p.

9. Elagin I.N. *Primenenie metodov fenologii pri izuchenii dinamiki rosta i razvitiya rasteniy* [Application of Phenology Methods for Studying the Dynamics of Growth and Development of Plants]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1970, no. 1, pp. 91–92.

10. Elagin I.N., Lobanov A.I. *Atlas-opredelitel' fenologicheskikh faz rasteniy* [Atlas (Key) for Identification of Phenological Phases of Plant]. Moscow, 1979. 95 p.

11. Zalesov S.V., Platonov E.P., Gusev A.V. *Perspektivnost' drevesnykh introdutsentov dlya ozeleneniya v usloviyakh sredney podzony taygi Zapadnoy Sibiri* [Perspectiveness of Woody Introducents in the Middle Subzone of the West Siberian Taiga]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2011, no. 4(83), pp. 56–58.

12. Karasev N.N. *Povyshenie produktivnosti lesov Podmoskov'ya putem introduktsii listvennitsy: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* [Increasing the Forest Productivity Near Moscow by the Introduction of Larch: Cand. Agr. Sci. Diss. Abs.]. Moscow, 2009. 19 p.

13. Krechetova N.V., Krestova N.V., Lyubich E.S., Novosel'tseva A.I., Sobinov A.M., Shakhova E.A. *Spravochnik po lesesemennomu delu* [Guide to Forestry Seed Collection and Storage]. Moscow, 1978. 336 p.

14. Kulagin A.A., Zaytsev G.A. *Listvennitsa Sukacheva v ekstremal'nykh lesorasitel'nykh usloviyakh Yuzhnogo Urala* [Sukachev Larch Under Extreme Site Conditions of the Southern Urals]. Moscow, 2008. 173 p.

15. Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Introduktsiya drevesnoy rastitel'nosti v usloviyakh Severa* [Introduction of Woody Vegetation in the North]. *Iskusstvennoe lesovostanovlenie i introduktsiya na Evropeyskom Severe* [Artificial Reforestation and Introduction in the European North]. Arkhangelsk, 1998, pp. 127–171.

16. Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Fenologicheskie nablyudeniya za sezonnym razvitiem derev'ev i kustarnikov: ucheb.-metod. posobie* [Phenological Observations of the Seasonal Development of Trees and Shrubs]. Arkhangelsk, 1999. 47 p.

17. Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Metodika opredeleniya prirosta drevesnykh rasteniy* [Determining Methods of Woody Plants Growth]. Moscow, 1967. 27 p.

18. Pisarenko A.I., Merzlenko M.D. *Sozdanie iskusstvennykh lesov* [Development of Artificial Forests]. Moscow, 1990. 270 p.

19. Putenikhin V.P., Farukshina G.G., Shigapov Z.Kh. *Listvennitsa Sukacheva na Yuzhnom Urale* [Sukachev Larch in the Southern Urals]. Moscow, 2004. 280 p.
20. Romanova A.Yu. *Obogashchenie kul'turnoy dendroflory Yakutii*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Enriching of Cultural Dendroflora of Yakutia: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Moscow, 2001. 19 p.
21. Sergeev L.I., Sergeeva K.A., Mel'nikov V.K. *Morfofiziologicheskaya periodichnost' i zimostoykost' drevesnykh rasteniy* [Morphophysiological Periodicity and Winter Hardiness of Woody Plants]. Ufa, 1961. 211 p.
22. Timofeev V.P. *Listvennitsa v povyshenii produktivnosti i uluchshenii kachestvennogo sostava lesov evropeyskoy chasti SSSR* [Larch in Productivization and Improving the Qualitative Composition of Forests in the European Part of the USSR]. *Nauchnye Trudy Litovskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Sci. Proc. Lithuanian Research Institute of Forestry]. Kaunas, 1973. Vol. XI, pp. 27–52.
23. Shnelle F. *Fenologiya rasteniy* [Phenology of Plants]. Leningrad, 1961. 259 p.
24. *Ekologiya-97. Vologodskaya oblast'. Analit. dokl. o sostoyanii prirodnoy sredy na 01.01.98 g.* [Environment-97. Vologda Region. Analytical Report on the State of the Natural Environment on 01.01.98]. Vologda, 1998. 153 p.
25. Gower S.T., Richards J.H. Larches: Deciduous Conifers in an Evergreen World. *BioScience*, 1990, vol. 40, no. 11, pp. 818–826.
26. Iroshnikov A.I. Selection of Siberian Larch Trees Tolerant to *Dasyneura laricis* F.-Lw. *Northern Silviculture and Management*. Krasnoyarsk, 1988. P. 41.
27. Paves H. Larches (*Larix* sp.). *Forest Tree Breeding in Estonia*. Tartu, 1996, pp. 29–31.
28. Waring R.H., Franklin J.F. Evergreen Coniferous Forests of the Pacific Northwest. *Science*, 1979, vol. 204, pp. 1380–1386.

Received on November 22, 2016



УДК 630\*32:658

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.107

## МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСОСЕЧНЫМИ РАБОТАМИ

*А.Н. Заикин, д-р техн. наук, доц.*

*Е.Г. Рыжикова, канд. техн. наук, ст. преп.*

*И.И. Теремкова, преп.*

Брянский государственный инженерно-технологический университет, пр-т Станке  
Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: Zaikin.Anatolij@yandex.ru,  
e-izumova@mail.ru, irina-teremkova@yandex.ru

Рассмотрены особенности оперативного планирования и управления лесосечными работами. Показано, что практически невозможно подобрать численность машин в комплекте таким образом, чтобы их производительность на всех операциях была одинаковой. В целях снижения внутрисменных простоев ведущих машин предлагается оперативное планирование – расчет режимов работы машин и оборудования на отдельных операциях с учетом маневрирования численностью (подключением дополнительных машин) или сменностью работы основных машин. Управление лесосечными работами – контроль за соответствием режимов работы машин и оборудования на отдельных операциях – предлагается проводить по объемам оперативных, многоуровневых, технически и технологически перемещаемых межоперационных запасов, рассчитанных для конкретных условий разработки лесосеки. Как правило, для лесосечных работ применяют различные типы машин, условия их работы разнообразны. Предлагаемая методика реализована в виде программного обеспечения на персональных ЭВМ. Программа написана по разработанной укрупненной блок-схеме. Автоматизированное решение задачи должно происходить согласно разработанной организационной схеме. Основные элементы схемы – сбор исходной информации для решения поставленной задачи, заполнение карты заказа, получение и анализ результатов решения, организация работы комплекта машин на основе полученных результатов. В статье также проанализированы результаты расчетов и организации работы комплекта машин. В приведенном примере за счет организации работы по рассчитанным режимам объем выработки комплекта машин увеличивается на 49 % при условии, что на отстающих операциях (валке и обрезке сучьев) будет подключено дополнительное оборудование. Увеличение объема выработки машин позволяет сократить число дней работы машин на лесосеке до 30 % (в зависимости от объема производства); снизить удельные показатели эффективности (эксплуатационные затраты, металлоемкость, энергоемкость и др.); уменьшить вредное воздействие машин на лесные экосистемы

---

*Для цитирования:* Заикин А.Н., Рыжикова Е.Г., Теремкова И.И. Метод оперативного планирования и управления лесосечными работами // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 107–118. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.107

за счет сокращения объемов отравляющих веществ, выбрасываемых с обработанными газами; сохранить почвы от разрушения.

*Ключевые слова:* межоперационные запасы, дополнительные машины, отстающие операции, оперативное планирование, оперативное управление.

### *Введение*

Лесосечные работы представляют собой сложный многооперационный дискретный технологический процесс. Машины и механизмы, выполняющие в нем отдельные операции, объединяются в комплекты машин. Однако, как показывает существующая практика, не удается подобрать комплект лесозаготовительных машин и механизмов с одинаковыми или незначительно отличающимися производительностями. Если на первой операции комплекта работает одна машина, то на второй – две, три, на третьей – одна, две и т. д. Причем особенности лесосечных работ заключаются в том, что между каждой из выполняемых операций создается запас древесины, поэтому все операции в технологическом процессе, за исключением погрузки и вывозки, связаны им между собой. Соответствие параметров организации работы или параметров взаимосвязи машин в таких системах достигается в процессе технологических расчетов с определением оптимальных режимов их функционирования. Поэтому в целях выполнения в установленные сроки плана производства, заготовки и реализации лесоматериалов заданных объемов, номенклатуры и качества при рациональном использовании материальных и трудовых ресурсов, всего производственного потенциала необходимо оперативное планирование (расчет режимов работы комплектов машин) и на его основе оперативное управление.

### *Объекты и методы исследования*

В управлении современным предприятием, в том числе и лесозаготовительным, выделение подсистемы оперативного управления производственным процессом (ОУПП) осуществляется на основе единства задач оперативного обеспечения ритмичного выполнения всего цикла операций при рациональном использовании технических ресурсов.

Система ОУПП, как и всякая система, характеризуется целью, критериями достижения цели, функциями, обеспечивающими целенаправленную деятельность, структурой, т. е. составом элементов и их взаимодействием в процессе управления производством. Конечной целью ОУПП для лесосечных работ, в полном соответствии с системой целей лесозаготовительного производства, является обеспечение выполнения в установленные сроки плана производства, заготовки и реализации лесоматериалов заданных объемов, номенклатуры и качества при

рациональном использовании материальных и трудовых ресурсов, всего производственного потенциала.

Оперативное управление современным лесозаготовительным процессом осуществляется посредством совокупности взаимосвязанных функций – планирования, организации, учета, контроля, анализа, активизации и регулирования при достаточно развитом составе материальных, трудовых, логических, информационных и других компонентов системы. Необходимость упорядочения системы управления в целях повышения его оперативности, использования оптимизационных методов принятия решений, автоматизации расчетов обуславливает реализацию специфической функции ОУПП – совершенствование. Центральным звеном всей системы ОУПП является оперативное планирование (ОП).

Эффективное использование производственных возможностей лесозаготовительных машин и оборудования в значительной степени зависит от соответствия конструктивных особенностей и параметров организации их работы в конкретных природно-производственных условиях. Соответствие параметров организации работы или параметров взаимосвязи машин достигается в процессе оперативного планирования с определением оптимальных режимов их функционирования: численности машин, времени их работы, объемов оперативных запасов древесины и т. д.

Одним из основных показателей эффективности любого технического средства (машины, станка, установки и др.) и поточной линии в целом является их производительность. Анализ выполнения отдельных операций лесосечных работ показал, что подобрать численность машин в комплекте так, чтобы их производительность на всех операциях была бы одинаковой, практически невозможно. Несбалансированность объемов выработки, как известно, приводит к простоям наиболее производительных головных машин и снижению общего объема их выработки до минимального объема выработки на одной из основных операций:

$$Q = \min \{Q\} = Q_{\min}.$$

Требуется так организовать процесс, чтобы общий объем выработки всего комплекта машин был бы равен или близок к максимальному объему выработки машин на основной операции, выполняемой головной машиной:

$$Q = \max \{Q\} = Q_{\max}.$$

Данное условие может быть реализовано с учетом поддержания на требуемом уровне необходимых в конкретных производственных условиях объемов оперативных запасов путем маневрирования численностью или сменностью работы машин «на отстающих операциях». Таким образом, на операциях с объемом выработки меньшим, чем  $Q_{\max}$ , следует на определенное, рассчитанное для конкретных условий время подключать дополнительную машину или же на это время увеличивать сменность работы на данной операции одной или нескольких основных машин. Для такой организации производственного процесса сначала требуется определить, на каких операциях необходимо ма-

неврирование численностью или сменностью работы машин с соблюдением следующего условия:

$$Q_i - Q_s \begin{cases} < 0 - \text{требуется маневрирование на } i\text{-й операции;} \\ = 0 - \text{маневрирование не требуется;} \\ > 0 - \text{требуется маневрирование на } s\text{-й операции,} \end{cases}$$

где  $Q_i$  – объем пополнения запаса машинами  $i$ -й операции,

$$Q_i = \Pi_i n_i k_i;$$

$Q_s$  – объем выработки запаса машинами  $s$ -й операции,

$$Q_s = \Pi_s n_s k_s;$$

$\Pi_i$  и  $\Pi_s$  – производительность машин на  $i$ -й и  $s$ -й операциях;

$n_i$  и  $n_s$  – число машин на  $i$ -й и  $s$ -й операциях;

$k_i$  и  $k_s$  – число смен работы машин на  $i$ -й и  $s$ -й операциях;

$i$  – любое целое число (1, 2, 3, ...,  $i$ );

$s = i + 1$ .

Для тех операций, на которых требуется маневрирование численностью (сменностью работы) машин, определяется продолжительность их работы в планируемый период времени. Контроль за соответствием режимов работы машин и оборудования на отдельных операциях предлагается вести по объемам межоперационных запасов, рассчитанным для этих же условий.

В трудах Н.К. Климусева [7] уточнена роль и значение запасов, разработана имитационная модель лесозаготовительного предприятия, позволяющая решать задачи управления запасами лесоматериалов разной степени товарной готовности по всему производственному процессу на верхнем и нижнем складах с учетом снижения качества лесоматериалов. Разработана гибридная (нечеткая) модель прогнозирования спроса на лесоматериалы класса ANFIS, построенная в среде Matlab. Разработана нейронечеткая модель управления запасами лесоматериалов и вывозкой из нескольких лесопогрузочных пунктов, отличающаяся тем, что позволяет использовать оперативные данные экспертов (водителей лесовозов, мастеров леса и др.).

В работе [9] запасы рассматриваются как перемещаемые, накапливаемые и потребляемые в координатах не только времени, но и пространства.

Как показали проведенные нами исследования [5], межоперационные оперативные запасы между смежными операциями лесосечных работ технически и технологически перемещаемые, многоуровневые, по причине создания их можно разделить на технологические, технические и организационные. Причем, запасы первого уровня – это технологические, обеспечивающие безопасную зону работы, и технические, обеспечивающие работу смежного оборудования, когда одно оборудование простаивает по причине выхода из строя другого, – составляют вместе уровень страховых запасов. Второй уровень – это организационные запасы, которые вместе со страховыми составляют га-



рантийный уровень запасов, обеспечивающий бесперебойную и эффективную работу лесосечных машин в расчетный промежуток времени.

Для интенсификации лесосечных работ необходимо обеспечить полную загрузку машин и механизмов как на отдельных операциях машин, так и комплекта в целом. Полное использование производственных возможностей лесозаготовительных машин и оборудования в значительной степени зависит от соответствия конструктивных особенностей и параметров организации работы в конкретных природно-производственных условиях. Соответствие параметров организации работы или параметров взаимосвязи машин достигается в процессе технологических расчетов с определением оптимальных режимов их функционирования: численности машин, времени их работы, объемов оперативных запасов древесины и т. д. Для выполнения таких расчетов необходимо моделирование различных технологических процессов лесозаготовок и, в частности, лесосечных работ.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Анализ условий эксплуатации лесосечных машин показал, что в основном возможны два варианта несоответствия объемов выработки на смежных операциях: первый – когда объем выработки машин на предыдущей  $i$ -й операции больше, чем на последующей  $s$ -й ( $Q_i > Q_s$ ), второй – когда объем выработки машин на предыдущей  $i$ -й операции меньше, чем на последующей  $s$ -й ( $Q_i < Q_s$ ). Для этих двух случаев нами разработаны математические модели [1, 3, 4]. При разработке моделей нами были учтены основные особенности выполнения лесосечных работ. К таким особенностям относятся: одновременное начало работы машин на отдельных операциях; необходимость создания и поддержания на определенном, рассчитанном для конкретных условий уровне межоперационных оперативных запасов объектов труда – ОТ (деревьев, хлыстов, сортиментов) и обеспечения максимальной выработки комплекта машин при минимальных удельных затратах; последовательность перебазировки машин с лесосеки на лесосеку и др.

Полученные математические модели отличаются от имеющихся [7, 8] тем, что позволяют определять не только объемы запасов, но и режимы работы комплекта машин, имеющего две и более операции, с учетом его максимальной выработки ( $Q_{\max}$ ) и маневрирования (в сторону увеличения) численностью или сменностью работы машин на отстающих операциях (операциях с объемом выработки меньше, чем у ведущей машины).

Проведенные нами исследования и экономические расчеты [2] показали, что в качестве дополнительного комплекта целесообразно иметь на валке и обрезке сучьев бензиномоторную машину, на трелевке – чокерный трелевочный трактор. На лесосечных работах, как правило, применяют различные типы машин, условия их работы разнообразны. Предлагаемая методика реализована в виде программного обеспечения на персональных ЭВМ. Программа написана по разработанной блок-схеме (рис. 1) [6].



дополнительных дней работы технических средств на отстающих операциях; объем производства без изменения численности (сменности); дополнительный объем, выполненный после изменения численности (сменности); общий объем и др.

Автоматизированное решение задачи происходит по организационной схеме, приведенной на рис. 2.

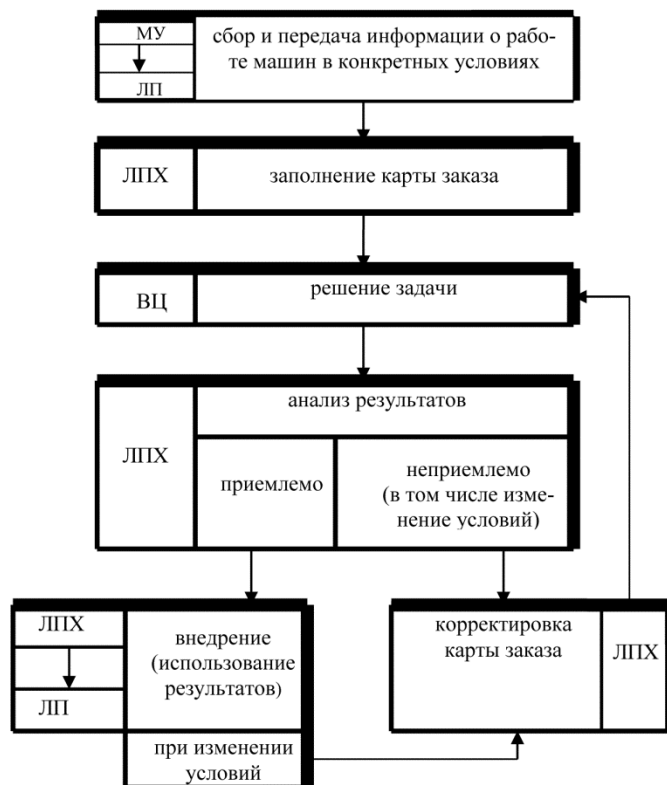


Рис. 2. Организационная схема решения задачи

В леспромхозах по мере отвода лесосек в рубку соответствующие работники (инженеры производственных отделов, техноруки) заполняют карту (бланк) заказа, записывая туда требуемую входную информацию, которую вводят также в ЭВМ. После решения задачи анализируют результаты расчетов, и, если они не вызывают сомнений, распечатку отправляют мастеру леса. Мастер леса внимательно изучает рекомендуемые режимы работы машин, и если они соответствуют условиям разработки конкретной лесосеки, то используют их. Если по каким-либо причинам (например, из-за изменения условий) результаты неприемлемы, он корректирует карту заказа (заполняет новую) и отправляет ее для повторного решения.

Пользоваться результатами расчетов необходимо следующим образом. Перед началом разработки лесосеки отбирают результаты расчетов по ней. Имея результаты расчетов для данных условий, руководитель работ (мастер) устанавливает время предварительной работы и объемы создаваемых запасов (если это начало разработки лесосеки). После начала работы конкретной машины мастер контролирует число дней ее работы по объему запасов и дает команду на подключение в работу технических средств на следующей операции. Зная по результатам расчетов продолжительность работы дополнительных технических средств, он поочередно подключает их к каждому комплекту машин. Продолжительность работы и тип подключаемого оборудования устанавливаются для каждого конкретного месяца разработки лесосеки.

В последний месяц разработки лесосеки мастер определяет время, необходимое техническим средствам на каждой из операций для своевременного проведения работ, и время до их перебазирования на новую лесосеку. Порядок управления на новой лесосеке аналогичен вышеописанному, но соответствует результатам расчетов для конкретной лесосеки.

Документом, поясняющим порядок и правило заполнения входной документации и использования результатов расчетов, служит разработанная нами «Инструкция по применению показателей рационального управления оперативными запасами древесины в транспортно-технологическом потоке лесосечных работ, полученных при решении задачи на ЭВМ».

Анализ результатов расчетов запасов для отдельных объемов хлыста показывает, что с увеличением среднего объема хлыста объемы запасов между операциями возрастают (рис. 3).

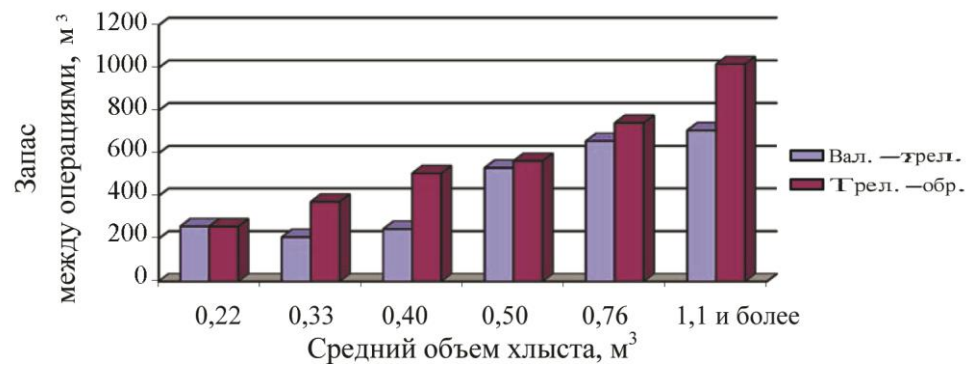


Рис. 3. Изменение объемов запасов между операциями

Это объясняется тем, что с увеличением объема хлыста растут производительность машин на операциях и разница объемов выработки. С другой стороны, с уменьшением разницы между объемами пополнения и

выработки снижаются объемы запасов и разница между ними для отдельных объемов хлыста. Так, при разнице объемов пополнения и выработки запасов от 51 до 95 м<sup>3</sup> разница объемов между запасами  $1017,0 - 256,6 = 706,4$  м<sup>3</sup>, при разнице от 27 до 43 м<sup>3</sup> –  $697,7 - 192,4 = 505,3$  м<sup>3</sup>, при разнице от 14 до 20 м<sup>3</sup> –  $593,8 - 300,8 = 293,0$  м<sup>3</sup>.

Чтобы оперативные запасы не превышали предельной величины, необходимо знать когда, насколько и какое дополнительное техническое средство требуется подключать к основному комплекту машин (или насколько необходимо увеличить число смен работы основного оборудования) на отстающих операциях.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением объема выработки машин (среднего объема хлыста) на отдельных операциях продолжительность работы дополнительных машин уменьшается. Например, при работе сучкорезной машины в одну смену разница объемов пополнения и выработки запасов составляет от 51 до 95 м<sup>3</sup>. В этом случае необходимо подключать две бензопилы «Тайга-214» на время от 17,5 до 11,3 дн. При работе сучкорезной машины в 1,2 смены разница объемов пополнения и выработки запасов составляет от 27 до 43 м<sup>3</sup>, продолжительность работы одной дополнительно подключаемой бензопилы «Тайга-214» – от 16,6 до 10,2 дн. При работе сучкорезной машины в 1,3 смены разница объемов пополнения и выработки запасов составляет от 14 до 20 м<sup>3</sup>, продолжительность работы одной дополнительно подключаемой бензопилы «Тайга-214» – от 9,0 до 4,0 дн.

#### *Заключение*

За счет организации работы по рассчитанным режимам объем выработки комплекта машин, например в составе одной валочно-пакетирующей (225 м<sup>3</sup>), двух-трех трелевочных (243 м<sup>3</sup>) и одной сучкорезной (163 м<sup>3</sup>), будет равен 243 м<sup>3</sup>, т. е. возрастет на 49 % при условии, что на отстающих операциях (валке и обрезке сучьев) будет подключено дополнительное оборудование.

Увеличение объема выработки машин позволяет достичь следующих результатов: сократить число дней работы машин на лесосеке до 30 % (в зависимости от объема производства); снизить удельные показатели эффективности (эксплуатационные затраты, металлоемкость, энергоемкость и др.); уменьшить вредное воздействие машин на лесные экосистемы за счет снижения объемов отравляющих веществ, выбрасываемых с отработавшими газами, и сохранения почв от разрушения, площадь которых может составлять от 4...10 до 40...100 га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заикин А.Н.* Моделирование режимов работы лесосечных машин // Лесн. журн. 2009. № 1. С. 71–77. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. *Заикин А.Н.* Теория, методы и модели интенсификации лесосечных работ: моногр. Брянск: БГИТА, 2009. 204 с.
3. *Заикин А.Н.* Математические модели расчета режимов работы лесосечных машин // В мире научных открытий: материалы II Всерос. науч. конф. «Научное творчество XXI в.» с междунар. участием. Красноярск: Науч.-инновац. центр. 2010. Ч. 13, № 4(10). С. 126–129.
4. *Заикин А.Н.* Математическое моделирование режимов работы лесосечных машин и анализ изменения объемов оперативных запасов // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2010. № 1. С. 69–75.
5. *Заикин А.Н.* Типы и назначение запасов древесины в производственном процессе лесозаготовок // Лесн. журн. 2013. № 3. С. 71–78. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. *Заикин А.Н., Памфилов Е.А., Изюмова Е.Г.* Автоматизация расчета режимов работы комплектов машин // Вестн. Брянск. ГТУ, 2009. № 1. С. 69–75.
7. *Климушев Н.К.* Управление запасами лесоматериалов в лесозаготовительном производстве: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 244 с.
8. *Редькин А.К., Якимович С.Б.* Математическое моделирование и оптимизация технологий лесозаготовок: учеб. для вузов. М.: МГУЛ, 2005. 504 с.
9. *Якимович С.Б., Тетерина М.А.* Классификация обрабатывающих транспортных систем заготовки и первичной обработки древесины // Вестн. МГУЛ– Лесн. вестн. 2009. № 2. С. 67–72.

Поступила 28.11.16

UDC 630\*32:658  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.107

**Method of Operational Planning and Control of Logging Operations**

*A.N. Zaikin, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor*  
*E.G. Ryzhikova, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer*  
*I.I. Teremkova, Lecturer*

Bryansk State Engineering Technological University, pr. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: Zaikin.Anatolij@yandex.ru, e-izumova@mail.ru, irina-teremkova@yandex.ru

The paper considers the features of operational planning and management of logging activities. It is almost impossible to choose the number of machines in a plant to make their performance in all operations similar. In order to reduce the ineffective time in the operating

---

*For citation: Zaikin A.N., Ryzhikova E.G., Teremkova I.I. Method of Operational Planning and Control of Logging Operations. Lesnoy zhurnal [Forestry journal], 2017, no. 2, pp. 107–118. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.107*

shifts of the lead machines we offer the operational planning – a calculation of modes of machinery and equipment in individual operations, taking into account the maneuvering of the number of machines (by additional machines) or shift-working arrangements of the main machines. The operational management of logging activities – a monitoring for the compliance of regimes of machines and equipment in individual operations – we propose to carry out in terms of operational, multi-level, technically and technologically transported interoperable reserves, calculated for the specific conditions of the cutting area development. As a rule, various types of machines are used in the logging activities; their working conditions are varied. The proposed method is implemented as a software on a personal computer. The program is created by the developed enlarged flowgraph. The automated solution of the problem should be developed in accordance with the organizational scheme. The basic elements of the scheme are the collection of the baseline information to solve the problem, filling in an order sheet, achievement and analysis of the decision results, the work organization of the plant on the basis of the received results. The article also analyzes the results of calculations and the process organization of a plant. In a given instance due to the process organization according to the calculated modes the volume of production of a plant will increase by 49 %, if the additional equipment is enable in the lagging operations (felling and knotting). The increase in out-turn of machines reduces the number of working days of machines in the felling area up to 30 % (depending on the volume of production); reduce the economical efficiency (operating costs, metal consumption, energy consumption, etc.); reduce the harmful effect of cars on the forest ecosystems by compromising the amount of toxic substances emitted with the exhaust gases; keep soils from being destroyed.

*Keywords:* in-process reserve, additional machine, lagging operation, operational planning, operational control.

#### REFERENCES

1. Zaikin A.N. Modelirovanie rezhimov raboty lesosechnykh mashin [Simulation of Logging Machines Operation Modes]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2009, no. 1, pp. 71–77.
2. Zaikin A.N. *Teoriya, metody i modeli intensivifikatsii lesosechnykh rabot: monogr.* [Theory, Methods and Models of Intensification of Logging Activities]. Bryansk, 2009. 204 p.
3. Zaikin A.N. Matematicheskie modeli rascheta rezhimov raboty lesosechnykh mashin [Mathematical Models of Calculation of Modes of Harvesting Machinery]. *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the World of Scientific Discoveries], 2010, part 13, no. 4(10), pp. 126–129.
4. Zaikin A.N. Matematicheskoe modelirovanie rezhimov raboty lesosechnykh mashin i analiz izmeneniya ob'emov operativnykh zapasov [Designing of Operation Modes of Logging Machines]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2010, no. 1, pp. 69–75.
5. Zaikin A.N. Tipy i naznachenie zapasov drevesiny v proizvodstvennom protsesse lesozagotovok [The Types and Purpose of Timber Stocks in the Process of Timber Production]. *Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 3, pp. 71–78.

6. Zaikin A.N., Pamfilov E.A., Izyumova E.G. Avtomatizatsiya rascheta rezhimov raboty komplektov mashin [Automation of Calculation of Operating Regimes of Plants]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk state technical university], 2009, no. 1, pp. 69–75.

7. Klimushev N.K. *Upravlenie zapasami lesomaterialov lesozagotovitel'nom proizvodstve: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Timber Inventory Management in the Timber Production: Pr. Eng. Csi. Diss.]. Moscow, 2008. 244 p.

8. Red'kin A.K., Yakimovich S.B. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya ob'ektov tekhnologii lesozagotovok: ucheb. dlya vuzov* [Mathematical Modeling and Optimization of Objects of Harvesting Technologies]. Moscow, 2005. 504 p.

9. Yakimovich S.B., Teterina M.A. Klassifikatsiya obrabatyvayushchikh transportnykh sistem zagotovki i pervichnoy obrabotki drevesiny [Classification of Wood Harvesting and Primary Processing Processing-Transporting Systems]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2009, no. 2, pp. 67–72.

Received on November 28, 2016



УДК 630\*3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.119

## **РАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РУБОК С ТРЕЛЕВКОЙ ЗАГОТОВЛЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ МИНИ-ТРАКТОРАМИ ПОД ПОЛОГОМ ДРЕВОСТОЯ**

*Э.Ф. Герц, д-р техн. наук, доц.*

*Н.Н. Теринов, д-р с.-х. наук*

*Ю.Н. Безгина, канд. с.-х. наук, доц.*

*А.Ф. Уразова, канд. с.-х. наук*

*Т.А. Перепечина, асп.*

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт,  
д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: gerz.e@mail.ru, n\_n\_terinov@mail.ru,  
bezginajn@rambler.ru, ura-alina@mail.ru

Формирование сети трелевочных волоков при выполнении рубок ухода и выборочных рубок в спелых и перестойных древостоях снижает производительность древостоев в результате разрубки коридоров и механической деформации почвогрунтов в процессе перемещения трелевочной техники. Снижение плотности трелевочных волоков при селективном изреживании древостоев достигается подтрелевкой древесины к волокам мини-тракторами, работающими под пологом древостоя. Такая возможность обеспечивается габаритами и маневренностью мини-тракторов, соответствующими густоте формируемого древостоя. Возможность и целесообразность применения мини-тракторов должны определяться с учетом экологических, социальных и экономических критериев. В качестве наиболее информативного критерия для оценки эффективности трелевочного мини-трактора при выборе схемы его перемещения рассмотрена часовая производительность, максимум которой, при прочих равных условиях, достигается при формировании полной загрузки и минимальной величине холостого хода. В качестве вариантов перемещения мини-трактора при работе под пологом древостоя рассмотрены схемы с ходами между смежными пасечными волоками, с челночными ходами, параллельными пасечному волоку, и с ходами, перпендикулярными пасечному волоку. Ограничениями по использованию схем являются крутизна маневрирования при заданных габаритах мини-трактора, длина трелеваемых лесоматериалов и густота древостоя. Рекомендации по использованию схем перемещения учитывают соотношение грузоподъемности мини-трактора, крупномерности вырубаемых деревьев и возможности формирования полногрузного пакета при минимальном расстоянии перемещения.

*Ключевые слова:* трелевка древесины без прокладки волоков, рациональный маршрут перемещения, производительность, мини-трактор.

---

*Для цитирования:* Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Безгина Ю.Н., Уразова А.Ф., Перепечина Т.А. Рациональная технология рубок с трелевкой заготовленной древесины мини-тракторами под пологом древостоя // Лесн. журн. 2017. № 2. С. 119–129. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.119

*Введение*

Выполнение рубок системой машин, включающей машины, способные перемещаться в процессе выполнения работ под пологом древостоя, и обеспечивающей трелевку заготовленной древесины без прокладки волоков, вызывает определенный интерес российских исследователей. Однако на практике оно до настоящего времени практически не реализуется [1, 7, 8, 10]. При этом практика реализации выборочных рубок широкими пасаками с подтрелевкой древесины к волокам лебедками и мини-тракторами за рубежом распространена достаточно широко [4, 11–15].

Перечислим причины такого положения: возрастание значимости экологических и социальных критериев в условиях возросшего уровня (качества) жизни населения и неизбежный при этом пересмотр взглядов по ряду вопросов, в том числе по вопросу отношения к лесу, который рассматривается не только как источник сырьевых ресурсов. Применение машин, востребованных только для выполнения рубок ухода и выборочных рубок в спелых и перестойных древостоях, имеет ряд ограничений. Так, применение лебедок ограничено, прежде всего, сложностью изменения направления перемещения лесоматериала отклоняющимися блоками и очень низкой их производительностью [12, 14, 15]. Применение мини-тракторов при работе под пологом древостоя ограничивается их габаритными размерами, маневренностью (в зависимости от густоты формируемого рубками древостоя) и малой производительностью по сравнению с серийными трелевочными тракторами, используемыми в традиционных технологиях [2, 3, 5, 6]. Возможность и целесообразность использования мини-тракторов при выполнении рубок может и должна определяться с учетом экологических, социальных и экономических критериев [2, 6, 9]. Вместе с тем, экологические и социальные критерии в процессе отбора систем машин и технологий рубок играют в первую очередь роль ограничений, используемых для отсева неприемлемых в современных условиях. Окончательный выбор технологии выполняется по экономическим критериям, определяющим эффективность процесса.

*Объекты и методы исследования*

Наиболее информативным критерием для оценки эффективности трелевочного мини-трактора при анализе рассматриваемых маршрутов перемещения является производительность. Затраты времени на выполнение элементов цикла по приведенным схемам определяются совокупностью факторов: техническими характеристиками мини-трактора и его технологического оборудования, а также параметрами рубок (интенсивность изреживания) и характеристиками древостоя, например такими, как размеры вырубаемых деревьев и их распределение в древостое.

Транспортируемый пакет может состоять как из одного отрезка ствола (при рубках в крупномерных спелых и перестойных насаждениях), так и из десятков стволов (при рубках ухода в молодняках).

Производительность мини-трактора при трелевке древесины, как и тракторов, используемых на трелевке в традиционных технологиях, определяется объемом трелюемой пачки и продолжительностью цикла:

$$P_p = \frac{V_{cp}^{III}}{T_{ц}^T} \Rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $V_{cp}^{III}$  – средний объем транспортируемого мини-трактором пакета, м<sup>3</sup>;

$T_{ц}^T$  – продолжительность цикла, с.

Продолжительность цикла

$$T_{ц}^T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \quad (2)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время соответственно погрузки и разгрузки грузовой платформы мини-трактора, с;

$t_3$  и  $t_4$  – время движения мини-трактора соответственно в грузовом и порожнем направлениях, с;

$t_5$  – время переездов в процессе погрузки грузовой платформы мини-трактора, с.

Время погрузки и разгрузки грузовой платформы мини-трактора:

$$t_1 = t_{1.1} \frac{V_{cp}^{III}}{V_{1.1}}; \quad t_2 = t_{2.1} \frac{V_{cp}^{III}}{V_{2.1}}; \quad (3)$$

где  $t_{1.1}$ ,  $t_{2.1}$  – время соответственно погрузки и выгрузки одной порции груза (сортифта), с;

$V_{1.1}$ ,  $V_{2.1}$  – объем одной порции груза соответственно при погрузке и выгрузке, м<sup>3</sup>.

Погрузка мини-трактора в зависимости от его грузоподъемности и массы единицы трелюемых лесоматериалов может осуществляться как вручную, так и с применением лебедки или манипулятора. Выбор рационального варианта погрузки должен определяться для различных сочетаний названных факторов с использованием экономических (себестоимость) и социальных (эргономических) факторов [2]. Однако в данной статье эта задача не рассматривается.

Время движения мини-трактора в грузовом и порожнем направлениях:

$$t_3 = \frac{l_{III} k_{уIII}}{v_3}; \quad t_4 = \frac{l_{II} k_{уII}}{v_4}, \quad (4)$$

где  $l_{II}$ ,  $l_{III}$  – расстояние переезда в порожнем и грузовом направлениях, м;

$k_{уII}$ ,  $k_{уIII}$  – коэффициент, учитывающий увеличение пройденного пути за счет непрямолинейности движения и разворотов;

$v_3$  и  $v_4$  – скорость движения мини-трактора соответственно в грузовом и порожнем направлениях, м/с.

Время переездов при погрузке грузовой платформы мини-трактора

$$t_5 = \frac{l_{\Pi} k_{уш\pi}}{v_{\Pi}}, \quad (5)$$

где  $l_{\Pi}$  – путь мини-трактора, необходимый для полной загрузки грузовой платформы, м;

$v_{\Pi}$  – средняя скорость мини-трактора при переездах между рабочими стоянками, м/с.

Путь (средний) мини-трактора, необходимый для полной загрузки грузовой платформы,

$$l_{\Pi} = \frac{V_{\text{сп}}^{\text{тп}}}{w_{\Pi} q p} 10^4, \quad (6)$$

где  $w_{\Pi}$  – ширина ленты набора пачки мини-трактором, м;

$q$  – запас древесины, м<sup>3</sup>/га;

$p$  – доля вырубаемого запаса,  $p \leq 1,0$ .

Производительность мини-трактора при трелевке древесины, заготовленной в процессе изреживания древостоя рубками ухода или выборочными рубками в спелых и перестойных древостоях, во многом определяется возможными маршрутами его перемещения.

Одной из наиболее распространенных является челночная схема, при которой мини-трактор продвигается в глубь древостоя холостым ходом, а после разворота движется в направлении зоны складирования древесины (рис. 1).

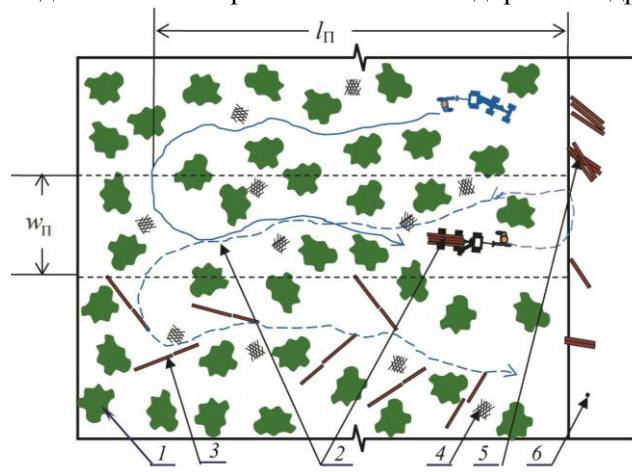


Рис. 1. Трелевка древесины мини-трактором челночными ходами с заходом в глубь древостоя и загрузкой при перемещении к зоне складирования древесины: 1 – растущие деревья; 2 – мини-трактор и маршрут его перемещения; 3 – заготовленные сортименты; 4 – порубочные остатки; 5 – пакеты сортиментов; 6 – зона складирования

Холостой ход по этой схеме перемещения равен расстоянию, необходимому для полной загрузки грузовой платформы ( $l_{\Pi}$ ), и составляет  $\frac{1}{2}$  суммарного расстояния при перемещении мини-трактора в цикле трелевки.

Перемещение в процессе набора грузового пакета мини-трактором может осуществляться не только по относительно прямолинейной траектории перпендикулярно кромке изреживаемого древостоя (рис. 1), но и со значительным маневрированием в поперечном направлении или под углом к кромке древостоя для увеличения площади подбора.

Вариантом работы мини-трактора по челночной схеме является работа без холостого хода, предусматривающая загрузку платформы на всем маршруте как при движении в глубь древостоя, так и при возврате. Дополнительной сложностью при работе по этой схеме является необходимость разворота мини-трактора с частично загруженной грузовой платформой (рис. 2). Холостой ход при такой схеме перемещения мини-трактора равен расстоянию вдоль кромки изреживаемого древостоя от точки разгрузки до точки входа в древостой.

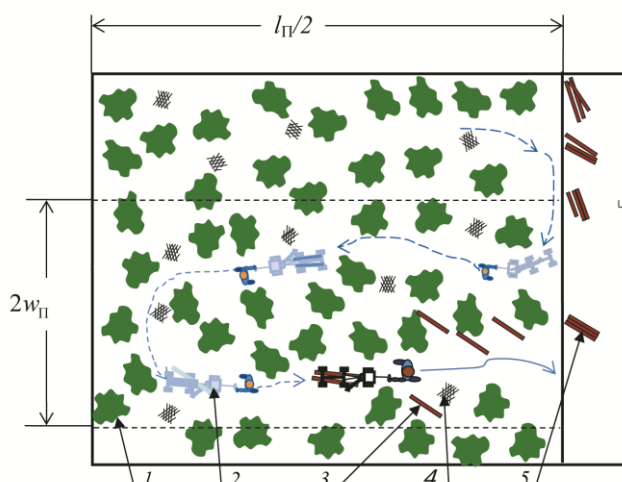


Рис. 2. Трелевка древесины мини-трактором челночными ходами с загрузкой платформы при перемещении по всему маршруту (см. обозначения на рис. 1)

Схема с пересечением изреживаемого древостоя параллельными прямолинейными ходами и складированием пакетов древесины в зонах, доступных другим транспортным машинам, позволяет исключить разворот частично загруженного мини-трактора при перемещении под пологом древостоя. Такая конфигурация древостоя формируется при широкопосечных технологиях, где волокнистые и центральные части пасек разрабатываются манипуляторными лесозаготовительными машинами (например, харвестерами и форвардерами). Мини-трактор совершает челночное перемещение между пасечными волокнами,

вытрелевывая древесину, заготовленную в недоступных манипуляторным лесозаготовительным машинам зонах полупасек (рис. 3). Холостой ход при работе мини-трактора по этой схеме определяется суммой ширины ленты, доступной для манипулятора форвардера, работающего на пасечном волоке, и расстояния между точками разгрузки и входом мини-трактора в древесостой. Грузовой ход мини-трактора в таком случае равен ширине ленты древесостоя, доступной для манипуляторов со смежных пасечных волоков. При этом длина ленты набора пачки мини-трактором

$$l'_{\Pi} = \frac{B - b_{lm}}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Общей характеристикой приведенных схем работы мини-трактора является фиксированное расстояние перемещения при загрузке платформы. Это обстоятельство в условиях неравномерного распределения вырубаемых деревьев по площади древесостоя и неравномерной концентрации заготовленной древесины вдоль маршрута перемещения мини-трактора может привести к нежелательным последствиям. Загрузка мини-трактора из-за систематической недостаточности объемов заготовленных сортиментов на маршруте будет неполной, следовательно, его производительность снизится. Наличие на маршруте объемов древесины, превышающих рейсовую загрузку мини-трактора, повлечет за собой переполнение грузовой платформы (перегруз), повторный

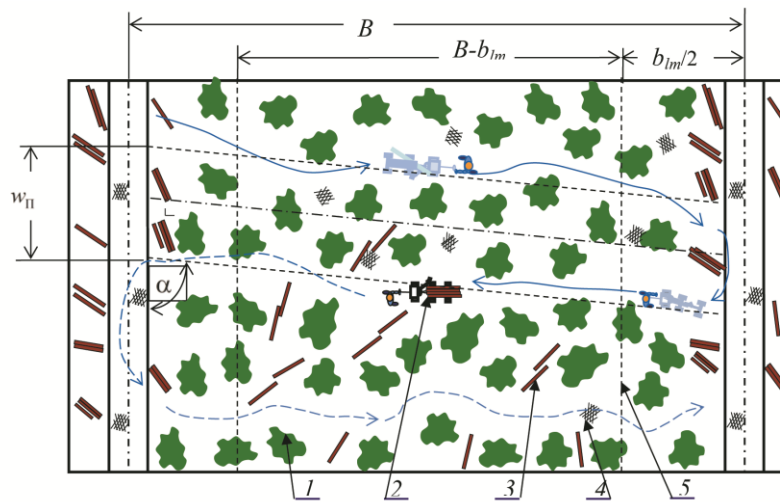


Рис. 3. Трелевка древесины мини-трактором челночными ходами между двумя пасечными волоками: 1 – растущие деревья; 2 – мини-трактор и маршрут его перемещения; 3 – работа с поваленным деревом и мини-трактором; 4 – порубочные остатки; 5 – граница зоны работы харвестера;  $B$  – ширина пасеки;  $b_{lm}$  – ширина ленты, доступная манипулятору форвардера

заход на маршрут для сбора оставленной древесины или корректировку очередного маршрута с той же целью.

Полная загрузка грузовой платформы мини-трактора в процессе его перемещения под пологом древостоя и подбора заготовленной древесины в каждом цикле может быть достигнута при параллельном кромке древостоя расположении лент набора пачки (рис. 4).

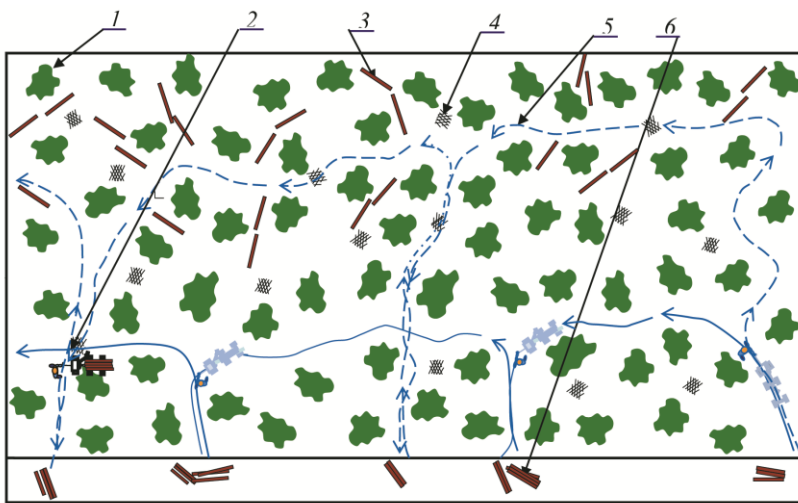


Рис. 4. Подбор заготовленной древесины и ее трелевка ходами, параллельными кромке древостоя: 1 – растущие деревья; 2 – мини-трактор и маршрут его перемещения при подборе сортиментов с ближней ленты; 3 – заготовленные сортименты; 4 – порубочные остатки; 5 – маршруты перемещения мини-трактора при подборе сортиментов со второй от кромки древостоя ленты; 6 – пакеты сортиментов в зоне складирования

Трелевка древесины мини-трактором челночными ходами с заходом в глубь древостоя и загрузкой при перемещении к зоне складирования древесины (см. рис. 1) предполагает значительную величину холостого хода, равного сумме грузового хода и пути, необходимого для загрузки грузовой платформы. Рациональная структура цикла работы мини-трактора по этой схеме складывается в крупномерных древостоях при формировании грузового пакета с одной рабочей стоянки. Схема может использоваться при ширине ленты изреживаемого древостоя до расчетного значения  $l_{\Pi}$  (см. формулу (6)). При этом должна обеспечиваться возможность разворота мини-трактора с частичной загрузкой платформы под пологом древостоя при формируемой его густоте [3].

Трелевка древесины мини-трактором челночными ходами с загрузкой платформы при перемещении по всему маршруту (см. рис. 2). Подбор лесоматериалов с их погрузкой на платформу мини-трактора на всем маршруте

позволяет минимизировать холостой ход мини-трактора, однако не исключает другие негативные изменения в структуре цикла. На маршруте расчетной протяженности (формула (6)) объем заготовленной древесины вследствие неравномерности изреживания древостоя может и будет колебаться в некотором диапазоне, что неизбежно приведет или к возрастанию расстояния грузового хода, или (и) к неполной загрузке. Кроме того, разворот частично загруженного мини-трактора дополнительно осложняет процесс.

*Трелевка древесины мини-трактором челночными ходами между двумя пасечными волоками* (рис. 3) может рекомендоваться при равномерном изреживании мелкотоварного древостоя. При известных характеристиках древостоя, заданной интенсивности изреживания и технологии подбора лесоматериалов вдоль маршрута перемещения мини-трактора (или ширины ленты набора пачки) длина ленты набора пачки определяется по формуле (6), расстояние между волоками для рассматриваемой системы лесосечных машин – из соотношения (7).

*Подбор заготовленной древесины и ее трелевка ходами, параллельными кромке древостоя* (рис. 4) обеспечивает возможность формирования полногрузных пакетов не зависимо от встречаемости заготовленной древесины вдоль маршрута перемещения. Наиболее предпочтительна работа мини-трактора в условиях, предполагающих погрузку значительного числа сортиментов для заполнения грузовой платформы. Такая ситуация складывается при проведении рубок в мелкотоварных древостоях с неравномерным расположением вырубаемых деревьев. Ширина ленты изреживаемого древостоя, заготовленная древесина с которого может вытрелевываться мини-тракторами, ограничивается экономическими критериями.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Таким образом, выбор рациональной схемы перемещения мини-трактора при организации трелевки древесины, заготовленной в процессе селективного изреживания под пологом древостоя, определяется с учетом соотношения его грузоподъемности и средней массы вырубаемых стволов:

при  $V_{\text{ср}}^{\text{ТП}}$ , равном объему вырубаемого ствола, но не меньше объема одного сортимента, используется схема, приведенная на рис. 1; мини-трактор загружается после разворота на одной стоянке (грузят либо все сортименты, выпиленные из ствола, либо их часть);

при  $V_{\text{ср}}^{\text{ТП}}$ , значительно превышающем средний объем ствола вырубаемых деревьев, подбор и погрузка заготовленных сортиментов выполняется на нескольких рабочих стоянках; при возможности крутого маневрирования (в том числе разворота) мини-трактора с пачкой под пологом древостоя целесообразно работать по схеме 2; при невозможности крутого маневрирования в древостое может быть рекомендована схема 1 или 3;



при варьировании объемов вырубаемых стволов в широком диапазоне  $(0,1 \dots 1,0)$   $V_{\text{ср}}^{\text{III}}$  наиболее целесообразной является работа по схеме, приведенной на рис. 4, позволяющая при любой ситуации формировать полногрузный пакет.

В настоящее время проводится опытно-производственная проверка изложенного материала, результаты которой позволят уточнить технологию работы мини-трактора в условиях различных рубок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Залесов С.В., Луганский Н.А. Сортиментная технология лесосечных работ при равномерно-постепенных рубках // Аграр. вестн. Урала. 2012. № 8. С. 51–54.
2. Безгина Ю.Н., Герц Э.Ф., Иванов В.В., Перепечина Т.А., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Выбор технологии лесосечных работ в условиях устойчивого лесопользования // Леса России и хозяйство в них. 2015. Т. 55, № 4. С. 12–22.
3. Герц Э.Ф., Перепечина Т.А., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф., Безгина Ю.Н. Условия и возможность работы лесотранспортных систем под пологом древостоя // Resources and Technology. 2016. № 13(2). С. 20–33.
4. Валяжонков В.Д., Мясницев Д.Г. Особенности малой механизации лесозаготовок за рубежом // Лесн. журн. 2005. № 6. С. 64–69. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Герц Э.Ф., Азаренок В.А., Лившиц Н.В., Мехренцев А.В. К вопросу о целесообразности применения операции подтрелевки при несплошных рубках // Лесн. журн. 2002. № 3. С. 44–48. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. Герц Э.Ф., Залесов С.В. Повышение лесоводственной эффективности несплошных рубок путем оптимизации валки назначенных в рубку деревьев // Лесн. хоз-во. 2003. № 5. С. 18–20.
7. Иванов Н.А., Лейбович М.В. Основы теории легких колесных вездеходов. Владивосток: Дальнаука, 2010. 254 с.
8. Иванов Н.А., Мясников Е.В. Оценка проходимости трехколесного вездехода по лесистой местности // Лесн. журн. 2005. № 5. С. 45–53. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Безгина Ю.Н. Малогабаритный трактор для рубок ухода и его влияние на лесную среду // Аграр. Россия. 2015. № 7. С. 27–31.
10. Хайновский В.В., Зенькевич Д.А. Оценка проходимости и маневренности лесной двухзвенной погрузочно-транспортной машины // Акт. пробл. лесн. комплекса-2004: сб. ст. С. 214–217.
11. Dummel K., Branz H. Holzernteverfahren: vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Forstwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland // Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Münster-Hiltrup. 1986. Heft 333. P. 205.
12. Löffler H. Forstliche Verfahrenstechnik (Holzernte) für Studierende der Forstwissenschaft. München. 1991. P. 527.
13. Luthy C., Gerz E. Zange oder Seilwinde? // Wald und Holz. No. 1.15/94. Pp. 22–25.
14. Vorliefern mit Bodenseilzug / Forsttraktor. Praxishilfe. Zeitaufwand für Holzernverfahren. Grundlage für Pauschalansätze // Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern. 1997. P. 70.
15. Forbrig A. Waldarbeit im Umbruch: Tagungsführer zur 11. KWF-Tagung. Koblenz. 1992. P. 132.

Поступила 18.01.17

UDC 630\*3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.119

**Rational Cutting Technology with Mini Tractors Log Skidding  
Under the Forest Canopy**

*E.F. Gerts, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*N.N. Terinov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

*Yu.N. Bezgina, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor*

*A.F. Urazova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor*

*T.A. Perepechina, Postgraduate Student*

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: gerz.e@mail.ru, n\_n\_terinov@mail.ru, bezginajn@rambler.ru, ura-alina@mail.ru

The formation of the skidding trail system when thinning and selective cuttings of mature and over-mature forest stands reduces the performance of stands as a result of the corridors cutting and mechanical deformation of soil in the process of moving of the skidding equipment. Reducing the density of the skidding trails in the selection thinning of forest stands is reached by timber skidding to the runways by mini tractors working under the forest stand canopy. This is provided by dimensions and maneuverability of mini tractors corresponding to the density of the forest stands. The possibility and feasibility of mini tractors should be defined taking into account the environmental, social and economic criteria. The one-hour efficiency is considered as the most informative criterion for assessing the skidding mini tractor effectiveness when selecting the schemes of its moving. Its maximum under otherwise equal conditions is reached in the formation of a full load and minimum value of idling. The schemes of the mini tractor moving between skidding trails in cutting strip, of shuttle runs, parallel and perpendicular to the skidding trails in cutting strip are considered as the variants of mini tractor moving under the canopy of the forest stand. A limitation on the use of schemes is the maneuvering steepness at the given dimensions of mini tractors, skidding timber length and density of the stand. Recommendations for the use of the moving schemes take into account the ratio of weight-carrying capacity of the mini tractor, large-scale cutting trees and the possibility of forming of full-load package with a minimum displacement distance.

*Keywords:* log skidding without running trails, rational displacement route, performance, mini tractor.

REFERENCES

1. Azarenok V.A., Gerts E.F., Zalesov S.V., Luganskiy N.A. Sortimentnaya tekhnologiya lesosechnykh rabot pri ravnomerno-postepennykh rubkakh [Assortment Technologies of Felling at the Uniformly and Gradually Felling]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2012, no. 8, pp. 51–54.

---

*For citation:* Gerts E.F., Terinov N.N., Bezgina Yu.N., Urazova A.F., Perepechina T.A. Rational Cutting Technology with Mini Tractors Log Skidding Under the Forest Canopy. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.119–129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.119

2. Bezgina Yu.N., Gerts E.F., Ivanov V.V., Perepechina T.A., Terinov N.N., Urazova A.F. Vybór tekhnologii lesosechnykh rabot v usloviyakh ustoychivogo lesopol'zovaniya [The Choice of Technology Logging Activities in Sustainable Forest Management]. *Lesn Rossii i khozyaystvo v nikh*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 12–22.

3. Gerts E.F., Perepechina T.A., Terinov N.N., Urazova A.F., Bezgina Yu.N. Usloviya i vozmozhnost' raboty lesotransportnykh sistem pod pologom drevostoya [Conditions and Ability to Work Forest Transport Systems Under the Canopy of the Stand]. *Resources and Technology*, 2016, no. 13(2), pp. 20–33.

4. Valyazhonkov V.D., Myasishchev D.G. Osobennosti maloy mekhanizatsii lesozagotovok za rubezhom [Peculiarities of Small Mechanization of Forest Harvesting Abroad]. *Lesnoy zhurnal*, 2005, no. 6, pp. 64–69.

5. Gerts E.F., Azarenok V.A., Livshits N.V., Mekhrentsev A.V. K voprosu o tselesoobraznosti primeneniya operatsii podtrelevki pri nesploshnykh rubkakh [To Question of Expediency of Using Hauling Operations in Non-Clear Cutting]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2002, no. 3, pp. 44–48.

6. Gerts E.F., Zalesov S.V. Povyshenie lesovodstvennoy effektivnosti nesploshnykh rubok putem optimizatsii valki naznachennykh v rubku derev'ev [Improving the Silvicultural Efficiency of Selective Cutting by Optimizing of Designated Tree Felling]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2003, no. 5, pp. 18–20.

7. Ivanov N.A., Leybovich M.V. *Osnovy teorii legkikh kolesnykh vezdekhodov* [Fundamentals of the Theory of Light All-Wheel Drive Vehicle]. Vladivostok, 2010. 254 p.

8. Ivanov N.A., Myasnikov E.V. Otsenka prokhodimosti trekhkolesnogo vezdekhoda po lesistoy mestnosti [Maneuverability Assessment of Three-Wheeled Landrover in Woodland]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2005, no. 5, pp. 45–53.

9. Terinov N.N., Gerts E.F., Bezgina Yu.N. Malogabaritnyy traktor dlya rubok ukhoda i ego vliyanie na lesnyuyu sredu [Minitractor for Thinning and Its Impact on the Forest Environment]. *Agrarnaya Rossiya* [Agrarian Russia], 2015, no. 7, pp. 27–31.

10. Khaynovskiy V.V., Zen'kevich D.A. Otsenka prokhodimosti i manevrennosti lesnoy dvukhzvennoy pogruzochno-transportnoy mashiny [Evaluation of Cross-Country Ability and Maneuverability of Timber Double-Hinged Load-Haul-Dump Vehicle]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa-2004* [Actual Problems of the Forestry Complex-2004], pp. 214–217.

11. Dummel K., Branz H. Holzernteverfahren: vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Forstwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland. *Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten*. Münster-Hiltrup, 1986, Heft 333. P. 205.

12. Löffler H. *Forstliche Verfahrenstechnik (Holzernte) für Studierende der Forstwissenschaft*. München, 1991. P. 527.

13. Luthy C., Gerz E. Zange oder Seilwinde? *Wald und Holz*, no. 1.15/94, pp. 22–25.

14. Vorliefern mit Bodenseilzug / Forstraktor. Praxishilfe. Zeitaufwand für Holzernteverfahren. Grundlage für Pauschalansätze. *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)*. Bern, 1997. P. 70.

15. Forbrig A. *Waldarbeit im Umbruch: Tagungsführer zur 11. KWF-Tagung*. Koblenz, 1992. P. 132.

Received on January 18, 2017



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.08

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.130

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ  
ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСНОЙ КОРЫ  
В ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРАХ БАРАБАННОГО ТИПА**

*О.Д. Мюллер, д-р техн. наук, доц.*

*В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.*

*Н.Г. Пономарева, асп.*

*Т.В. Тюрикова, магистр*

*М.О. Хрусталева, инж.*

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

Наметившаяся в мировой и отечественной практике тенденция вовлечения древесных отходов как экологичного топлива в теплоэнергетический баланс становится все более актуальной. На предприятиях лесоперерабатывающей промышленности образуются большие объемы древесных отходов, 10...15 % которых приходится на древесную кору. Наиболее перспективным способом использования этого возобновляемого энергетического ресурса является изготовление древесных топливных гранул. Процесс получения древесных гранул из ствольной древесины достаточно хорошо разработан, однако их производство из древесной коры связано с некоторыми техническими трудностями (обезвоживание и измельчение коры, прессование измельченной коры через фильтры цилиндрической матрицы пресс-грануляторов валкового типа). Проведенные исследования показали, что предварительная термическая обработка древесной коры (термомодификация) позволяет решить проблемы ее обезвоживания и механического измельчения до гомогенного состояния для последующего гранулирования. В мировой и отечественной литературе отсутствует теоретически обоснованная математическая модель, описывающая процесс прессования измельченной древесины в пресс-грануляторах валкового типа с цилиндрической матрицей, которая могла бы оптимизировать конструктивные и технико-энергетические параметры прессования. Цель исследования – разработка математической модели процесса прессования термомодифицированной древесной коры, позволяющей определить связь конструктивных параметров прессовочного узла и требуемых качеств древесных гранул с

---

*Для цитирования:* Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Пономарева Н.Г., Тюрикова Т.В., Хрусталева М.О. Математическая модель процесса прессования термомодифицированной древесной коры в пресс-грануляторах барабанного типа // Лесн. журн. 2017. № 2. С.130–148. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.130

энергетическими затратами в пресс-грануляторах валкового типа с цилиндрической матрицей. Рассмотрен технологический процесс прессования шихты из древесной коры в клиновом зазоре между внутренней перфорированной цилиндрической поверхностью матрицы и наружной цилиндрической поверхностью прессовочного ролика, а также проанализированы физические процессы на участках формирования и выталкивания гранулы из фильеры. Получены обоснованная математическая модель процесса прессования шихты из древесной коры через цилиндрическую матрицу и зависимости, связывающие мощность, затрачиваемую на привод пресс-гранулятора, с конструктивными параметрами прессовочного узла и физико-технологическими параметрами шихты из древесной коры.

*Ключевые слова:* термомодифицированная древесная кора, пресс-гранулятор, матрица, фильера, гранулы, давление прессования, математическая модель прессования.

Для производства гранул из термомодифицированной древесной коры (далее кора) используется принцип формования гранул, заключающийся в продавливании сырья из древесной коры при помощи одного или нескольких прижимных валков через перфорированные поверхности. Наибольшее распространение получили пресс-грануляторы (рис. 1) для формования гранул цилиндрическими бегунами с продавливанием массы из древесной коры через поверхность перфорированного барабана вращающимися прижимными роликами (прессы с барабанной матрицей). Перфорации представляют собой цилиндрические фильеры матрицы. Спрессованные гранулы из древесной коры в виде непрерывных цилиндрических стержней выходят из отверстий фильер в матрице и срезаются ножами на фрагменты определенной длины.



Рис. 1. Схема пресс-гранулятора с барабанной матрицей: 1 – прижимные ролики; 2 – перфорированная матрица; 3 – исходная масса из древесной коры; 4 – ножи; 5 – гранулы из древесной коры

После охлаждения гранулы из древесной коры должны обладать высокой теплотворной способностью, высокой насыпной плотностью и низкой истираемостью (массовая доля мелкой фракции, которая образуется при разрушении гранул из древесной коры в процессе их хранения и транспортировки) при минимальном уровне энергозатрат на их производство.

Достижение качественных показателей гранул из термомодифицированной древесной коры во многом зависит от давления прессования, однако с увеличением давления прессования возрастает удельный расход энергии на гранулирование гомогенной массы коры. При этом геометрические параметры и формы матрицы, фильер и роликов существенно влияют на развиваемое давление прессования и расход энергии. В этих условиях невозможно оптимизировать конструктивные и технологические параметры производства гранул из древесной коры без использования полномасштабной математической модели, учитывающей основные процессы, происходящие при прессовании древесных гранул.

Рассмотрим технологический процесс прессования древесной шихты в клиновом зазоре между внутренней перфорированной цилиндрической поверхностью матрицы радиуса  $R_m$  и наружной цилиндрической поверхностью прессовочного ролика радиусом  $R_r$  (рис. 1). Прессовочные ролики расположены на расстоянии  $e$  от оси цилиндрической матрицы. Наружная цилиндрическая поверхность прессовочных роликов с внутренней цилиндрической поверхностью матрицы конструктивно образует зазор толщиной  $\Delta$ . При работе прессовочного узла на внутренней поверхности матрицы образуется коаксиальный ей цилиндрический слой спрессованной шихты из древесной коры толщиной  $\Delta_1 = \Delta + \Delta_{уп}$ . Упругое деформирование  $\Delta_{уп}$  спрессованного слоя из древесной коры может быть определено по следующей зависимости:

$$\Delta_{уп} = \Delta_1 \frac{p_{пр}}{E_{ш}} = (\Delta + \Delta_{уп}) \frac{p_{пр}}{E_{ш}} . \quad (1)$$

Здесь  $p_{пр}$  – давление формования и продавливания через фильеру матрицы гранулы из древесной коры;

$E_{ш}$  – модуль упругости шихты из древесной коры, спрессованной при давлении  $p_{пр}$ .

При запуске в работу пресс-гранулятора во внутреннюю полость цилиндрической матрицы поступает гомогенная шихта из термомодифицированной древесной коры (насыпная плотность  $\rho_0$ ), которая распределяется на внутренней цилиндрической поверхности матрицы некоторым слоем и за счет сил трения приходит во вращение вместе с матрицей. При прохождении шихты из древесной коры через клиновое зазор между прессовочным роликом и матрицей толщина клинового зазора, а следовательно, и толщина слоя шихты из древесной коры уменьшается по мере приближения к вершине клинового зазора, достигая своего минимального значения  $\Delta$ . После прохождения минимального конструктивного зазора  $\Delta$  расстояние между цилиндрическими поверхностями матрицы и прессовочного ролика увеличивается, вследствие чего спрессованный древесный слой упруго расширяется до толщины  $\Delta_1$ , избыточное давление в древесном слое снижается до 0.

При каждом прохождении прессовочного ролика над входным отверстием фильеры матрицы часть уплотненной массы из спрессованного слоя древесной коры под действием давления ролика будет выдавливаться в фильеру матрицы. Выдавленная в фильеру спрессованная масса из древесной коры за счет сил трения и деформационных сил создает противодействие силам давления прессовочного ролика, вследствие чего с каждым новым проходом прессовочного ролика давление прессования и давление проталкивания спрессованной массы из древесной коры, а следовательно, и плотность гранулы из древесной коры увеличиваются. Это будет происходить до тех пор, пока давление прессования в клиновом зазоре и давление формирования и проталкивания готовой гранулы из древесной коры через фильеру не сравняются, после чего наступает стационарный рабочий режим работы пресс-гранулятора.

Из проведенного анализа следует, что при производстве гранул из древесной коры процесс прессования шихты из древесной коры в клиновом зазоре между цилиндрическими поверхностями прессовочного ролика и матрицы можно условно разбить на три последовательных этапа:

1-й – повышение кажущейся плотности шихты из древесной коры (постоянство массы при переменном объеме);

2-й – выпрессовка гранулы из древесной коры (постоянство удельного объема при переменной массе);

3-й – упругое восстановление спрессованного слоя из древесной коры.

*Расчетная схема математической модели процесса прессования  
в клиновом зазоре*

Несмотря на то, что процесс прессования шихты из древесной коры в клиновом зазоре является функцией времени, этапы процесса прессования гранул идут строго друг за другом, при этом каждый из них имеет определенную продолжительность. Скорость вращения прессовочного ролика вокруг своей оси постоянна, поэтому время  $t$  удобно выражать через угол поворота прессовочного ролика  $\alpha$  (угловая скорость вращения ролика  $\omega_1 = \text{const}$ ):

$$t = \frac{\alpha}{\omega_1}. \quad (2)$$

Такая замена позволяет изобразить графически как сам процесс прессования шихты из древесной коры в клиновом зазоре, так и отдельные его этапы. Расчетная схема и поперечный разрез прессовочной камеры представлены на рис. 2.

Этапы прессования показаны на поперечном разрезе прессовочного ролика центральными углами, опирающимися на дуги А–В (1-й этап), В–С (2-й этап) и С–D (3-й этап).

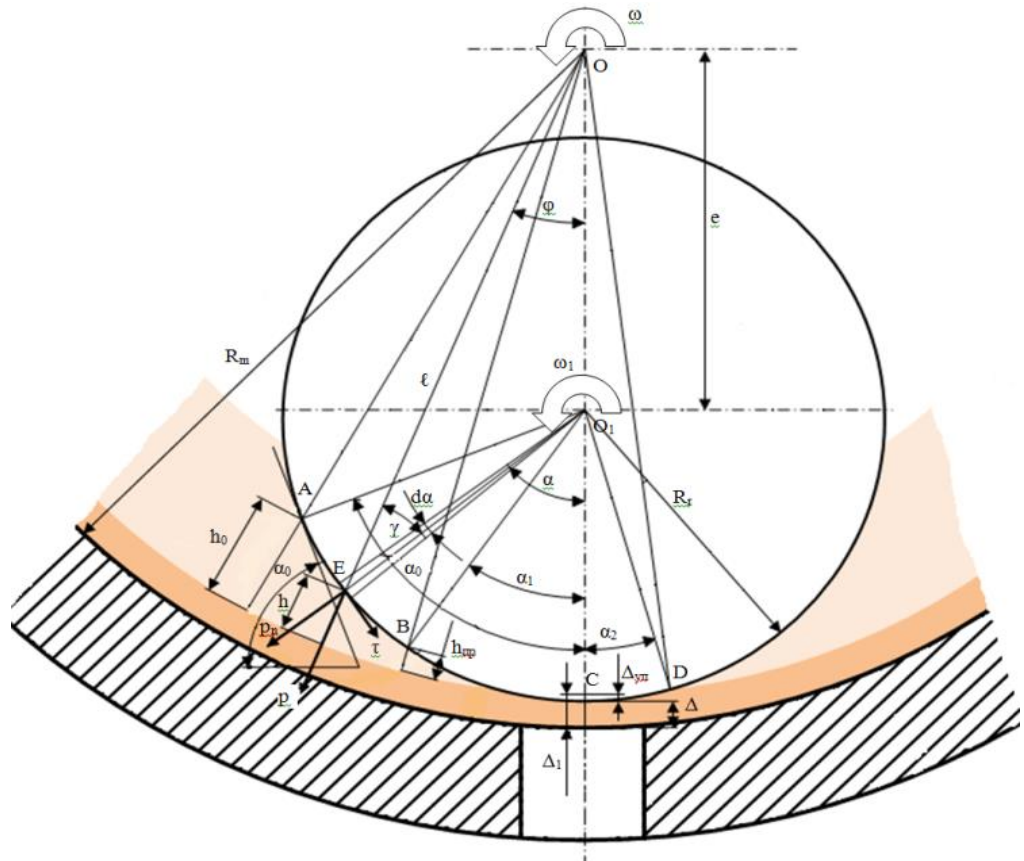


Рис. 2. Схема процесса прессования гранулы из древесной коры

В основу математической модели процесса прессования шихты из древесной коры в клиновом зазоре положен баланс механической энергии вращения цилиндрического прессовочного ролика при движении его по цилиндрической матрице.

*Определение крутящего момента прессовочного ролика на участке А-В прессования шихты из древесной коры*

Выберем на участке А-В от вертикальной оси текущий угол  $\alpha$  и опустим луч  $O_1-E$  (рис. 2). Опишем около луча  $O_1-E$  элементарный центральный угол  $d\alpha$ , опирающийся на цилиндрической поверхности прессовочного ролика на элементарную площадку

$$dS = LR_r d\alpha, \quad (3)$$

где  $L$  – длина прессовочного ролика.



Пусть на этой элементарной площадке действует касательное напряжение  $\tau$ , направленное в сторону вращения прессовочного ролика. Под действием этого напряжения на прессовочном ролике создается элементарный крутящий момент:

$$dM_{s1} = R_r \tau dS = \tau L R_r^2 d\alpha. \quad (4)$$

В точке Е по направлению луча О-Е на шихту из древесной коры со стороны прессовочного ролика нормально к цилиндрической поверхности матрицы действует давление  $p$ , которое можно разложить на нормальное давление  $p_n$  к площадке  $dS$  и касательное напряжение в этой площадке  $\tau$ . Отсюда следует, что

$$\tau = p \sin(\gamma), \quad (5)$$

где  $\gamma$  – угол между лучами О-Е и О<sub>1</sub>-Е.

Применив теорему синусов для треугольника О<sub>1</sub>-Е-О:

$$\frac{R_r}{\sin(\varphi)} = \frac{e}{\sin(\gamma)} = \frac{l}{\sin(\pi - \alpha)}, \quad (6)$$

получим:

$$\tau = p \frac{e}{l} \sin(\alpha), \quad (7)$$

где  $l$  – расстояние от оси цилиндрической матрицы до точки Е на цилиндрической поверхности прессовочного ролика.

Воспользовавшись теоремой косинусов для треугольника О<sub>1</sub>-Е-О, получим:

$$l = \sqrt{R_r^2 + e^2 + 2R_r e \cos(\alpha)} = \sqrt{R_r^2 + e^2 + 2R_r e - 2R_r e + 2R_r e \cos(\alpha)},$$

или

$$l = \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e (1 - \cos(\alpha))}. \quad (8)$$

После подстановки (8) в (7) и (7) в (4) будем иметь:

$$dM_{s1} = p \frac{e L R_r^2}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e (1 - \cos(\alpha))}} \sin(\alpha) d\alpha. \quad (9)$$

Для определения давления  $p$  в шихте древесной коры на участке А-В воспользуемся уравнением (1) уплотняемости шихты из древесной коры:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = a + b \ln \frac{p}{p_0}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность шихты из древесной коры при давлении  $p$ ;

$a$  и  $b$  – коэффициенты;

$p_0$  – атмосферное давление,  $p_0 = 1$ .

Учитывая, что плотность шихты из древесной коры обратно пропорциональна высоте слоя шихты по радиусу цилиндрической матрицы от поверхности прессовочного ролика до уплотненного слоя шихты из древесной коры на поверхности матрицы, имеем:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{h_0}{h}, \quad (11)$$

где  $h_0$  и  $h$  – высота слоя шихты из древесной коры под точками А и Е.

Подставив (11) в (10) и преобразовав, получим выражение для давления:

$$p = p_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \exp \left( \frac{h_0}{bh} \right). \quad (12)$$

Из рис. 2 следует, что высота слоя шихты из древесной коры

$$h = R_m - \Delta - l = R_r + e - \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))}. \quad (13)$$

После подстановки (13) в (12) и (12) в (9) получим:

$$dM_{s1} = p_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \exp \left[ \frac{h_0}{b \left( R_r + e - \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))} \right)} \right] \times \\ \times \frac{eLR_r^2 \sin(\alpha) d\alpha}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))}}. \quad (14)$$

Введем обозначение

$$y = \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))} \quad (15)$$

и продифференцируем его:

$$dy = \frac{-R_r e \sin(\alpha) d\alpha}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))}}. \quad (16)$$

Подставим (15) и (16) в (14):

$$dM_{s1} = -p_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \exp \left[ \frac{h_0}{b(R_r + e - y)} \right] LR_r dy. \quad (17)$$

Введем обозначение и продифференцируем его:

$$x = \frac{h_0}{b(R_r + e - y)}; \quad (18)$$

$$dx = \frac{h_0 dy}{b(R_r + e - y)^2}. \quad (19)$$

С учетом (18) преобразуем уравнение (19):

$$dy = bh_0 \frac{dx}{x^2}. \quad (20)$$

Подставим (18) и (20) в (17):

$$dM_{s1} = -p_0 LR_r bh_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \frac{\exp(x)}{x^2} dx. \quad (21)$$

Момент сопротивления вращения прессовочного ролика на участке А-В

$$M_{s1} = \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} dM_{s1} = -p_0 LR_r bh_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} \frac{e^x}{x^2} dx, \quad (22)$$

где  $\alpha_0$  – угол естественного откоса насыпного слоя шихты из древесной коры.

Решим неопределенный интеграл  $\int \frac{e^x}{x^2} dx$ :

$$\int \frac{e^x}{x^2} dx = \frac{-e^x}{x} + \ln|x| + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n \cdot n!}. \quad (23)$$

Введем обозначение:  $R_r + e = R_0$ . (24)

Тогда

$$x = \frac{h_0}{bR_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha))} \right)}. \quad (25)$$

Давление проталкивания  $p_{пр}$  может быть определено по уравнению (12), если вместо текущей толщины  $h$  спрессованного слоя шихты из древесной коры подставить толщину слоя  $h_{пр}$  в точке В:

$$p_{пр} = p_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \exp \left( \frac{h_0}{bh_{пр}} \right). \quad (26)$$

Отсюда

$$p_0 \exp^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) = p_{пр} \exp^{-1} \left( \frac{h_0}{bh_{пр}} \right). \quad (27)$$

Подставив (25) в (23), а измененные (23) и (27) в (22), после преобразований получим выражение для расчета момента сопротивления вращения прессовочного ролика на участке А-В:

$$\begin{aligned}
 M_{s1} = p_{\text{пп}} L R_r b h_0 \exp^{-1} \left( \frac{h_0}{b h_{\text{пп}}} \right) \times \\
 \times \left\{ \frac{\exp \left( \frac{h_0}{b R_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))} \right)} \right)}{\frac{h_0}{b R_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))} \right)}} - \frac{\exp \left( \frac{h_0}{b R_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_1))} \right)} \right)}{\frac{h_0}{b R_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_1))} \right)}} \right\} + \\
 + \ln \left| \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_1))}} \right| + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot n!} \left( \frac{h_0}{b R_0} \right)^n \times \\
 \times \left\{ \frac{1}{\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))} \right)^n} - \frac{1}{\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_1))} \right)^n} \right\}. \quad (28)
 \end{aligned}$$

При угле  $\alpha_1$  давление толщины спрессованного слоя достигает значения  $h = h_{\text{пп}}$ ,  $p = p_{\text{пп}}$ . Из совместного решения уравнений (10) и (11) следует, что

$$h_{\text{пп}} = \frac{h_0}{a + b \ln \frac{p_{\text{пп}}}{p_0}}. \quad (29)$$

Из рис. 2 и уравнения (13) имеем:

$$h_{\text{пп}} = R_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_1))} \right]. \quad (30)$$

Решая совместно уравнения (29) и (30), получаем:

$$1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_1))} = \frac{h_0}{R_0 \left( a + b \ln \frac{p_{\text{пп}}}{p_0} \right)}. \quad (31)$$

Подставляем выражение (31) в уравнение (28):

$$\begin{aligned}
 M_{s1} = & p_{np} L R_r b h_0 \exp^{-1} \left( \frac{h_0}{b h_{np}} \right) \times \\
 & \times \left\{ \frac{\exp \left( \frac{h_0}{b R_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))} \right)} \right)}{\frac{h_0}{b R_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))} \right)}} - \frac{b \exp \left( \frac{(a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0})}{b} \right)}{(a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0})} \right\} + \\
 & + \ln \left| \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))}}{\frac{h_0}{R_0 (a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0})}} \right| + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot n!} \left( \frac{h_0}{b R_0} \right)^n \times \\
 & \times \left[ \frac{1}{\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))} \right)^n} - \left( \frac{R_0 (a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0})}{h_0} \right)^n \right]. \quad (32)
 \end{aligned}$$

*Определение крутящего момента прессовочного ролика на участке В-С формования и выталкивания гранулы из древесной коры*

При достижении прессовочным роликом точки В давление в выделенном элементарном объеме спрессованной шихты из древесной коры станет достаточным для формирования и выдавливания полученной гранулы через фильеру матрицы. С этого момента при дальнейшем проворачивании прессовочного ролика рост давления в спрессованном элементарном объеме прекратится и начнется выдавливание части массы шихты, спрессованной из древесной коры, из элементарного объема в цилиндрический канал фильеры матрицы. Это процесс будет происходить до тех пор, пока элементарный объем не переместится в точку С.

Запишем выражение для определения элементарного крутящего момента прессовочного ролика на участке В-С после подстановки в уравнение (9) давления проталкивания  $p_{np}$  вместо текущего давления  $p$ :

$$dM_{s2} = p_{np} \frac{e L R_r^2}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2 R_r e (1 - \cos(\alpha))}} \sin(\alpha) d\alpha. \quad (33)$$

Момент сопротивления вращения прессовочного ролика на участке В-С:

$$M_{s2} = \int_{\alpha_1}^0 d M_{s2} = p_{np} e L R_r^2 \int_{\alpha_1}^0 \frac{\sin(\alpha) d\alpha}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2 R_r e (1 - \cos(\alpha))}}. \quad (34)$$

Введем обозначение и продифференцируем его:

$$y = \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_re(1 - \cos(\alpha))}; \quad (35)$$

$$dy = \frac{-R_re \sin(\alpha) d\alpha}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_re(1 - \cos(\alpha))}}. \quad (36)$$

Отсюда

$$\frac{\sin(\alpha) d\alpha}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_re(1 - \cos(\alpha))}} = \frac{-dy}{R_re}. \quad (37)$$

Подставим (37) в (34):

$$M_{s2} = -p_{пп}LR_r \int_{\alpha_1}^0 dy. \quad (38)$$

После интегрирования и подстановки (35) имеем:

$$M_{s2} = p_{пп}LR_r \left[ R_r + e - \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_re(1 - \cos(\alpha_1))} \right]. \quad (39)$$

После подстановки (24) и упрощения:

$$M_{s2} = p_{пп}LR_rR_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2R_re}{R_0^2}(1 - \cos(\alpha_1))} \right]. \quad (40)$$

Это же выражение, но с учетом (35):

$$M_{s2} = p_{пп}LR_r \frac{h_0}{\left( \alpha + b \ln \frac{p_{пп}}{p_0} \right)}. \quad (41)$$

*Определение крутящего момента прессовочного ролика на участке C-D упругого восстановления слоя, спрессованного из древесной коры*

Элементарный крутящий момент прессовочного ролика на участке упругого восстановления

$$dM_{s3} = -p \frac{eLR_r^2}{\sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_re(1 - \cos(\alpha))}} \sin(\alpha) d\alpha. \quad (42)$$

Для нахождения давления на элементарную площадку со стороны упругорасширяющегося слоя спрессованной шихты из древесной коры воспользуемся уравнением (1), решая которое относительно толщины спрессованного слоя  $\Delta_1$ , получим:

$$\Delta_1 = \Delta \frac{E_{ш}}{E_{ш} - p_{пп}}. \quad (43)$$

Определим местную упругую деформацию спрессованной шихты из древесной коры:

$$h = \Delta \frac{p_{\text{пр}}}{E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}} - \left( R_0 - \sqrt{R_0^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))} \right). \quad (44)$$

Согласно закону Гука упругое давление спрессованного слоя из древесной коры на прессовочный ролик

$$p = \frac{h}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}), \quad (45)$$

или с учетом (44):

$$p = p_{\text{пр}} - \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))}}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}). \quad (46)$$

Элементарный крутящий момент прессовочного ролика на участке упругого восстановления с учетом (46):

$$dM_{s3} = - \left[ p_{\text{пр}} \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))}}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \right] \times \\ \times \frac{eLR_r^2}{\sqrt{R_0^2 - 2R_r e(1 - \cos(\alpha))}} \sin(\alpha) d\alpha. \quad (47)$$

Используя уравнения (35) и (37), получаем:

$$dM_{s3} = \left[ p_{\text{пр}} - \frac{R_0}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) + \frac{y}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \right] LR_r dy; \quad (48)$$

$$M_{s3} = \left( p_{\text{пр}} - \frac{R_0}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \right) LR_r \int_0^{\alpha_2} dy + \frac{1}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) LR_r \int_0^{\alpha_2} y dy, \quad (49)$$

или

$$M_{s3} = LR_r \left[ \left( p_{\text{пр}} - \frac{R_0}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \right) y + (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \frac{y^2}{2\Delta} \right]_0^{\alpha_2}. \quad (50)$$

После подстановки (35) и упрощения имеем:

$$M_{s3} = LR_r R_0 \left\{ \left( p_{\text{пр}} - \frac{R_0}{\Delta} (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \right) \left[ \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_2))} - 1 \right] - \right. \\ \left. - (E_{\text{ш}} - p_{\text{пр}}) \frac{R_r e}{R_0 \Delta} (1 - \cos(\alpha_2)) \right\}. \quad (51)$$

Из рис. 2 следует, что

$$\cos(\alpha_2) = \frac{R_r - \Delta_{\text{уп}}}{R_r}, \quad (52)$$

отсюда

$$1 - \cos(\alpha_2) = \frac{\Delta_{уп}}{R_r}. \quad (53)$$

Из уравнения (1)

$$\Delta_{уп} = \Delta \frac{p_{пп}}{E_{ш} - p_{пп}}. \quad (54)$$

После подстановки (54) в (53) и (53) в (51) получаем:

$$M_{S3} = LR_r R_0 \times \left\{ \left( p_{пп} - \frac{R_0}{\Delta} (E_{ш} - p_{пп}) \right) \left[ \sqrt{1 - \frac{2\Delta e}{R_0^2} \frac{p_{пп}}{(E_{ш} - p_{пп})}} - 1 \right] - p_{пп} \frac{e}{R_0} \right\}. \quad (55)$$

*Определение мощности на привод одного прессовочного ролика*

Суммарный момент, затрачиваемый на приведение во вращение одного прессовочного ролика при прессовании шихты из древесной коры, формирование из нее древесной гранулы и выдавливание ее через цилиндрический канал фильеры матрицы, будет равен сумме моментов на участках А-В, В-С и С-D:

$$M_1 = M_{S1} + M_{S2} + M_{S3}, \quad (56)$$

или с учетом зависимостей (32), (43) и (55):

$$M_1 = p_{пп} LR_r \times \left\{ \frac{bh_0}{\exp\left(\frac{h_0}{bh_{пп}}\right)} \left[ \frac{\exp\left(\frac{h_0}{bR_0\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2}(1 - \cos(\alpha_0))}\right)}\right)}{bR_0\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2}(1 - \cos(\alpha_0))}\right)} - \frac{b \exp\left(\frac{a}{b} + \ln \frac{p_{пп}}{p_0}\right)}{a + b \ln \frac{p_{пп}}{p_0}} \right] + \ln \left| \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2}(1 - \cos(\alpha_0))}}{\frac{h_0}{R_0(a + b \ln \frac{p_{пп}}{p_0})}} \right| + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot n!} \left(\frac{h_0}{bR_0}\right)^n \times \left[ \frac{1}{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2}(1 - \cos(\alpha_0))}\right)^n} - \left(\frac{R_0(a + b \ln \frac{p_{пп}}{p_0})}{h_0}\right)^n \right] \right\} +$$



$$+ \frac{h_0}{\left(a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0}\right)} + R_0 \left[ \left( 1 - \frac{R_0}{\Delta} \left( \frac{E_{ш}}{p_{np}} - 1 \right) \right) \left( \sqrt{1 - \frac{2\Delta e}{R_0^2} \frac{1}{\left(\frac{E_{ш}}{p_{np}} - 1\right)} - 1} \right) - \frac{e}{R_0} \right] \quad (57)$$

Мощность, затрачиваемую на привод одного прессовочного ролика, определим как

$$N_1 = \omega_1 M_1. \quad (58)$$

Если число прессовочных роликов равно  $z$ , то мощность привода прессовочного узла пресс-гранулятора

$$N = z\omega_1 M_1, \quad (59)$$

или с учетом (57):

$$N = z\omega_1 p_{np} L R_r \times \left\{ \frac{b h_0}{\exp\left(\frac{h_0}{b h_{np}}\right)} \left[ \frac{\exp\left(\frac{h_0}{b R_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))}\right)}\right)}{\frac{h_0}{b R_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))}\right)}} - \frac{b \exp\left(\frac{a}{b} + \ln \frac{p_{np}}{p_0}\right)}{a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0}} \right] + \ln \left| \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))}}{\frac{h_0}{R_0 \left(a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0}\right)}} \right| + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot n!} \left(\frac{h_0}{b R_0}\right)^n \times \left[ \frac{1}{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_r e}{R_0^2} (1 - \cos(\alpha_0))}\right)^n} - \left(\frac{R_0 \left(a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0}\right)}{h_0}\right)^n \right] + \frac{h_0}{\left(a + b \ln \frac{p_{np}}{p_0}\right)} + R_0 \left( 1 - \frac{R_0}{\Delta} \left( \frac{E_{ш}}{p_{np}} - 1 \right) \right) \left( \sqrt{1 - \frac{2\Delta e}{R_0^2} \frac{1}{\left(\frac{E_{ш}}{p_{np}} - 1\right)} - 1} \right) - \frac{e}{R_0} \right] \quad (60)$$

Входящую в уравнение толщину  $h_0$  насыпного слоя шихты из древесной коры в начале уплотнения определим по уравнению (13), подставив вместо  $\alpha$  угол естественного откоса  $\alpha_0$ :

$$h_0 = R_r + e - \sqrt{(R_r + e)^2 - 2R_r e (1 - \cos(\alpha_0))}. \quad (61)$$

*Определение производительности прессовочного ролика*

При прохождении прессовочного ролика насыпной слой шихты из древесной коры толщиной  $h_0$  и плотностью  $\rho_0$  уплотняется и вдавливается в фильеры. За один оборот прессовочного ролика объем насыпного слоя шихты из древесной коры

$$V_{об} = L \frac{\pi}{4} [(R_0 - \Delta_{уп})^2 - (R_0 - \Delta_{уп} - h_0)^2]. \quad (62)$$

При угловой скорости вращения прессовочного ролика  $\omega_1$  угловая скорость вращения матрицы

$$\omega = \omega_1 \frac{R_r}{R_r + e}. \quad (63)$$

Секундная объемная производительность одного прессовочного ролика

$$V_1 = V_{об} \frac{\omega_1}{2\pi} \frac{R_r}{(R_r + e)}, \quad (64)$$

или с учетом (62), (24) и (54):

$$V_1 = \frac{\omega_1}{4} L R_r h_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{(R_r + e)} \frac{p_{пр}}{E_{ш} - p_{пр}} - \frac{h_0}{2(R_r + e)} \right]. \quad (65)$$

При  $z$  прессовочных роликах полная объемная производительность пресс-гранулятора

$$V = z \frac{\omega_1}{4} L R_r h_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{(R_r + e)} \frac{p_{пр}}{E_{ш} - p_{пр}} - \frac{h_0}{2(R_r + e)} \right], \quad (66)$$

массовая производительность

$$G = z \frac{\omega_1}{4} L R_r h_0 \rho_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{(R_r + e)} \frac{p_{пр}}{E_{ш} - p_{пр}} - \frac{h_0}{2(R_r + e)} \right]. \quad (67)$$

*Выводы*

1. Полученная математическая модель связывает конструктивные и технологические параметры прессового оборудования не только с физическими параметрами исходного и спрессованного термомодифицированного древесного сырья, но и с давлением прессования готовых древесных топливных гранул. Ее применение позволит оптимизировать энергетические затраты на производство качественных древесных топливных гранул.

2. Анализ полученной математической модели процесса прессования показывает, что на качественные показатели гранул существенное влияние оказывают следующие физические параметры древесной шихты из термомодифицированной древесной коры:  $\alpha_0$  – угол естественного откоса исходной шихты;  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнения уплотняемости исходной шихты;

$E_{ш}$  – модуль упругости шихты, спрессованной до давления  $p_{пр}$ . Указанные параметры подлежат дополнительному изучению в процессе дальнейших исследований исходного древесного сырья.

3. Наибольшее влияние на основные параметры работы пресс-гранулятора оказывает давление формования и проталкивания через фильеру матрицы ( $p_{пр}$ ) гранулы из древесной коры. Величина давления проталкивания  $p_{пр}$  зависит от показателей физико-механических свойств шихты, спрессованной из древесной коры, геометрических размеров формы входа в фильеру матрицы и длины фильеры.

4. Для подтверждения корректности разработанной математической модели необходимы дальнейшие экспериментальные исследования процесса прессования гранул из термомодифицированной березовой коры с определением давления их проталкивания через цилиндрическую фильеру.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А.С. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 15 с.
2. Ильюшенко Д.А. Разработка технологии производства брикетов из отходов окорки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 19 с.
3. Коршаков А.В. Обоснование технологии производства древесных брикетов на прессовом оборудовании ударного типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 20 с.
4. Левин А.Б. Биоэнергетика – важнейшее средство повышения энергоэффективности лесного комплекса России // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 8(91). С. 160–165.
5. Модин Н.А., Ерошкин А.Н. Брикетирование измельченной древесины и древесной коры. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 112 с.
6. Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Любов В.К., Герасимчук Д.Л., Попов А.Н. Влияние технологических параметров прессования на относительную плотность топливных древесных гранул // Лесн. журн. 2013. № 1. С. 116–121. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Любов В.К., Тюрикова Т.В. Математическая модель процесса формирования древесных гранул // Лесн. журн. 2015. № 2(344). С. 104–122. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1982. 264 с.
9. Чуваева А.И., Божко И.В. Использование биотоплива с точки зрения утилизации отходов лесопильного производства // Акт. пробл. лесн. комплекса. 2007. № 18. С. 156–159.
10. Ciolkosz D., Wallace R. A Review of Torrefaction for Bioenergy Feedstock Production // Biofuels, Bioproducts, and Biorefining. 2011. No. 5(3). Pp. 317–329. doi:10.1002/bbb.275.

11. Holm J.K., Henriksen U.B., Hustad J.E., and Sorensen L.H. Toward an Understanding of Controlling Parameters in Softwood and Hardwood Pellets Production // *Energy and Fuels*. 2006. No. 20(6). Pp. 2686–2694.
12. Kaliyan N., Vance Morey R. Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products // *Biomass and Bioenergy*. 2009. No. 33(3). Pp. 337–359.
13. Krizan P., Matus M., Beniak J., Kovacova M. Stabilization Time as an Important Parameter after Densification of Solid Biofuels // *Acta Polytechnica*. 2014. No. 54(1). Pp. 35–41. doi: 10.14311/AP.2014.54.0035.
14. Krizan P., Matus M., Soos L., Kers J., Peetsalu P., Kask Ü., Menind A. Briquetting of Municipal Solid Waste by Different Technologies in Order to Evaluate Its Quality and Properties // *Agronomy Research*. 2011. No. 9(1). Pp. 115–123.
15. Krizan P., Soos L., Vukelic Dj. Counter Pressure Effecting on Compacted Briquette in Pressing Chamber // *Journal of Production Engineering*. 2009. Vol. 12. No. 1. Pp. 63–66.
16. Rhen C., Ohman M., Gref R., Wasterlund I. Effect of Raw Material Composition in Woody Biomass Pellets on Combustion Characteristics // *Biomass and Bioenergy*. 2007. No. 31. Pp. 66–72.

Поступила 23.12.16

UDC 674.08

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.130

### **Mathematical Model of the Pressing Process of Thermally-Modified Tree Bark in the Drum-Type Press-Granulators**

*O.D. Myuller, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor*

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

*N.G. Ponomareva, Postgraduate Student*

*T.V. Tyurikova, Master*

*M.O. Khrustaleva, Engineer*

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

The involving tendency of wood waste as an environmentally friendly fuel in heat and power balance, emerging in the world and domestic practices, is becoming increasingly important. The timber industry enterprises produce large amounts of waste wood, 10...15 % of which is the tree bark. The most promising method of the use of this renewable energy resource is the wood pellets production. The process of pellets obtaining from stem wood is well developed, but their production from bark involves some technical difficulties (dehydration and bark disintegration, ground bark pressing through the cylindrical matrix nozzles of the roll-type press-granulators). The initial heat treatment of bark (thermal modification)

---

*For citation:* Myuller O.D., Melekhov V.I., Ponomareva N.G., Tyurikova T.V., Khrustaleva M.O. Mathematical Model of the Pressing Process of Thermally-Modified Tree Bark in the Drum-Type Press-Granulators. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.130–148. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.130

solves the problems of its dehydration and mechanical disintegration to the constant consistency for further granulation. The theoretically grounded mathematical model describing the pressing process of disintegrating wood in the roll-type press-granulators with a cylindrical matrix, which could optimize the design and technical and energy pressing parameters, is not developed in the world and national literature. The goal of research is to develop a mathematical model of the pressing process of thermally-modified tree bark, which would allow determining the connection of design parameters of a pressing component and the required qualities of wood pellets with the energy consumption in the roll-type press-granulators with a cylindrical matrix. The technological pressing process from bark in the convergent film between the inner perforated cylindrical surface of a matrix and the outer cylindrical surface of a pressing roller is considered; the physical processes in the areas of pellet forming and ejecting from a nozzle are analyzed. We obtained a reasonable mathematical model of the charge pressing process from bark through a cylindrical matrix as well as the dependencies connecting the energy expended to drive the press-granulator with the design parameters of a pressing component and the charge physical and technological parameters from bark.

*Keywords:* thermally-modified tree bark, press-granulator, matrix, nozzle, granule, compacting pressure, mathematical pressing model.

#### REFERENCES

1. Bulatov A.S. *Razrabotka protsessa pressovogo granulirovaniya melkodispersnykh sred na primere mineral'nykh poroshkov i drevesnykh otkhodov*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [The Process Development of Press Granulation of Fine Media by the Example of Mineral Powders and Wood Waste: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Moscow, 2012. 15 p.
2. Il'yushenko D.A. *Razrabotka tekhnologii proizvodstva briкетов iz otkhodov okorki*: aftoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [The Development of Briquettes Production Technology from Bark Residue: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Saint Petersburg, 2012. 19 p.
3. Korshak A.V. *Obosnovanie tekhnologii proizvodstva drevesnykh briкетов na pressovom oborudovanii udarnogo tipa*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Substantiation of Wood Briquettes Production Technology at the Impact Pressure Equipment: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Saint Petersburg, 2011. 20 p.
4. Levin A.B. Bioenergetika – vazhneyshee sredstvo povysheniya energoeffektivnosti lesnogo kompleksa Rossii [Bioenergy - Important Means of Increasing Energy Efficiency of Forest Complex of Russia]. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 8(91), pp. 160–165.
5. Modin N.A., Eroshkin A.N. *Briketirovanie izmel'chennoy drevesiny i drevesnoy kory* [Briquetting of Chopped Wood and Bark]. Moscow, 1971. 112 p.
6. Myuller O.D., Melekhov V.I., Lyubov V.K., Gerasimchuk D.L., Popov A.N. *Vliyaniye tekhnologicheskikh parametrov pressovaniya na odnositel'nuyu plotnost' toplivnykh drevesnykh granul* [Dependence of Compacting Technological Parameters on Relative Density of Wood Fuel Pellets]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2013, no. 1, pp. 116–121.
7. Myuller O.D., Melekhov V.I., Lyubov V.K., Tyurikova T.V. *Matematicheskaya model' protsessa formirovaniya drevesnykh granul* [Mathematical Model of Wood Granules Formation]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2015, no. 2, pp. 104–122.
8. Samul' V.I. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity]. Moscow, 1982. 264 p.

9. Chuvaeva A.I., Bozhko I.V. Ispol'zovanie biotopliva s tochki zreniya utilizatsii otkhodov lesopil'nogo proizvodstva [The Use of Biofuels in Terms of Sawmill Residues Utilization]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2007, no. 18, pp. 156–159.
10. Ciolkosz D., Wallace R. A Review of Torrefaction for Bioenergy Feedstock Production. *Biofuels, Bioproducts, and Biorefining*, 2011, no. 5(3), pp. 317–329. doi:10.1002/bbb.275.
11. Holm J.K., Henriksen U.B., Hustad J.E., and Sorensen L.H. Toward an Understanding of Controlling Parameters in Softwood and Hardwood Pellets Production. *Energy and Fuels*, 2006, 20(6), pp. 2686–2694.
12. Kaliyan N., Vance Morey R. Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Biomass and Bioenergy*, 2009, no. 33(3), pp. 337–359.
13. Krizan P., Matus M., Beniak J., Kovacova M. Stabilization Time as an Important Parameter after Densification of Solid Biofuels. *Acta Polytechnica*, 2014, no. 54(1), pp. 35–41. doi: 10.14311/AP.2014.54.0035.
14. Krizan P., Matus M., Soos L., Kers J., Peetsalu P., Kask Ü., Menind A. Briquetting of Municipal Solid Waste by Different Technologies in Order to Evaluate Its Quality and Properties. *Agronomy Research*, 2011, no. 9(1), pp. 115–123.
15. Krizan P., Soos L., Vukelic Dj. Counter Pressure Effecting on Compacted Briquette in Pressing Chamber. *Journal of Production Engineering*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 63–66.
16. Rhen C., Ohman M., Gref R., Wasterlund I. Effect of Raw Material Composition in Woody Biomass Pellets on Combustion Characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 2007, no. 31, pp. 66–72.

Received on December 23, 2016

УДК 674.05

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.149

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ И ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НОЖА НА СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**

*Э.О. Булатасов, асп.*

*В.П. Попов, канд. техн. наук, доц.*

*В.П. Ханин, канд. техн. наук, доц.*

Оренбургский государственный университет, пр. Победы, д. 13, г. Оренбург, Россия, 460018; e-mail: Eduard190319@mail.ru

Рациональное использование древесных отходов является одной из важнейших задач комплексной переработки древесного сырья. Для применения разноразмерных древесных отходов в производствах древесно-цементных материалов и твердого биотоплива необходимо их измельчать на специальных стружечных станках. При этом требования, предъявляемые к качеству измельченной древесины для указанных производств, ограничиваются в основном размерами древесных частиц и содержанием примесей, что позволяет оценивать эффективность работы режущих элементов при измельчении всего объема древесины в стружки требуемых размеров только величиной силы резания или ее производных. В большинстве случаев при резании древесины передний угол режущего инструмента конструктивно является величиной постоянной (по длине режущей кромки), а режущая кромка может иметь прямую, с наклоном, треугольную или радиусную форму. Качественные показатели процесса кругового резания режущим инструментом с перечисленными выше формами получены при обработке древесных материалов дисковыми пилами с твердосплавными пластинами. Силовые показатели процесса резания (с идентичными условиями) как древесины, так и древесных материалов немногочисленны, а с использованием режущего инструмента, имеющего ступенчатую форму режущей кромки и передней поверхности, а также несколько углов резания, практически отсутствуют. Настоящее исследование направлено на нахождение оптимальных параметров режущего инструмента (ножа), обеспечивающих наименьшие затраты энергии при первичном измельчении древесины фрезерованием. Экспериментальные исследования проводили на специальной установке, позволяющей моделировать процесс измельчения древесины фрезерованием. Применяли пять типов ножей, имеющих различные геометрические формы режущих кромок и передних поверхностей. Эффективность работы различных типов ножей оценивали величиной крутящего момента. В результате проведенного сравнительного анализа всех форм режущих элементов определена наиболее эффективная форма ножа, установлена зависимость крутящего момента от подачи на нож при статическом резании древесины сосны для трех главных направлений резания.

---

*Для цитирования:* Булатасов Э.О., Попов В.П., Ханин В.П. Влияние формы режущей кромки и передней поверхности ножа на силовые показатели измельчения древесины // Лесн. журн. 2017. № 2. С.149–159. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.149

*Ключевые слова:* измельчение древесины фрезерованием, оптимальная форма ножа, экспериментальная установка, крутящий момент, подача на нож, силовые показатели измельчения древесины.

### *Введение*

Проблема комплексного использования древесины была и остается одной из наиболее актуальных для отраслей, занимающихся заготовкой, первичной обработкой и переработкой древесины [7]. До настоящего времени во всей России полезно не используется половина, а отдельно по Сибири – до двух третей биомассы дерева [11]. Расчетная лесосека, достигающая в целом по стране 550 млн м<sup>3</sup>/год, используется в среднем только на 35 % [3].

Производство практически всех технологических операций при лесозаготовках, обработке или переработке древесины связано с образованием древесных отходов, являющихся вторичными древесными ресурсами. Из них или с их добавками можно производить новую продукцию [12]. Древесные отходы бывают кусковыми (твердыми) и мягкими (опилки, стружка, пыль) [4]. Использование древесных отходов во многом зависит от вида и места их образования [12].

К отходам относят лесосечные отходы (сучья, ветки, пни, крона, тонкомерная неликвидная древесина, обломки деревьев и стволов и др.), их объем составляет 22...26 % [4]. На деревообрабатывающих предприятиях – это горбыли, рейки, откомлевки, обрезки, опилки, стружка, их объем – 25 % и выше [4]. На фанерных – это карандаши, шпон-рванина, обрезки бревен, кора, опилки, обрезки фанеры, пыль и др., их объем 50...55 % [4]. Отходы тарного производства достигают 32 %, паркетного – 60 % [4]. Кусковые отходы лесопиления в нашей стране перерабатывают в основном в технологическую щепу [10], для этого применяют дисковые и барабанные рубительные машины [2].

Рациональный процесс первичного измельчения древесины определяется минимальным энергопотреблением и хорошим качеством среза, обеспечивающим заданные размеры частиц древесины [8].

С уменьшением толщины срезаемой стружки удельная работа резания (работа, затрачиваемая на превращение в стружку единицы объема древесины) увеличивается в связи с тем, что для разделения какого-либо объема древесины на мелкие частицы требуется затратить больше работы, чем при делении на более крупные. Таким образом, с точки зрения уменьшения расхода энергии на резание при необходимости превратить в стружки определенный объем древесины более выгодно срезать толстые стружки, помня, что качество обрабатываемой поверхности при этом ухудшается [6].

В некоторых производствах (например, древесно-цементных материалов – ГОСТ Р 54854–2011, гидролизном – ГОСТ 18320–78, твердого биотоплива – ГОСТ Р 54220–2010 и ГОСТ Р 55553–2013, полимерных композиционных материалов – ГОСТ 16361–87) требования к качеству измельченной древесины ограничиваются в основном размерами древесных частиц и содержанием примесей.



В целях уменьшения расхода энергии на резание при первичном измельчении древесины для перечисленных выше производств необходимо измельчать древесину в стружки большой толщины, и силовые показатели процесса измельчения в этом случае являются основными.

В качестве оборудования для измельчения древесины резанием применяют специальные стружечные станки, которые отличаются конструкцией режущего механизма и питателя, назначением и видом перерабатываемого сырья [5]. Стружечные станки по конструкции режущего механизма бывают следующих типов: чашеобразные, фрезерные, дисковые, барабанные, роторные [1]. Механизм резания стружечных станков оснащен режущими инструментами в виде ножей, резцов, зубьев, нахождение оптимальных параметров которых является предметом научных исследований.

Цель настоящего исследования – определение оптимальной формы режущего инструмента (ножа) в зависимости от геометрической формы его режущей кромки и передней поверхности при первичном измельчении древесины фрезерованием в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях с получением стружек требуемых размеров.

#### *Объекты и методы исследования*

Для проведения исследования разработана конструкция экспериментальной установки (рис. 1), позволяющей моделировать процесс измельчения древесины фрезерованием.

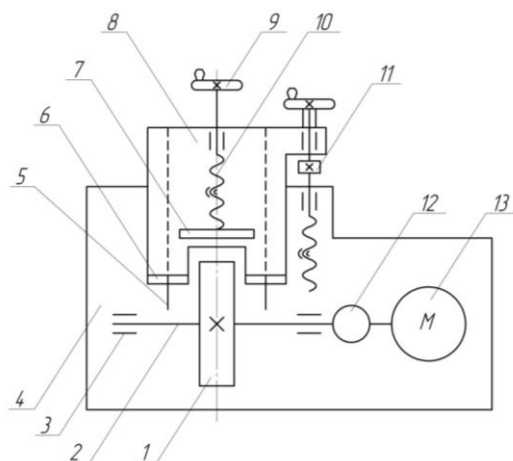


Рис. 1. Кинематическая схема экспериментальной установки: 1 – диск с ножами; 2 – вал; 3 – подшипниковый узел; 4 – станина; 5 – направляющая опора; 6 – упорная пластина; 7 – прижимная плита; 8 – салазки; 9 – маховичок; 10 – винт с гайкой; 11 – диск; 12 – динамометрическое устройство; 13 – электродвигатель

Установка включает силовой и измерительный модули, а также механизм подачи, конструктивно выполненные на одной станине. Силовой модуль состоит из вала круглого сечения, смонтированного на подшипниковых опорах. На валу с помощью шпоночного соединения закреплен диск, параметры которого подобраны в зависимости от условий резания. В данном эксперименте использовали диск диаметром 132 мм и шириной 12 мм. По образующей диска имеются два симметрично расположенных паза, в которые устанавливаются ножи. Диаметр диска с установленными ножами равен 156 мм. Для исключения вылета ножей и более жесткого закрепления их в пазах предусмотрен зажим по задней части ножа. Все ножи отличаются друг от друга геометрическими формами режущей кромки и передней поверхности, имеют ширину 12 мм и выступ над поверхностью диска 12 мм (рис. 2).

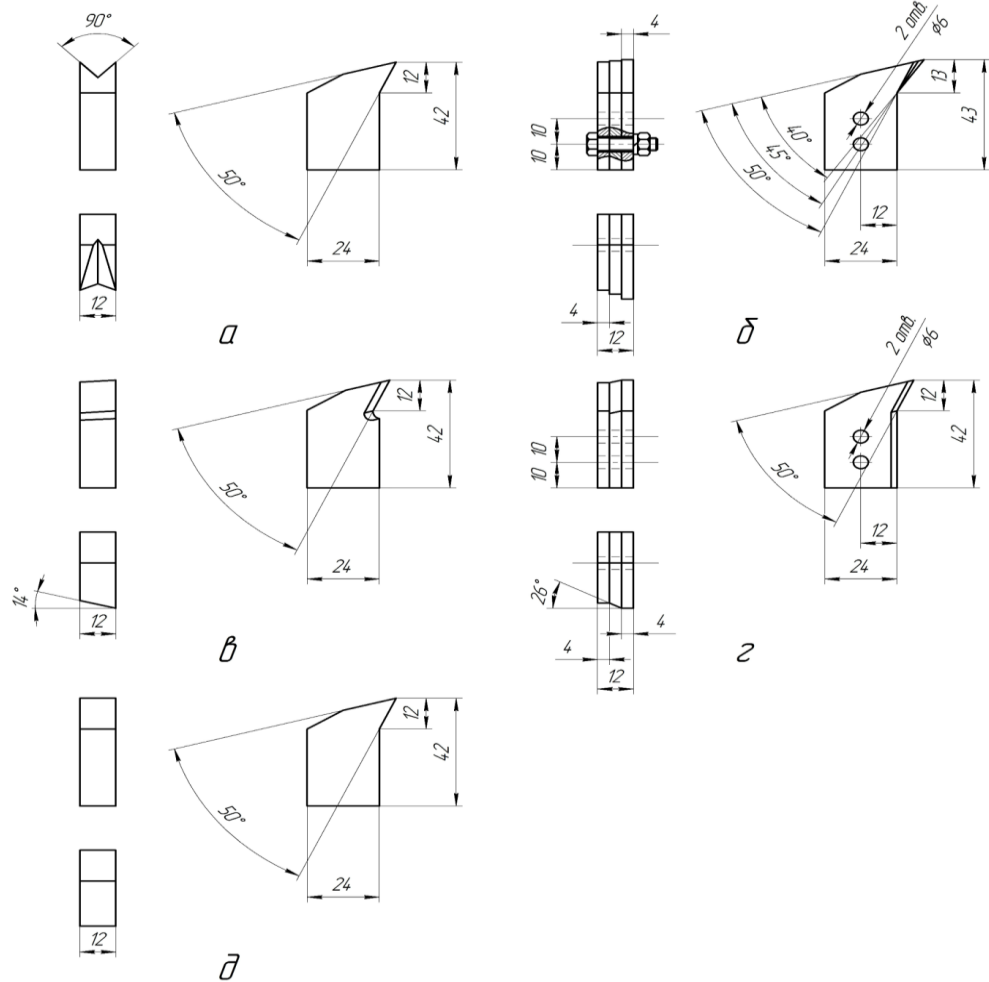


Рис. 2. Конструкции ножей: а – нож № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4; д – № 5

Измерительный модуль установки (см. рис. 1) позволяет регулировать крутящий момент в зависимости от силы резания, возникающей на режущей кромке ножа. В качестве датчика крутящего момента применено динамометрическое устройство. Механизм подачи типа «салазки» перемещается по направляющим опорам перпендикулярно оси вращения режущего инструмента. На салазках имеются прижимное устройство и упорные пластины, между которыми зажимается заготовка. Подача осуществляется вращением маховичка, закрепленного на ходовом винте, гайка которого закреплена на станине, сам винт соединен с салазками. Привод установки предусмотрен статическим или динамическим.

Исследования проводили при следующих условиях: резание статическое; диаметр окружности резания  $d = 156$  мм; ширина резания 12 мм; задний угол  $\alpha = 15^\circ$ ; углы резания  $\delta = 65^\circ$  (для ножей № 1, 3–5) и  $\delta = 55, 60, 65^\circ$  (для ножа № 2); ножи острые; материал ножей – легированная рессорно-пружинная сталь 60С2Г (ГОСТ 14959–79); подача на нож  $S_z = 1 \dots 12$  мм; порода древесины – сосна (плотность  $\rho_{12} = 0,40$  г/см<sup>3</sup>); влажность древесины  $W = 18$  %. Нож № 1 имеет радиусную форму режущей кромки и прямолинейную переднюю поверхность. Нож № 2 отличается ступенчатой режущей кромкой и ступенчатой передней поверхностью (всего три ступени). Угол резания первой ступени  $\delta = 55^\circ$ , второй –  $60^\circ$ , третьей –  $65^\circ$ . Нож № 3 имеет односторонний наклон режущей кромки (угол косой заточки  $\omega = 14^\circ$ ) и односторонний наклон передней поверхности. Для ножа № 4, как и для ножа № 2, характерна трехступенчатая форма режущей кромки и передней поверхности, только угол резания для всех трех ступеней одинаков  $\delta = 65^\circ$ , вторая ступень имеет односторонний наклон передней поверхности (угол косой заточки  $\omega = 26^\circ$ ), являясь плавным переходом между первой и третьей ступенями. Нож № 5 имеет прямую режущую кромку и прямолинейную переднюю поверхность. Классификация форм ножей принята в соответствии с [9, 13].

Резание проводили путем приложения крутящего момента к рабочему валу. При этом измеряли крутящий момент в зависимости от подачи на нож.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В результате исследований установлено следующее.

При резании древесины вдоль волокон получались стружки изогнутой формы, при резании древесины поперек волокон на малых подачах – короткие и ломкие стружки, состоящие из отдельных элементов, слабо связанных между собой, на больших подачах – элементные стружки, но более прочно связанные между собой. Иногда в процессе срезания стружки большой толщины в поперечном направлении происходило раскалывание заготовки вдоль волокон. При резании древесины в торец получались частично не рассыпавшиеся стружки.

При резании древесины ножом (№ 5) с прямолинейной режущей кромкой и прямолинейной передней поверхностью удавалось срезать стружки: вдоль волокон – при подаче  $S_z = 12$  мм, в торец – при  $S_z = 8$  мм, поперек волокон – при  $S_z = 7$  мм. В редких случаях удавалось срезать стружки большей толщины, так как при подаче выше указанных значений происходило заклинивание ножа в древесине.

При резании древесины ножом № 5 на малых подачах толщина образуемой стружки была соизмерима с величиной подачи. При резании древесины вдоль волокон при  $S_z = 12$  мм образовывалась стружка средней толщины – 9 мм (справедливо для всех ножей). Это объясняется тем, что срезаемая стружка деформировалась передней гранью ножа и сдавливанием между корпусом режущего инструмента и заготовкой. При срезании стружек большой толщины (при  $S_z = 12$  мм) вдоль волокон различными ножами их объем был примерно одинаков.

Полученные экспериментальные данные позволили установить связь между крутящим моментом  $M$  и подачей на нож  $S_z$  и построить графики этой зависимости для трех главных случаев резания (рис. 3).

Анализ полученных результатов выявил общее повышение крутящего момента в случае увеличения подачи на нож при статическом резании древесины для всех применяемых режущих элементов, что согласуется с данными [14–16].

При срезании стружек толщиной 7 и 8 мм ножом (№ 5) с прямолинейной режущей кромкой и прямолинейной передней поверхностью для рассматриваемых трех основных направлений резания установлено, что наибольший крутящий момент образуется при резании поперек волокон. Он превышает крутящий момент для торцового и продольного резания соответственно в 1,1 и 1,3 раза.

Сравнительный анализ выявил, что схожие силовые показатели имеют ножи № 2 и 3, а также № 4 и 5. Форма ножа № 2 в процессе резания обеспечивает лучшее врезание (затягивание) ножа на подаче  $S_z = 12$  мм, что связано с меньшим углом заострения первой и второй ступени этого ножа ( $\beta_1 = 40^\circ$ ,  $\beta_2 = 45^\circ$ ) по сравнению с углами заострения всех остальных ножей ( $\beta = 50^\circ$ ). Нож № 3, имеющий более острую режущую кромку по сравнению с прямой режущей кромкой ножа № 4, обеспечивает меньшие затраты энергии на измельчение.

За счет наклонной передней поверхности ножей № 2, 3 и 4 в процессе резания создаются лучшие условия для отвода стружки под переднюю поверхность ножа, что вносит определенный вклад в снижение действительной силы резания.

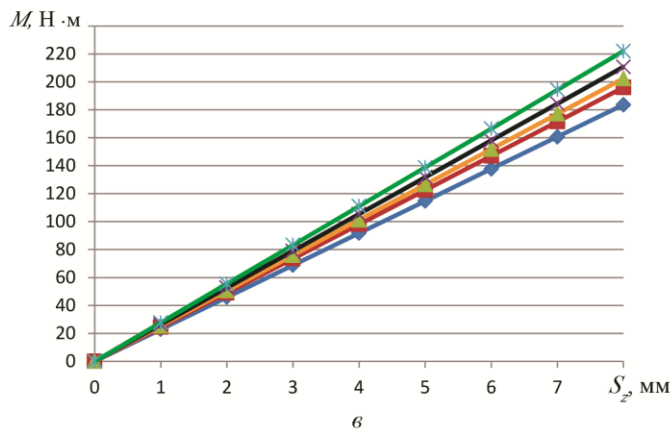
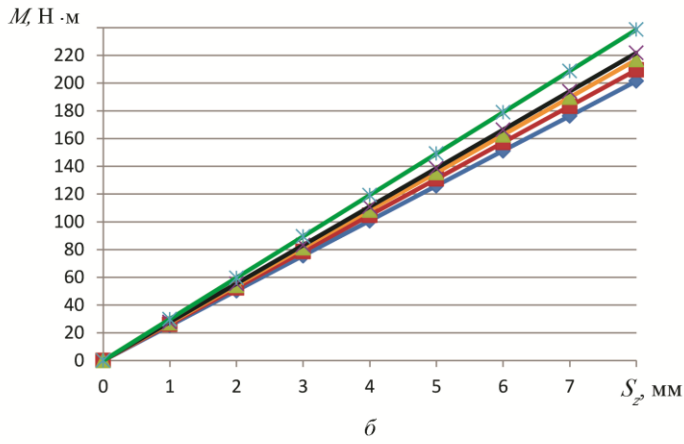
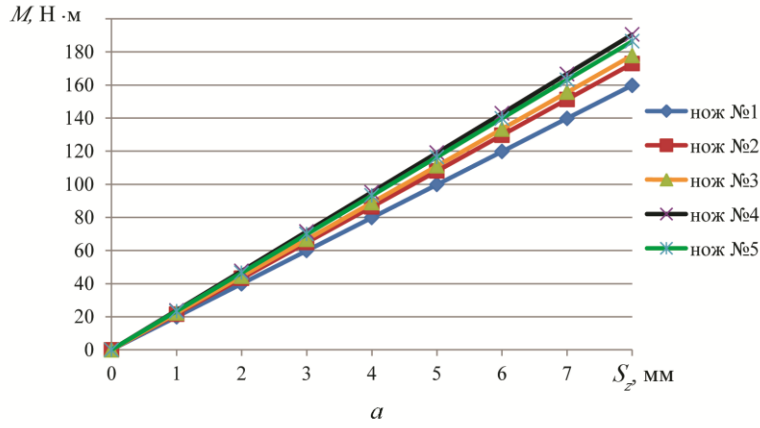


Рис. 3. Зависимость крутящего момента от подачи на нож при фрезеровании древесины сосны: *a* – вдоль волокон (секущая плоскость радиальная); *b* – поперек волокон (скорость резания параллельна тангенциальной оси); *v* – в торец (секущая плоскость тангенциальная)

Радиусная форма режущей кромки ножа № 1 условно состоит из двух режущих кромок, имеющих разносторонний наклон по отношению друг к другу. Эти режущие кромки являются более острыми по сравнению с прямой режущей кромкой ножа № 5 и обеспечивают эффект подрезки наружных поверхностей обрабатываемого материала [9]. Наклон режущей кромки ножа посредством косой заточки приводит к кинематическому заострению ножа, при этом создаются условия скользящего резания, что обеспечивает более чистое и легкое перерезание волокон [1]. Радиусная форма режущей кромки ножа № 1 позволяет разделить нагрузку на измельчаемую древесину от сил резания во времени, а сила резания, необходимая для снятия стружки, распределяется между двумя вершинами радиусного ножа. Так как при срезании стружки с древесины образуется опережающая трещина, распространяющаяся по образцу с определенной скоростью, значит разрушение древесины происходит постепенно и для более легкого перерезания волокон изменение локальных напряжений во времени на режущей кромке ножа (при его внедрении в древесину) должно происходить более плавно и постепенно. Это требование обеспечивает геометрическая форма ножа № 1.

#### *Выводы*

1. Согласно полученным результатам, наиболее эффективной можно считать радиусную форму режущей кромки и соответствующую ей форму передней поверхности ножа.
2. Сопоставление полученных экспериментальных данных с соответствующими показателями резания древесины при динамическом режиме можно использовать для объяснения влияния скорости резания на силу резания и ее производные.
3. Ножи предлагаемой конструкции с незначительной доработкой могут быть использованы в конструкции роторных ножниц и фрезерных измельчителей пней.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бершадский А.Л., Цветкова Н.И.* Резание древесины: учеб. Минск: Вышэйш. шк., 1975. 303 с.
2. *Вальщиков Н.М., Лицман Э.П.* Рубительные машины: моногр. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 96 с.
3. *Герасимов Ю.Ю., Сюнёв В.С., Соколов А.П., Селиверстов А.А., Катаров В.К., Суханов Ю.В., Рожин Д.В., Тюрлик И.И., Фирсов М.В.* Рациональное использование древесины и лесосечных отходов в биоэнергетике: оценка потенциалов и технологических подходов // Науч. журн. Куб. ГАУ. 2011. №73(09). С. 4.
4. *Гомонай М.В.* Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: моногр. М.: МГУЛ, 2006. 68 с.
5. *Демидов Ю.М.* Измельчение древесины для производства древесностружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 144 с.

6. *Залегаллер Б.Г., Ласточкин П.В., Бойков С.П.* Технология и оборудование лесных складов: учеб. для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 352 с.
7. *Захаренко Г.П.* Комплексное использование древесины: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Мар. ГТУ, 2006. 104 с.
8. *Манжос Ф.М.* Дереворежущие станки. 2-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 456 с.
9. *Морозов В.Г.* Дереворежущий инструмент: справ. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 344 с.
10. *Отлев И.А., Штейнберг Ц.Б.* Справочник по древесностружечным плитам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 240 с.
11. *Панькив О.Г., Демина Л.Н., Паршикова В.Н., Степень Р.А.* Эффективность переработки древесной зелени пихты различными методами // *Фундамент. исслед.* 2012. № 1. С. 168–171.
12. *Сажин В.С., Титунин А.А., Новиков А.Н.* Комплексное использование древесины: учеб. пособие. Кострома: Костром. ГТУ, 1997. 82 с.
13. *Шписсхофер Т.* Роторные ножницы для измельчения особо громоздких отходов: пат. 2140822 РФ; № 97102104/03, заявл. 30.06.95; опубл. 10.11.99. 10 с.
14. *Beniak J., Ondruska J., Cacko V.* Design Process of Energy Effective Shredding Machines for Biomass Treatment // *Acta Polytechnica.* 2012. Vol. 52, No. 5. Pp. 133–137.
15. *Strehler C.* Development of Near Net Shaped Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Composites with Optimised Grain Boundary Phase for Industrial Wood Machining: Dr. Eng. Sci. Diss. Freiberg, 2011. 90 p.
16. *Weber A.* Magnetostriktive Schnittkraftmessungen beim Holzfräsen // *Holz als Roh- und Werkstoff.* 1962. Vol. 20. No. 12. Pp. 486–492.

Поступила 23.12.16

UDC 674.05

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.149

### **The Impact of the Shape of the Knife Cutting Edge and Face Surface on the Power Indicators of Wood Shredding**

*E.O. Bulatasov, Postgraduate Student*

*V.P. Popov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*V.P. Khanin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

Orenburg State University, pr. Pobedy, 13, Orenburg, 460018, Russian Federation; e-mail: Eduard190319@mail.ru

The rational use of wood waste is one of the most important tasks of the complex processing of wood raw material. Different-sized wood waste should be shredded in the special chipping machines for the sawdust cement and solid biofuels production. The quality requirements for disintegrated wood for these productions are mainly limited by sizes of wood par-

---

*For citation:* Bulatasov E.O., Popov V.P., Khanin V.P. The Impact of the Shape of the Knife Cutting Edge and Face Surface on the Power Indicators of Wood Shredding. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.149–159. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.149

ticles and content of impurities, which allow evaluating the efficiency of the cutting elements during shredding of a total volume of wood into chips of the required dimensions only by the intensity of the cutting force or its derivatives. In most cases, when wood cutting, the face angle constructively is a constant value (the length of the cutting edge), and the cutting edge can have a straight, inclined, triangular or radius shape. Quality indicators of the circular cutting process by a cutting tool of these forms are obtained by wood materials processing with circular saws with carbide inserts. Power indicators of the cutting process (with identical conditions) of wood and wood-based materials are not numerous; the power indicators when using a cutting tool with a stepped shape of the cutting edge and the front surface, and a few cutting angles are virtually absent. The study is aimed at finding the optimal parameters of a cutting tool (knife), providing the lowest energy consumption in the primary wood shredding by milling. The experimental studies are carried out in a special test installation, which allows simulating the process of wood shredding by milling. Five types of blades of different geometric shapes of cutting edges and front surfaces are used. The effectiveness of various types of blades is evaluated by a torque value. The most effective knife shape is determined as a result of a comparative analysis of all shapes of cutting elements. The dependence of the torque on the knife feed at a static pine wood cutting for three main directions of cutting is established.

*Keywords:* wood shredding by milling, optimum knife shape, test installation, torque, knife feed, power indicator of wood shredding.

## REFERENCES

1. Bershadskiy A.L., Tsvetkova N.I. *Rezanie drevesiny: ucheb.* [Wood Cutting]. Minsk, 1975. 304 p.
2. Val'shchikov N.M., Litsman E.P. *Rubitel'nye mashiny: monogr.* [Chipping Machines]. Moscow, 1980. 96 p.
3. Gerasimov Yu.Yu., Syunev V.S., Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Katarov V.K., Sukhanov Yu.V., Rozhin D.V., Tyurlik I.I., Firsov M.V. Ratsional'noe ispol'zovanie drevesiny i lesechnykh otkhodov v bioenergetike: otsenka potentsialov i tekhnologicheskikh podkhodov [Rational Energy Use of Wood-Based Biomass: Estimation of Potentials and Technology]. *Nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of KubSAU], 2011, no. 73(09), pp. 582–593.
4. Gomonay M.V. *Proizvodstvo toplivnykh briketov. Drevsnoe syr'e, oborudovanie, tekhnologii, rezhimy raboty: monogr.* [Production of Fuel Briquettes. Wood Raw Materials, Equipment, Technology, Modes of Operation]. Moscow, 2006. 68 p.
5. Demidov Yu.M. *Izmel'chenie drevesiny dlya proizvodstva drevesnostruzhechnykh plit* [Wood Shredding for the Particle Boards Production]. Moscow, 1974. 144 p.
6. Zalegaller B.G., Lastochkin P.V., Boykov S.P. *Tekhnologiya i oborudovanie lesnykh skladov: ucheb. dlya vuzov.* [Technology and Equipment for Timber Yards]. Moscow, 1984. 352 p.
7. Zakharenko G. P. *Kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: ucheb. posobie* [Integrated Use of Wood]. Yoshkar-Ola, 2006. 104 p.
8. Manzhos F.M. *Derevrezhushchie stanki.* [Wood-Cutting Machines]. Moscow, 1974. 456 p.
9. Morozov V.G. *Derevrezhushchiy instrument: spravochnik* [Wood-Cutting Tool]. Moscow, 1988. 344 p.



10. Otlev I.A., Shteynberg Ts.B. *Spravochnik po drevesnostruzhechnym plitam* [Wood Chipboard Guide]. Moscow, 1983. 240 p.
11. Pan'kiv O.G., Demina L.N., Parshikova V.N., Stepen' R.A. Effektivnost' pererabotki drevesnoy zeleni pikhty razlichnymi metodami [Efficiency of Processing of Wood Greens of the Fir Various Methods]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, no. 1, pp. 168–171.
12. Sazhin V.S., Titunin A.A., Novikov A.N. *Kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: ucheb. posobie* [Integrated Use of Wood]. Kostroma, 1997. 82 p.
13. Shpisskhofer T. *Rotornye nozhnitsy dlya izmel'cheniya osobo gromozdkikh ot-khodov* [Rotary Shears for Particularly Bulky Waste Shredding]. Patent RF, no. 2140822, 1995.
14. Beniak J., Ondruska J., Cacko V. Design Process of Energy Effective Shredding Machines for Biomass Treatment. *Acta Polytechnica*, 2012, vol. 52, no. 5, pp. 133–137.
15. Strehler C. *Development of Near Net Shaped Si3N4/SiC Composites with Optimised Grain Boundary Phase for Industrial Wood Machining*: Dr. Eng. Sci. Diss. Freiberg, 2011. 90 p.
16. Weber A. Magnetostriktive Schnittkraftmessungen beim Holzfräsen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1962, vol. 20, no. 12, pp. 486–492.

Received on December 23, 2016



## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.017.272

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БУМАЖНОГО ЛИСТА\*

*И.В. Лебедев, асп.*

*Я.В. Казаков, д-р техн. наук, зав. каф.*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: mr.ivan.lebedev@mail.ru, j.kazakov@narfu.ru

Предложен алгоритм создания математической модели структуры бумажного листа, обладающего такими же свойствами, как и реальный бумажный материал, что позволяет анализировать и прогнозировать его свойства. Представлено три основных этапа создания этой модели. На первом этапе с использованием экспериментальных данных находят параметры распределения основных геометрических характеристик волокна (длины, ширины, кривизны). На основе этих параметров и выявленных зависимостей вычисляют геометрические характеристики каждого моделируемого волокна. На втором этапе осуществляют трехмерное моделирование отдельных волокон. Оно включает расчет траектории волокон, расчет поперечного сечения и трехмерное представление каждого волокна с учетом выявленных на предыдущем этапе зависимостей. На третьем этапе полученные модели отдельных целлюлозных волокон укладываются в единую волокнистую сетку заданной площади, образуется 3D-модель бумажного листа. При этом изгиб волокон в пространстве реализуется за счет операций математической морфологии с учетом параметров исходного сырья. Предлагаемый алгоритм создания трехмерной модели бумажного листа используется с применением прикладного программного обеспечения, позволяющего не только получать визуальную модель листа бумаги, но и проводить анализ и прогнозирование свойств целлюлозно-бумажных материалов без использования обширной инструментально-экспериментальной базы.

*Ключевые слова:* целлюлозное волокно, моделирование, структура бумажного листа.

---

\*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ) и в инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (САФУ) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

*Для цитирования:* Лебедев И.В., Казаков Я.В. Моделирование структуры бумажного листа // Лесн. журн. 2017. № 2. С.160–172. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

Целлюлозно-бумажный волокнистый материал обладает неоднородной структурой, которая состоит в основном из целлюлозных волокон растительного происхождения, распределенных в листе стохастическим образом, и которую в первом приближении можно представить в виде волокнистой сетки. От других волокнистых материалов бумагу отличает плоская форма волокон в структуре и наличие развитых межволоконных связей (рис. 1).

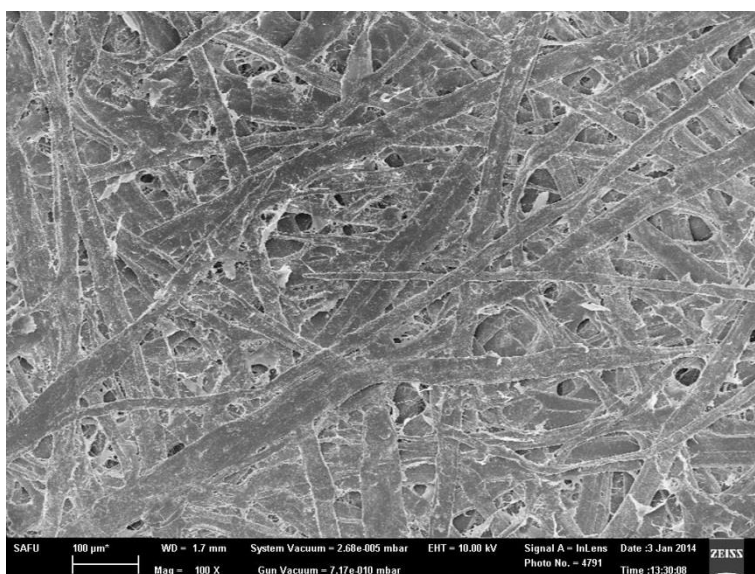


Рис. 1. Микрофотография лабораторного образца бумаги (получена на электронном микроскопе Zeiss SIGMA VP)

Исследование распределения волокон в структуре бумаги и их взаимодействия друг с другом позволяет понять, как компоненты композиции, особенно целлюлозные волокна, влияют на показатели физико-механических свойств бумаги, а также в дальнейшем прогнозировать значения прочностных и деформационных показателей и устанавливать оптимальные параметры композиции для получения бумаги с заданным комплексом свойств.

В исследовательской практике для количественной оценки неоднородности макроструктуры нашли применение оптические анализаторы, с помощью которых были установлены количественные закономерности, связывающие неоднородность макроструктуры с физико-механическими свойствами бумаги [5].

Для получения визуальной характеристики трехмерной структуры бумаги используют различные экспериментальные методы. Широко распространены сканирующая электронная микроскопия [15, 16] и рентгеновская томография, которая дает мощный инструмент для изучения различных свойств неоднородных материалов на основе спектра характеристик реальной макромасштабной структуры [11].

Другой широко распространенный метод анализа структуры волокнистых материалов – компьютерное моделирование. Создание 3D-модели бумажного полотна – перспективное направление для анализа и получения материала с заданными свойствами. При построении модели ей придается тот же набор свойств и параметров, что и у реального материала. Это позволяет получить наглядное представление о зависимости механических и капиллярных свойств моделируемых образцов от изменяемых факторов формирования волокнистой структуры. За счет аналитического варьирования композиции по волокну, способа и глубины обработки волокон (фибриллирование, или укорачивание), вида и технологии применения наполнителей и вспомогательных химических веществ становится возможным формирование трехмерной структуры бумаги с заданными физико-механическими характеристиками.

Принципы моделирования также применяют, например, для прогнозирования деформационного поведения целлюлозно-бумажного материала при растяжении с использованием феноменологического подхода на основании данных о структурно-морфологических характеристиках, полученных на автоматическом анализаторе волокна [4, 6, 9].

Исследователи разных стран применяли различные методы для моделирования стохастической структуры бумажного полотна (рис. 2). P.J. Pasi с коллегами [15] строили своеобразные волокнистые сети по следующему алгоритму: 1) размещение волокон в 3D-окне моделирования случайным образом; 2) сжатие структуры сетки до нужной толщины; 3) релаксация сетки до прекращения движения волокон. A. Dickson с соавторами [10] получали 3D-модель бумаги, укладывая в пространстве прямоугольные призмы, которые представляли собой модели целлюлозных волокон. Также были созданы модели, учитывающие композиционный состав бумаги и содержащие в себе волокна различных пород древесины, наполнители и мелочь [12, 16]. Одна из

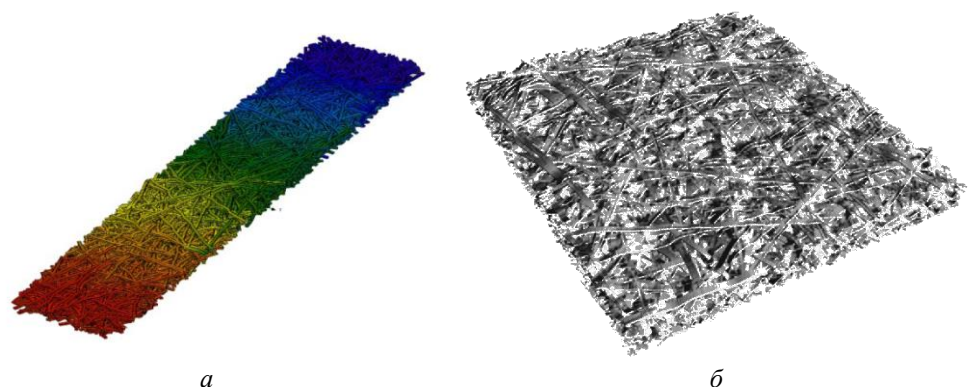


Рис. 2. 3D-модель бумажного полотна, учитывающая композиционный состав бумаги [12] (а) и распределение по длине волокна и жесткости волокон [16] (б)

основных особенностей построения модели бумаги – способ укладки волокон друг на друга в пространстве листа. Эту задачу авторы решали по-разному, но во всех случаях они использовали параметры, определяющие гибкость волокна [16]. Далее вводили коэффициенты, характеризующие взаимодействие волокон друг с другом. При этом ключевую роль приобретала RBA – относительная площадь связанной поверхности.

Все рассмотренные модели имеют отличия от реального бумажного полотна (см. рис. 1).

Недостатки моделей:

волокна имеют прямолинейную траекторию, что не учитывает их кривизну при расположении в пространстве;

волокна представляются в виде многогранных призм, что не учитывает структуру их поперечного сечения, имеющего различную степень сплюснутости, наличие люмена и толщину клеточной стенки;

длина всех волокон принимается одинаковой, что не учитывает наличие фракций волокон с различной длиной и шириной;

не учитывается мелочь, обязательно содержащаяся в реальной массе и во многом определяющая свойства бумаги;

отсутствует связь свойств модельных волокон с технологическими параметрами массоподготовки (например, степенью помола, или отлива, степенью анизотропии).

Для получения более точной компьютерной 3D-модели необходимо предварительно создать математическую модель полотна бумаги, которой после переноса в программную среду придается определенный набор свойств, более полно характеризующих структуру моделируемого листа. В предыдущих исследованиях был описан базовый алгоритм ее получения [8].

На первом этапе моделирования определяют геометрические характеристики отдельных волокон на основании анализа распределения их характеристик (длины, ширины и кривизны), на втором – создают 3D-модели отдельных волокон, массив характеристик которых подчиняется установленным распределениям, на третьем – укладывают полученные волокна в пространстве. В завершение определяют способ взаимодействия волокон между собой, т. е. физико-механические свойства структуры. Ниже рассмотрим каждый этап подробнее.

Для определения параметров распределения геометрических характеристик волокон целлюлозы на *первом этапе* были исследованы образцы беленой и небеленой сульфатной целлюлозы, размолотой до 20, 30 и 60°ШР. Результаты анализа волокна на автоматическом анализаторе L&W Fiber Tester [6, 14] с получением выборки примерно по 20 тыс. волокон были обработаны с помощью специального программного обеспечения [1]. Обширные массивы данных для хвойной и лиственной беленой и небеленой целлюлозы были обработаны с применением вероятностно-статических методов. В результате было установлено, что данные для ширины и длины волокна не противоречат

гипотезе о принадлежности выборки к логарифмическому нормальному распределению с параметрами  $\mu$  и  $\sigma$ , данные для кривизны волокна – экспоненциальному распределению с параметром  $\lambda$  [3, 7].

Были выявлены зависимости ширины и кривизны волокон хвойной целлюлозы от длины и получены уравнения, отражающие зависимости между длиной  $l$  волокна в классе и степенью помола и параметрами распределения ширины ( $\mu$  и  $\sigma$ , логарифмическое нормальное распределение) и кривизны ( $\lambda$ , экспоненциальное распределение) волокна (см. таблицу) и позволяющие получать выборки волокон с заданной длиной, а также рассчитывать ширину и кривизну каждого модельного волокна.

**Уравнения регрессии для расчета параметров распределения ширины ( $\mu$ ,  $\delta$ ) и кривизны ( $\lambda$ ) волокна хвойной целлюлозы в зависимости от длины волокна  $l$  и степени помола**

Хвойная целлюлоза	Степень помола		
	20 °ШР	30 °ШР	60 °ШР
Беленая	$\mu = 3,17 l^{0,037}$	$\mu = 3,25 l^{0,031}$	$\mu = 3,24 l^{0,0349}$
	$\sigma = 0,30 l^{-0,343}$	$\sigma = 0,30 l^{-0,350}$	$\sigma = 0,31 l^{-0,371}$
	$\lambda = 11,87 l^{-0,358}$	$\lambda = 11,32 l^{-0,506}$	$\lambda = 10,25 l^{-0,347}$
Небеленая	$\mu = 3,11 l^{0,060}$	$\mu = 3,21 l^{0,0507}$	$\mu = 3,25 l^{0,0445}$
	$\sigma = 0,30 l^{-0,303}$	$\sigma = 0,30 l^{-0,299}$	$\sigma = 0,32 l^{-0,356}$
	$\lambda = 14,36 l^{-0,354}$	$\lambda = 10,95 l^{-0,355}$	$\lambda = 10,19 l^{-0,328}$

На основе этого исследования был выработан алгоритм получения адекватной по длине, ширине и кривизне выборки волокон для моделирования структуры бумажного листа с заданной композицией по волокну:

с использованием параметров распределения длины волокна формируется выборка из заданного числа волокон, подчиняющаяся логарифмически нормальному распределению, и определяется количество волокон в каждом классе длины;

с использованием параметров распределения ширины и кривизны волокна для каждого из волокон в классе длины, вычисленных по уравнениям из таблицы, рассчитываются ширина и кривизна каждого волокна в классе.

В результате каждое модельное волокно получает характеристики – длину, ширину и кривизну.

Таким образом, для описания геометрических характеристик целлюлозы производится переход от масштабных массивов данных к нескольким базовым параметрам для каждого образца и с использованием параметров распределения моделируется выборка волокон с адекватной вероятностно-статистической характеристикой.

Трехмерное моделирование волокон производится *на втором этапе* [2], алгоритм включает:

1. Расчет траектории волокна в плоскости с использованием параметрически задаваемых кривых Безье третьего порядка. Используются характери-

стики отдельных волокон: длина ( $l$ , мм); фактор формы  $f$  (кривизна); угол к определяющему направлению  $\alpha$  (рис. 3,  $a - e$ ).

2. Расчет поперечного сечения волокна в виде многоугольника (в форме эллипса) с числом ребер  $n$  от 4 до 36, шириной ( $b$ , мкм), толщиной стенки волокна ( $\delta$ , мкм) и степенью сплюснутости ( $t$ , %) (рис. 3,  $z - e$ ).

3. Трехмерное представление образа волокна в виде многогранника (рис. 4).

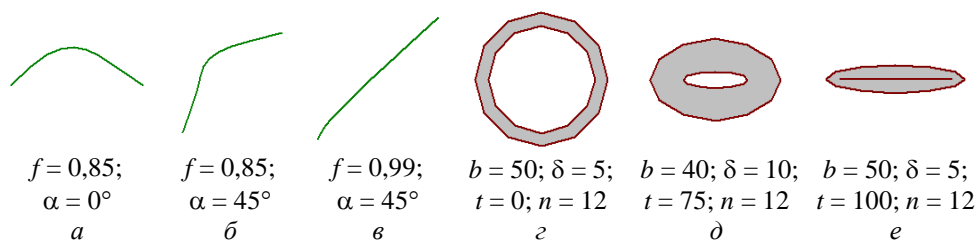


Рис. 3. Результаты моделирования траектории ( $a - e$ ) и профиля волокон ( $z - e$ ) по программе [1]

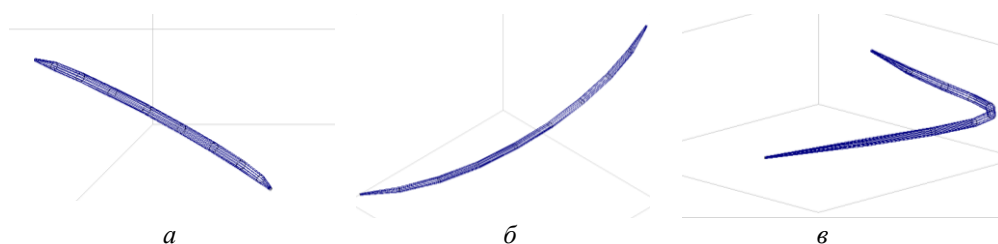


Рис. 4. Результаты трехмерного моделирования целлюлозных волокон длиной  $l = 2,9$  мм, шириной  $b = 50$  мкм с различными факторами формы  $f$  и углом ориентации  $\alpha$  к горизонтальной оси при использовании проекций различного типа [2]:  $a$  – косоугольная ( $f = 0,99; \alpha = 45^\circ$ );  $b$  – изометрическая ( $f = 0,95; \alpha = 0^\circ$ );  $c$  – диметрическая ( $f = 0,50; \alpha = 45^\circ$ )

Форма моделей соответствует изображениям, получаемым при визуальном анализе формы окрашенных волокон в листе [3], и данным электронной микроскопии (см. рис. 1). Это подтверждает корректность подхода при применении кривых Безье, а установленные ранее параметры стохастической структуры с использованием законов распределения открывают путь к моделированию трехмерной структуры бумаги [7].

Задачей на *третьем этапе* является размещение волокон в пространстве, т. е. создание модели бумажного полотна. Моделирование выполняется на плоской поверхности, на которой последовательно располагаются волокна. Поверхность представляет собой участок квадратной формы с задаваемыми пользователем размерами, не превышающими 10 мм из-за ограничений по использованию памяти при выполнении моделирования. Волокна разбрасы-

ваются случайным образом по всей площади поверхности, при этом координаты их центров поддаются равномерному распределению, поскольку эффект флокуляции на образцах малых размеров не имеет существенного значения.

В качестве основы для построения модели волокна используется подход [16], в котором каждый слой моделируется из полученных волокон длиной  $l$ , шириной  $b$  и толщиной стенки  $\delta$ . Характеристики волокон рассчитываются на основании полученных вероятностно-статистических зависимостей для волокон полуфабрикатов, используемых в композиции бумаги. При этом создается массив данных  $S_1$ , который включает в себя точки замкнутого пространства, образованного линиями  $i$ -го сегмента волокна, и представляющего единичный сегмент волокна. Далее с помощью аффинных преобразований сдвига и поворота создается каждый следующий сегмент волокна ( $S_2, S_3, \dots, S_n$ ), причем между смежными сегментами рассчитывается угол изгиба  $\alpha_i$  по характеристическим точкам и узлам кривой Безье, моделирующей траекторию волокна. Количество сегментов задается количеством звеньев волокна  $n$ , определяемым пользователем и соответствующим степени разработки волокна. После построения всех сегментов волокна производится накопление всех точек из их массивов:

$$F_j = \sum_{i=1}^n S_i,$$

где  $j$  – номер моделируемого волокна из заданной выборки.

Далее программа по этому алгоритму от 1 до  $j$  создает все волокна и начинает укладывать их на ровную поверхность. Первые непересекающиеся с другими волокна укладываются на плоскую поверхность по траектории, соответствующей рассчитанной кривой Безье.

В процессе моделирования волокна начинают формировать шероховатую поверхность, образующую развивающуюся сетку. Степень, с которой волокна изгибаются в  $z$ -направлении по этой поверхности, определяется применением алгоритма «катящегося шара» [10]. Изгиб волокна при его укладке на уже сформированную поверхность напрямую зависит от радиуса шара  $r$  (рис. 5), изменяя который, можно менять траекторию волокна в  $z$ -направлении (рис. 6).

Для определения радиуса шара применяется относительная величина – плотность структуры листа  $\rho$ , зависящая от степени помола и выражаемая в процентах. Угол  $\beta_i$  между сегментами при укладывании одного волокна на другое определяется по следующей формуле:

$$\beta_i = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho}{100}.$$

Если  $\rho = 100\%$ , то волокна ложатся поверх друг друга с максимально плавным углом (радиусом шара), если  $\rho = 0\%$ , то шар не катится.



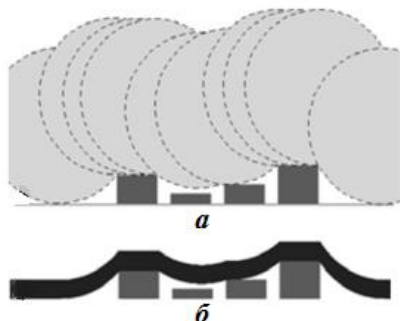


Рис. 5. Принцип моделирования: *a* – применение алгоритма катящегося шара по поверхности; *б* – результирующая конформация волокна [10]

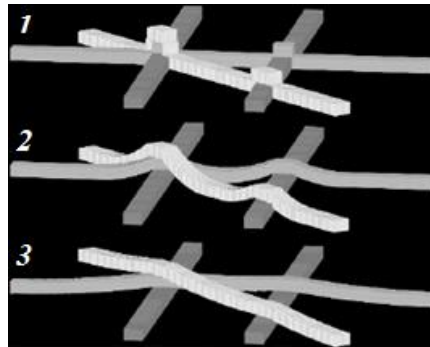


Рис. 6. Различные конформации волокна: 1 –  $r = 0$  (шар не катится); 2 –  $r_1$ ; 3 –  $r_2$  ( $r_2 > r_1$ ) [10]

Таким образом, каждый сегмент волокна подвергается операции изгиба согласно задаваемой жесткости волокон (исходя из плотности листа), и эта операция прекращается при выполнении одного из двух условий:

- 1) сегмент  $i + 1$  изогнулся на максимально допустимый угол относительно сегмента  $i$ ;
- 2) массив данных, содержащий точки сегмента  $i$ , обладает общими элементами с массивом данных, определяющим элементы уже сформированной поверхности волокон.

Для реализации второго условия в программу необходимо ввести динамический трехмерный массив данных, который постоянно будет пополняться с помощью операций математической морфологии, которая позволяет обрабатывать множество точек в пространстве. Входными данными для аппарата математической морфологии являются два изображения: обрабатываемое и специальное, зависящее от вида операции и решаемой задачи. В нашем случае обрабатываемым изображением является поверхность со слоем волокон, специальным – сегмент с уже рассчитанным углом изгиба. Основной операцией при этом будет операция наращивания изображения  $A$  структурным элементом  $B$ , которая обозначается  $A \oplus B$  и задается следующим выражением:

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b.$$

При осуществлении данной операции необходимо учитывать координаты центра каждого сегмента волокна, которые будут определять степень изогнутости волокна, размещаемого на матрице других волокон [14]. Если центр сегмента волокна  $i$  приходится на пик топографии, т. е. расположен непосредственно над верхним волокном, то расположение сегментов  $i - 1$  и  $i + 1$  и их центров определяется заданным радиусом катящегося шара, но при этом анализируется их пересечение (касание) с поверхностью уже наложенных воло-

кон. Если произошло касание волокна с поверхностью, то оно наращивается над этой поверхностью вне зависимости от того, изогнулось ли оно на необходимый радиус, заданный алгоритмом обработки. Некоторые возможные примеры пересечений в поперечном разрезе показаны на рис. 7.

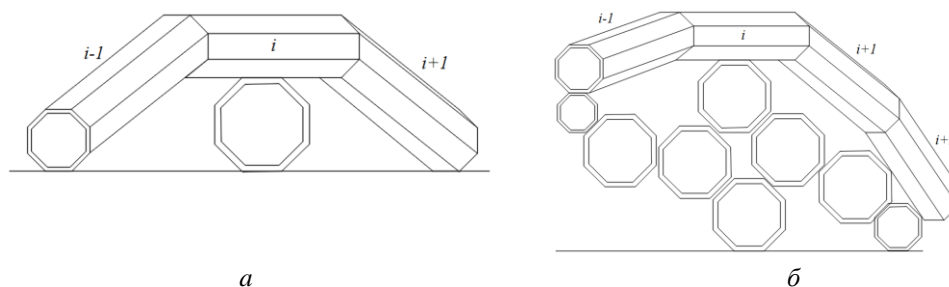


Рис. 7. Укладка волокон в пространстве: *а* – сегменты  $i - 1$  и  $i + 1$  легли на поверхность согласно заданному радиусу; *б* – сегмент  $i - 1$  пересекся с уже уложенным волокном, сегмент  $i + 1$  уложен согласно заданному радиусу и без пересечений

Таким образом, при укладке волокон друг на друга, получен трехмерный массив данных, который позволяет однозначно судить о количестве как целлюлозных волокон в рассматриваемой области пространства, так и пустот между ними. При задании постоянного числа сегментов в каждом волокне появляется возможность просчитать количество точек пересечения сегментов волокон и вычислить свойства моделируемого бумажного полотна.

Моделирующая программа для заданной массы  $1 \text{ м}^2$  модельного листа вычисляет число волокон в образце и основные физические свойства: толщину, кажущуюся плотность, пористость и гладкость, а также относительную связанную поверхность, которая определяет механические или капиллярные свойства бумаги.

### Заключение

На основании статистической обработки экспериментальных значений характеристик отдельных волокон беленых и небеленых волокнистых полуфабрикатов с различной степенью помола и анализа расположения волокон в трехмерной структуре реального листа бумаги разработан следующий алгоритм для построения 3D-модели листа бумаги с заданной композицией по волокну:

1) формирование выборки из заданного числа волокон на основании параметров распределения длины, ширины и кривизны волокна, а также установленных взаимосвязей между длиной волокна в классе и его шириной и кривизной; при этом каждое из модельных волокон получает характеристики – длину, ширину и кривизну;

2) построение 3D-моделей отдельных целлюлозных волокон, массив характеристик которых подчиняется установленным распределениям, при этом задается траектория расположения каждого волокна в плоскости;

3) построение 3D-модели листа бумаги путем укладки модельных волокон в волокнистую сетку на участке бумаги с заданным размером; придание волокнам трехмерной конформации реализуется за счет применения различных операций математической морфологии и с учетом изменения траектории волокна.

В дальнейшем для данной модели волокна с помощью программного обеспечения будет задан набор механических свойств, который позволит наблюдать за изменением 3D-модели бумажного полотна при деформационных нагрузках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 2012612982 РФ. Программа для анализа и моделирования распределения по длине и ширине целлюлозных волокон в бумажной массе (Моделирование фракционного состава) / Я.В. Казаков; заявитель и правообладатель САФУ (RU). № 2012610536; заявл. 30.01.2012; опубл. 26.03.2012, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

2. Казаков Я.В. Трехмерное моделирование целлюлозных волокон // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы IV Всерос. конф. Барнаул: Алтайский ун-т, 2009. Кн. I. С. 57–59.

3. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 269–275.

4. Казаков Я.В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2015. 534 с.

5. Казаков Я.В., Зеленова С.В., Комаров В.И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Лесн. журн. 2007. № 3. С. 110–121 (Изв. высш. учеб. заведений).

6. Казаков Я.В., Манахова Т.Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. № 5. С. 34–39.

7. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Математическая модель геометрических характеристик волокон в бумажной массе // Работа целлюлозно-бумажных предприятий в современных условиях: материалы и докл. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. (Караваево, 28–29 мая 2015 г.). М.: МГУЛ, 2015. С. 80–88.

8. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Математическая модель структуры бумажного листа // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 9–11 сент. 2015 г.). Архангельск: САФУ, 2015. С. 288–293.

9. Манахова Т.Н., Казаков Я.В. Расчет параметров феноменологической модели деформирования целлюлозного материала по результатам измерений на автоматическом анализаторе волокна // Лесн. журн. 2014. № 1. С. 140–147. (Изв. высш. учеб. заведений).

10. Dickson A., Doole N., Sampson W. Simulation of Thickness Distribution in Random Fiber Networks // Proc. Seminar “Progress in Paper Physics”. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. Helsinki. 2008. Pp. 291–294.
11. Karlsson H. Fiber Guide. Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry. Sweden, 2006. 120 p.
12. Koivu V., Turpeinen T., Kataja M. X-Ray Micro-Tomographic Study of Paper-Making Fabrics // Proc. Seminar “Progress in Paper Physics”. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. Helsinki, 2008. Pp. 25–28.
13. Lavrykov S., Lindstrom S.B., Singh K.M., Ramarao B.V. 3-D Network Simulations of Paper Structure // Nordic Pulp and Paper Research J. 2012. No. 27(2). Pp. 256–263.
14. Lindstrom S.B. Modeling and Simulation of Paper Structure Development: Dr. Tech. Diss. Sundsvall, 2008. 184 p.
15. Pasi P.J. Miettinen, Jukka A. Ketoja, Tuomo Hje. Simulation of Structure and Deformation of Wet Fiber Networks // Proc. Seminar “Progress in Paper Physics”. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. Helsinki. 2008. Pp. 143–145.
16. Vincent R., Rueff M., Voillot C. 3-D Computational Simulation of Paper Hand-sheet Structure and Prediction of Apparent Density // Tappi J. 2009. No. 9(1). Pp. 15–19.

Поступила 21.12.16

UDC 676.017.272

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

### **Paper Sheet Texture Simulation**

*I.V. Lebedev, Postgraduate Student*

*Ya.V. Kazakov, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: mr.ivan.lebedev@mail.ru, j.kazakov@narfu.ru

This paper describes an algorithm for creating a mathematical model of the paper sheet texture having the same properties as the real paper material. This allows us to analyze and predict its properties. Three main stages of creating of this model are presented. The distribution parameters of basic fiber geometric characteristics (length, width, curvature) are determined with the use of the experimental data in the first stage. Based on these identified parameters and dependencies for each simulated fiber its geometric characteristics are calculated. The next step is the modeling of individual fibers. It includes the calculation of a trajectory of fibers, the cross-section calculation and three-dimensional representation of each fiber based on the identified dependencies in the previous step. In the third stage the obtained models of the individual cellulose fibers are stacked into a single fibrous mesh of a given area to form a paper sheet 3D-model. The fiber bending in space is realized by the mathematical morphology operations and the parameters of the starting crude. The proposed

---

*For citation:* Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Paper Sheet Texture Simulation. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.160–172. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

algorithm of creating the three-dimensional model of a paper sheet is implemented using the application software, that allows obtaining a visual model of a paper sheet and analyzing and predicting of the pulp and paper properties without the use of the extensive instrumental and experimental base.

*Keywords:* cellulose fiber, simulation paper sheet texture.

#### REFERENCES

1. Kazakov Ya.V. *Programma dlya analiza i modelirovaniya raspredeleniya po dline i shirine tsellyuloznykh volokon v bumazhnoy masse (Modelirovanie fraktsionnogo sostava)* [The Program for Analysis and Modeling of the Length and Width Distribution of the Cellulose Fibers in the Paper Pulp (Fractional Composition Simulation)]. Certificate of Authorship RF, no. 2012612982, 2012.
2. Kazakov Ya.V. Trekhmernoe modelirovanie tsellyuloznykh volokon [Three-Dimensional Modeling of Cellulose Fibers]. *Novye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy IV Vseros. konf.* [Proc. 4th All-Russ. Conf. "New Achievements in Chemistry and Chemical Technology of Vegetable Raw Materials"]. Barnaul, 2009, book I, pp. 57–59.
3. Kazakov Ya.V. Kharakteristika geometricheskikh parametrov volokon tsellyuloznykh polufabrikatov s ispol'zovaniem veroyatnostnykh metodov [Characterization of Geometrical Parameters of Fibers of Cellulose Semi-Finished Products with the Use of Probabilistic Methods]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ia* [Chemistry of Plant Raw Material], 2014, no. 1, pp. 269–275.
4. Kazakov Ya.V. *Kharakteristiki deformativnosti kak osnovopolagayushchiy kriteriy v otsenke kachestva tsellyulozno-bumazhnykh materialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Characteristics of Deformability as a Fundamental Criterion in the Quality Assessing of the Pulp and Paper Products: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Arkhangel'sk, 2015. 534 p.
5. Kazakov Ya.V., Zelenova S.V., Komarov V.I. Vliyaniye neodnorodnosti struktury na kharakteristiki zhestkosti kartonov-laynerov [Influence of Structural Nonuniformity on Stiffness Characteristics of Linerboard]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2007, no. 3, pp. 110–121.
6. Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. Bumagoobrazuyushchiy potentsial khvoynoy nebelenoy tsellyulozy: sovremennyy vzglyad cherez avtomaticheskyy analizator volokna [Paper-Forming Potential of Softwood Unbleached Pulp: the Modern View Using the Automatic Fiber Analyzer]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Board], 2013, no. 5, pp. 34–39.
7. Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Matematicheskaya model' geometricheskikh kharakteristik volokon v bumazhnoy masse [A Mathematical Model of the Geometric Characteristics of Fibers in the Paper Pulp]. *Rabota tsellyulozno-bumazhnykh predpriyatiy v sovremennykh usloviyakh: materialy i dokl. 16-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Karavaevo, 28–29 maya 2015 g.)*. [Proc. 16th Intern. Sci. Eng. Conf. "Operation of the Pulp and Paper Enterprises Under Current Conditions"]. Moscow, 2015, pp. 80–88.
8. Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Matematicheskaya model' struktury bumazhnogo lista [A Mathematical Model of the Paper Sheet Texture]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Arkhangel'sk, 9–11 sent. 2015 g.)* [Proc. 3d Intern. Sci. Eng. Conf. "The Issues of Mechanics of Pulp-and-Paper Materials"]. Arkhangel'sk, 2015, pp. 288–293.

9. Manakhova T.N., Kazakov Ya.V. Raschet parametrov fenomenologicheskoy modeli deformirovaniya tsellyuloznogo materiala po rezul'tatam izmereniy na avtomaticheskoy analizatore volokna [Calculation of Phenomenological Model Parameters of Cellulose Material Deformation Based on the Data from Automated Analyzer]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2014, no. 1, pp. 140–147.

10. Dickson A., Doole N., Sampson W. Simulation of Thickness Distribution in Random Fiber Networks. *Proc. Seminar "Progress in Paper Physics". Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008*. Helsinki, 2008, pp. 291–294.

11. Karlsson H. *Fiber Guide. Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Sweden, 2006. 120 p.

12. Koivu V., Turpeinen T., Kataja M. X-Ray Micro-Tomographic Study of Paper-Making Fabrics. *Proc. Seminar "Progress in Paper Physics". Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008*. Helsinki, 2008, pp. 25–28.

13. Lavrykov S., Lindstrom S.B., Singh K.M., Ramarao B.V. 3-D Network Simulations of Paper Structure. *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2012, no. 27(2), pp. 256–263.

14. Lindstrom S.B. *Modeling and Simulation of Paper Structure Development*: Dr. Tech. Diss. Sundsvall, 2008. 184 p.

15. Pasi P.J. Miettinen, Jukka A. Ketoja, Tuomo Hje. Simulation of Structure and Deformation of Wet Fiber Networks. *Proc. Seminar "Progress in Paper Physics". Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008*. Helsinki, 2008, pp. 143–145.

16. Vincent R., Rueff M., Voillot C. 3-D Computational Simulation of Paper Hand-sheet Structure and Prediction of Apparent Density. *Tappi J.*, 2009, no. 9(1), pp. 15–19.

Received on December 21, 2016

УДК 621.365

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

## **ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ (ОБЗОР)\***

*М.А. Молодцова, асп., инж.*

*Ю.В. Севастьянова, канд. техн. наук, доц., дир. инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»*

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

e-mail: m.molodcova@narfu.ru, J.Sevastyanova@narfu.ru

Бурное развитие естественных наук, которое наблюдается в последние десятилетия, опирается на существенное расширение технических возможностей проведения исследований и тесное переплетение достижений химии, физики, биологии и других областей естествознания. Это способствовало тому, что во второй половине XX в. появились новые области химии (лазерная химия, плазмо- и фотохимия, химия высоких давлений). В последние 10...15 лет уже XXI в. к их числу присоединилось и перспективное направление – микроволновая химия, которая возникла на стыке физики и химии. Она включает химические превращения с участием твердых диэлектриков и жидкостей, связанные с использованием энергии микроволнового (или сверхвысокочастотного) поля. Установлено, что микроволновое излучение способно в десятки и сотни раз ускорять многие химические реакции, вызывать быстрый объемный нагрев жидких и твердых образцов, эффективно (быстро и полностью) удалять влагу из твердых, в том числе и высокопористых, препаратов, модифицировать свойства различных сорбентов. Применение энергии микроволн вместо используемой в настоящее время тепловой энергии теплоносителей в промышленных установках позволяет значительно упростить технологические схемы, исключить все процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя, а также снизить вредные выбросы в атмосферу. Ограничения для применения микроволнового излучения связаны главным образом с отсутствием оборудования промышленного назначения.

*Ключевые слова:* микроволновое излучение, сверхвысокочастотное излучение, растительное сырье, древесина, традиционный нагрев.

---

\*Статья подготовлена при финансовой поддержке Правительства Архангельской области (грант № 10-2016-04а).

*Для цитирования:* Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор) // Лесн. журн. 2017. № 2. С.173–187. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

*Введение*

Подобно многим другим открытиям, существенно повлиявшим на повседневную жизнь людей, открытие теплового воздействия микроволн произошло случайно. В 1945 г. американский физик Перси Спенсер, работая в лаборатории компании «Raytheon» с устройством, излучавшим сверхвысокочастотные (СВЧ) волны, обнаружил возможность использования микроволн для приготовления пищи. В 1947 г. появились первые приборы для приготовления пищи с помощью микроволн [10].

Первоначальный всплеск развития СВЧ-технологий был обусловлен военными заказами на разработку радаров во время Второй мировой войны. Это подтолкнуло ученых к изучению свойств микроволн и связанных с ними технологий. Большая часть информации по данной теме была занесена в серию томов, подготовленных Массачусетским технологическим институтом и Национальным исследовательским комитетом обороны США [28].

К настоящему времени накоплен большой опыт по использованию микроволнового излучения (МВИ) в различных отраслях науки и техники, в сельском хозяйстве, медицине, быту. Однако литературы по этому вопросу не так много. В России и за рубежом издаются книги, обзоры, статьи, посвященные отдельным вопросам использования МВИ. К сожалению, эти книги малодоступны для широкого круга читателей в России. Большинство научных публикаций, особенно в области микроволновой химии, носит фрагментарный характер. Практически отсутствует информация о применении МВИ в промышленном производстве. Недостаточно известны новейшие разработки микроволновых установок как лабораторного, так и промышленного масштаба. Несмотря на достаточно большой объем научных публикаций об ускорении химических реакций при микроволновом воздействии причина этого явления остается до конца не ясной [16].

*Микроволны и процессы, протекающие при микроволновом излучении*

Термин «микроволны» был заимствован из зарубежной литературы и используется в последние годы наряду с ранее употреблявшимся термином «сверхвысокая частота», который определяет тот же диапазон частот [14].

К микроволновой (МВ) области спектра электромагнитного излучения относится диапазон частот 300 ГГц...300 МГц (длина волны от 1 мм до 1 м), который располагается в интервале между инфракрасным и радиоволновым излучением (см. таблицу). Для применения в промышленности, науке и медицине используется в основном частота 2450 МГц [27].



## Шкала электромагнитных излучений

Часть спектра	Характеристики	
Невидимая	<i>Вид излучения</i>	
	Радиоволновое	Частота, Гц $10^3 \dots 10^9$
	Микроволновое	$10^9 \dots 10^{12}$
	Инфракрасное	$10^{12} \dots 10^{15}$
	Ультрафиолетовое	$10^{15} \dots 10^{18}$
	Рентгеновское	$10^{18} \dots 10^{21}$
	Гамма-излучение	$10^{21} \dots 10^{23}$
Видимая	<i>Цвет спектра</i>	
	Красный	Частота, Гц $3,95 \cdot 10^{14} \dots 4,83 \cdot 10^{14}$
	Оранжевый	$4,83 \cdot 10^{14} \dots 5,08 \cdot 10^{14}$
	Желтый	$5,08 \cdot 10^{14} \dots 5,36 \cdot 10^{14}$
	Зеленый	$5,36 \cdot 10^{14} \dots 6,00 \cdot 10^{14}$
	Голубой	$6,00 \cdot 10^{14} \dots 6,25 \cdot 10^{14}$
	Синий	$6,25 \cdot 10^{14} \dots 6,66 \cdot 10^{14}$
	Фиолетовый	$6,66 \cdot 10^{14} \dots 7,89 \cdot 10^{14}$

МВИ большой интенсивности используется для бесконтактного нагрева тел в печах (как в бытовых, так и промышленных установках для термообработки металлов), основным элементом в которых является магнетрон\*, малой интенсивности – преимущественно в портативных средствах связи (рациях, сотовых телефонах (кроме первых поколений), устройствах Bluetooth, WiFi и WiMAX) [6].

МВИ может взаимодействовать с веществами, находящимися в газообразном, жидком или твердом состоянии. На анализе взаимодействия МВИ с молекулами основана широко используемая в научных исследованиях радиочастотная спектроскопия, позволяющая получать информацию о свойствах молекул.

По разным причинам препаративное проведение химических процессов в газовой фазе с использованием энергии МВ поля пока еще не начато. Для практики наиболее интересно взаимодействие МВИ с жидкими и твердыми веществами. Заметное поглощение МВИ наблюдается при облучении многих жидкостей и жидких растворов. Особенно сильное поглощение отмечено для воды и водных растворов. Взаимодействие МВИ с твердыми образцами может сопровождаться его отражением, поглощением и прохождением через объем образца без ослабления [2].

Устройства для осуществления МВ облучения называют микроволновыми печами. Принципиальная схема микроволновой установки включает:

\*Термин «магнетрон» был введен в употребление американским физиком А. Халлом.

генератор электромагнитного излучения (чаще всего магнетрон), волновод, камеру для нагрева (или резонатор), системы вентиляции и охлаждения магнетрона, систему защиты от избыточного излучения, систему измерительных приборов и блок управления (см. рисунок) [16].

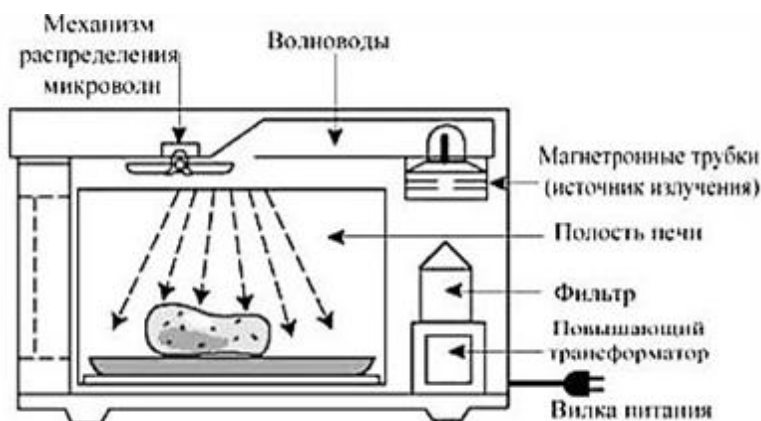


Схема микроволновой установки

Впервые результаты теоретических и экспериментальных исследований работы магнетрона и его конструкция были опубликованы в 1921 г. А. Халлом. В 1940–70-е гг. инженерами многих стран (Великобритания, СССР, США, Япония и др.) в конструкцию магнетрона было внесено множество изменений, для систем радиолокации разработано более тысячи типов многорезонаторных магнетронов и построены специализированные промышленные предприятия по их производству как в России, так и за рубежом [20].

Как было сказано выше, источником МВИ служит магнетрон, представляющий собой цилиндрический диод. В диоде имеется цилиндрический катод, вдоль которого направлено внешнее магнитное поле. В окружающем катод цилиндрическом аноде находится кольцо из взаимосвязанных объемных резонаторов. Разность потенциалов между катодом и анодом достигает нескольких киловольт. Перемещение генерируемых нагретым катодом электронов в магнитном поле приводит к появлению в магнетроне не только высокочастотных колебаний, но и колебаний самих электронов [2]. Колеблющиеся электроны через антенну передают микроволновую энергию в виде электромагнитного излучения в окружающее пространство. Эта энергия по полному металлическому волноводу направляется в специальное устройство – резонатор, далее излучение из резонатора попадает в рабочую зону печи, где и происходит МВ нагрев образцов [2].

При воздействии электромагнитного поля частотой 2450 МГц полярные или поляризуемые молекулы или ионы вещества ориентируются в соответствии с пульсациями поля. Из-за несоответствия по фазе между колебаниями поля и вращением диполей энергия излучения превращается в кинетическую

энергию молекул, происходит разогрев вещества изнутри и во всем объеме в отличие от традиционного нагрева поверхности при теплопередаче. Способность вещества нагреваться под воздействием микроволн характеризуется его диэлектрической проницаемостью [13, 20].

Для того чтобы МВИ не покидало внутреннего пространства печи и не оказывало вредного воздействия на организм человека, используют металлические отражающие стенки, переднюю стеклянную дверцу печи экранируют металлической сеткой. При работе печи в МВ энергию превращается примерно 50 % расходуемой печью электроэнергии, остальная энергия рассеивается как тепловая в окружающее пространство [2].

Первые работы по нагреву при проведении химических реакций появились в 1986 г. В частности, был обнаружен так называемый микроволновый эффект, заключающийся в увеличении скорости химических реакций (или инициации реакций), не протекающих в обычных условиях. Поиском систем, в которых проявляется этот эффект, и его объяснением до настоящего времени заняты ученые многих стран мира. Появилось новое научное направление – микроволновая химия. Химики стали использовать бытовые микроволновые печи, модифицируя их для проведения химических процессов [2, 3].

#### *Практика использования микроволнового излучения*

Впервые микроволновый нагрев пищевых продуктов начали исследовать в 1950-е гг. в Институте пищевых технологий (Массачусетс, США) и в Лаборатории исследования пищевых продуктов «Raytheon». Промышленное применение микроволнового нагрева в пищевой отрасли было освоено в 1960-х гг. МВ обработка позволила значительно интенсифицировать технологические процессы производства пищевых продуктов (сушка и досушивание, стерилизация, пастеризация, размораживание, сублимация и др.) и реализовать безотходные и энергосберегающие технологии в пищевой промышленности, значительно увеличить выпуск готовой продукции без больших капитальных затрат на строительство предприятий, улучшить санитарно-гигиенические условия труда [16].

К настоящему времени в пищевой отрасли созданы установки периодического действия, конвейерные микроволновые установки, установки с комбинированным нагревом (вакуумные, конвективные, с инфракрасным нагревом и др.) [16].

В конце 1950-х – начале 1960-х гг. в Уфимском государственном нефтяном техническом университете уже проводились опытно-конструкторские работы по созданию микроволновых установок для отверждения и укрепления грунтов в ответственных местах прокладки нефте- и газопроводов, а также для укрепления фундаментов зданий. В результате обработки микроволнами грунт приобретал прочность кирпича или искусственного камня [1, 8].

В органической химии всплеск исследовательской активности в использовании микроволн произошел после публикации в 1986 г. двух статей французских авторов, которые использовали бытовые микроволновые печи для нагрева реакционных смесей и, несмотря на трудности технического характера, наблюдали значительное сокращение продолжительности реакций Дильса-Альдера, Кляйзена, этерификации, окисления и других при сравнимых выходах целевых продуктов [24, 25].

При воздействии МВИ на растворы передача энергии осуществляется по двум механизмам: за счет переориентации диполей растворителя и в результате перемещения в нем заряженных ионов растворенного вещества, т. е. посредством вращения диполей и ионной проводимости. Влияние МВИ на химические превращения в растворах, структуру растворителя и состояние сольватированных ионов рассмотрено в работах [11, 26]. Обсуждаются и специфические тепловые эффекты, обусловленные природой воздействия МВИ на систему. МВ нагрев, в отличие от традиционного термического, осуществляется равномерно по всему объему, вследствие чего температура раствора оказывается выше, чем у его окружения (стенок сосуда, газовой фазы над раствором и т. д.). При этом раствор может нагреться до температуры, превышающей температуру кипения при атмосферном давлении. Кроме того, в гетерогенных системах возможны термические эффекты на границе раздела фаз, обусловленные межфазной поляризацией. Неоднородность нагрева, связанная с различной способностью веществ поглощать энергию МВИ, приводит к нетривиальным результатам при объемном удалении воды, синтезе на твердых поверхностях, получении и использовании катализаторов [26, 30]. Различие в способности исходных веществ и продуктов реакции поглощать энергию МВИ может служить причиной возникновения автокаталитических реакций [25]. В реакциях органического синтеза непосредственное поглощение энергии промежуточным комплексом способствует значительному увеличению выхода продуктов реакции по сравнению с термическим нагревом при той же объемной температуре [29]. Существенное влияние на протекание химических процессов и состав образующихся продуктов оказывает временной интервал, который для МВ нагрева значительно выше, чем для термического. В результате состав продуктов реакции для процессов, включающих конкурирующие реакции, может быть различным [12].

Для ускорения процессов пробоподготовки, кислотного сжигания, экстракции различных природных и синтетических образцов создавались различные лабораторные микроволновые установки. На 46-й Питсбургской конференции по аналитической химии и прикладной спектроскопии, проходившей в марте 1995 г. (США, Новый Орлеан), около 20 фирм демонстрировали микроволновые установки, предназначенные для химического анализа. Среди лидеров производства микроволновой техники «СЕМ» (США), «Milestone» (Италия), «Prolabo» (Франция) [23].

Успешное применение микроволновой активации в химии различных гетероциклических соединений описано Н.Н. Романовым и др. [19]. Главное преимущество использования МВИ – уменьшение времени проведения реакций до нескольких минут с увеличением скорости реакции на 2-3 порядка.

Одной из важнейших задач современной неорганической химии и неорганического материаловедения является разработка новых методов синтеза и спекания материалов, позволяющих снизить энергозатраты и увеличить скорость образования конечных продуктов. Начиная с 1970-х гг. появилось большое число работ, посвященных использованию МВ нагревания для спекания различных веществ: от слабо поглощающих оксидов алюминия ( $Al_2O_3$ ) и титана ( $TiO_2$ ) до активно взаимодействующих с МВ полем уже при комнатной температуре карбидов кремния ( $SiC$ ) и бора ( $B_4C$ ), боридов титана ( $TiB_2$ ). Эксперименты по спеканию индивидуальных оксидов (в частности, оксидов алюминия и циркония) в микроволновой установке с частотой излучения 2,45 ГГц впервые были проведены еще в 1976 г. При этом были установлены как преимущества (высокая скорость спекания, равномерное нагревание всего объема образца), так и специфические недостатки микроволновой обработки (сложность измерения температуры и опасность возникновения локальных перегревов) [5].

Доказана эффективность использования МВИ в процессе переработки целлюлозосодержащего сырья. Приведенные в работе [9] данные показали, что в случае МВ нагрева гидролиз целлюлозы протекает быстрее по сравнению с классическим. МВ нагрев оказался примерно в 3-4 раза эффективнее традиционного нагрева в пересчете на выход сахаров.

Одним из актуальных направлений химической переработки растительного сырья, которое с каждым годом вызывает все больший интерес у исследователей всего мира, является химическое модифицирование древесины и непищевой части биомассы однолетних растений без предварительного разделения на отдельные компоненты. В работе М.Ю. Чепрасовой [22] проведено сравнение свойств продуктов реакции карбоксиметилирования древесины осины, полученных в среде различных растворителей под воздействием МВИ и с использованием традиционного нагрева. Продукты карбоксиметилирования растительного сырья, полученные при использовании МВИ, как и продукты, полученные суспензионным способом при традиционном нагреве, проявляют сорбционную емкость по отношению к ионам железа (III) и могут быть использованы в качестве сорбента.

В обзоре [14] рассмотрены основные области применения МВИ в химии и технологии растительного сырья: экстракция из природных растительных объектов низкомолекулярных соединений самых разных классов как в индивидуальном состоянии, так и в виде композиций (например, эфирные масла); выделение высокомолекулярных структурных биополимеров (целлюлоза, лигнин, гемицеллюлозы); процессы высушивания растительных объектов; пиролиз древесины; гидролиз высокомолекулярных компонентов раститель-

ного сырья; химическое модифицирование биополимеров растительного происхождения в целях получения простых и сложных эфиров, а также других производных; химическое модифицирование растительного сырья без предварительного разделения на отдельные компоненты и другие процессы. Показана эффективность МВИ в данных процессах. Отмечено, что оно в целом значительно ускоряет процесс и снижает затраты электроэнергии на его проведение. Приведены примеры реализации описанных процессов в промышленности.

В книге В.С. Побединского [15] обобщены результаты научных исследований отечественных и зарубежных ученых по применению энергии электромагнитных волн СВЧ диапазонов для повышения эффективности технологических процессов текстильного и красильно-отделочного производств (фиксация крутки пряжи, сушка, отварка, беление, карбонизация, крашение и заключительная отделка текстильных материалов). Из работы следует, что применение МВИ при белении содержащих хлопок тканей позволяет получить высокие показатели белизны и капиллярности при сокращении длительности процесса в 20–30 раз. Дополнительно детально исследовано влияние СВЧ излучения (2450 МГц) на свойства хлопчатобумажной ткани. Установлено, что независимо от степени подготовки и влажности текстильного материала СВЧ обработка незначительно влияет на прочностные показатели и эластические свойства хлопчатобумажной ткани.

Необходимость высушивания древесины и пиломатериалов перед их дальнейшим использованием привела к созданию сушильных установок различного типа, микроволновый способ сушки показал свою эффективность и в данном производстве. Сушка древесины заключается в удалении влаги путем испарения. Механические методы обезвоживания к ней не применимы. Ротационное и ультразвуковое обезвоживание недостаточно (до 42...48 %) снижают влажность древесины. Важным преимуществом МВ нагрева является возможность практического применения избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося нагрева обрабатываемого материала [23].

Механизм сушки твердых горючих ископаемых (ТГИ – торф, бурый уголь) под воздействием микроволновой обработки изложен в работе [27]. Вода, присутствующая в ТГИ в виде влаги, обладает очень высокой диэлектрической проницаемостью. Так, если вода входит в материал как свободная (гигроскопическая) влага, то ее диэлектрическая проницаемость составляет около 80,0. Для воды, адсорбируемой в виде монослоя, диэлектрическая проницаемость равна 2,5. При увеличении содержания адсорбируемой жидкости наступает момент, когда адсорбция прекращается, и, наряду со связанной водой, появляется свободная, что увеличивает диэлектрическую проницаемость [21].

Вследствие высокой диэлектрической проницаемости вода поглощает большую часть МВИ, нагревается и начинает интенсивно испаряться. Так как

внутри образца вода находится в замкнутом пространстве, то с началом ее кипения создается избыточное давление, вследствие чего температура кипения воды повышается. Распределение температуры в объеме материала при МВИ создает наиболее благоприятные условия для ускорения диффузии паровоздушной смеси из внутренних слоев материала к периферийным, так как градиенты температуры, давления и концентрации, определяющие скорость диффузии, здесь направлены в одну сторону [7]. Благодаря этому эффективная сушка обрабатываемого материала, во-первых, происходит при меньших энергозатратах, так как здесь не требуется прогрев всей массы материала для достижения интенсивного испарения воды, во-вторых, повышается качество готового продукта за счет уменьшения температуры нагрева материала при его обработке [7].

МВИ перспективно и для применения в горном деле: при оттаивании мерзлых грунтов, разупрочнении и дроблении пород, разделении руды на составляющие, полном извлечении металлов из отходов и шламов [17]. В Якутском НЦ СО РАН (Институт физико-технических проблем Севера, Институт горного дела Севера) под руководством Н.И. Рябеца проведены масштабные исследования диэлектрических свойств мерзлых пород в МВ диапазоне, а также теоретические и экспериментальные исследования оттаивания мерзлых грунтов под воздействием МВИ [23]. Использование СВЧ генераторов улучшает эффективность обработки горных пород и уменьшает затраты на их обработку.

#### *Заключение*

В современной истории науки и техники применение микроволнового воздействия прошло необычный путь – от оборонной промышленности, минуя другие отрасли, в бытовую технику и лишь затем – в науку и промышленность. Внедрение микроволновых технологий в практику сдерживалось отсутствием моделей процессов, протекающих при воздействии МВИ на различные вещества, алгоритмов и автоматизированных систем управления технологическими процессами, методики проектирования микроволновых технологических установок. С появлением дешевых источников МВИ (магнетронов) и разработкой моделей микроволновых технологических процессов МВ технологии стали находить широкое применение в пищевой, медицинской, фармацевтической, целлюлозно-бумажной отраслях народного хозяйства, в промышленности строительных материалов, сельском хозяйстве, горном деле и др. Появляются новые перспективные направления применения микроволновых технологий: исследование химического состава пищевых продуктов (например для определения содержания в них тяжелых металлов); МВ химический синтез лекарственных средств; экология – для очистки грунта от промышленных отходов.

Годовой рынок МВ технологических установок оценивается в более чем 500 млн долл. США [18].

В настоящее время МВИ наиболее широко используют в лабораторной практике при выполнении анализов продуктов питания, технических материалов (сплавы, шлаки, другие отходы производства). Интенсивность проведения таких анализов существенно увеличилась в связи с ростом числа объектов окружающей среды при решении экологических задач и повышением внимания к содержанию в пищевых продуктах различных неорганических и органических примесей.

Кроме того, МВИ применяют во многих промышленных процессах: сушка пищевых продуктов, сушка и склеивание древесины, производство фарфоровых и фаянсовых изделий, строительство, разработка нефтяных месторождений и т. д.

Нагрев МВ излучением отличается высокой скоростью и большой эффективностью. Применение энергии микроволн вместо используемой в настоящее время тепловой энергии теплоносителей в промышленных установках позволяет значительно упростить технологическую схему, исключив процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя, а также вредные выбросы в атмосферу.

Необходимо отметить, что исследования, связанные с определением аспектов воздействия МВИ на протекание ряда химических и нефтехимических процессов, являются важным и актуальным направлением интенсификации этих процессов как на лабораторном уровне, так и в промышленном масштабе.

Ограничения для применения МВИ в промышленности связаны главным образом с отсутствием оборудования промышленного назначения. Все опытно-конструкторские работы заканчиваются на этапе, проводимом на лабораторном оборудовании СВЧ-диапазона. Более широкое внедрение СВЧ-оборудования в различные отрасли возможно при совершенствовании данного класса техники в направлении создания промышленных образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1807587СССР, МКИ Н 05 В 6/64. Установка для обработки грунтовых блоков СВЧ-излучением / Бабин Л.А., Спектор Ю.И., Смирнов Ю.Ю., Гончарова Л.В., Егоров Ю.М., Удалов В.Н., Рагуз В.В.; заявл. 09.08.1989; опубл. 07.04.1993, Бюл. № 13.
2. Бердоносков С.С. Микроволновая химия // Соросовский образоват. журн. 2001. № 1. С. 32–38.
3. Болотов В.А., Черноусов Ю.Д., Удалов Е.И., Танашев Ю.Ю., Пармон В.Н. Особенности проведения высокотемпературных химических реакций под действием сверхвысокочастотного поля // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. 2009. Т. 4, вып. 2. С. 78–83.
4. Большая российская энциклопедия. Режим доступа: [http:// www.bigenc.ru](http://www.bigenc.ru).



5. Ванецев А.С. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия. Описания задач спецпрактикума «Методы получения и анализа неорганических материалов». М.: МГУ, 2011. 32 с.

6. Википедия – сводная энциклопедия. Режим доступа: <http://www.wikipedia.org/>.

7. Данилов О.С., Михеев В.А., Москаленко Т.В. Микроволновая обработка твердых горючих ископаемых // Горн. информ.-аналит. бюл. 2010. № 3. С. 203–208.

8. Денисов О.Л., Спектор Ю.И., Бабин Л.А., Гончаров Б.В. Применение СВЧ-поля для усиления оснований и устройства фундаментов // Тр. Рос. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. 13–15 сент. 1995 г. СПб.: СПбГАСУ, 1995. Ч. 2. С. 277–281.

9. Кисурин И.В., Арапов К.А., Гуцин П.А., Иванов Е.В., Винокуров В.А. Перспективы использования микроволнового излучения в процессе переработки целлюлозо-содержащего сырья // Башк. хим. журн. 2010. Т. 17, № 3. С. 167–170.

10. Коляда В. Прирученные невидимки. Все о микроволновых печах // Наука и жизнь. 2004. № 10. С.136–142.

11. Кубракова И.В. Микроволновое излучение в аналитической химии: возможности и перспективы использования // Успехи химии. 2002. Т. 71, № 4. С. 327–340.

12. Кубракова И.В., Мясоедова Г.В., Еремин С.А., Плетнев И.В., Моходоева О.Б., Морозова В.А., Хачатрян К.С. Подготовка проб в условиях микроволнового нагрева // Методы и объекты хим. анализа. 2006. Т. 1, № 1. С. 27–34.

13. Кузнецов Д.В., Раев В.А., Куранов Г.Л., Арапов О.В., Костиков Р.Р. Применение микроволнового излучения в синтезе органических соединений // Журн. общей химии. 2005. Т. 41, № 12. С. 1757–1787.

14. Маркин В.И., Чепрасова М.Ю., Базарнова Н.Г. Основные направления использования микроволнового излучения при переработке растительного сырья (обзор) // Химия растит. сырья. 2014. № 4. С. 21–42.

15. Побединский В.С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов. Иваново: ИХР РАН, 2000. 127 с.

16. Рахманкулов Д.Л., Бикбулатов И.Х., Шулаев Н.С., Шавишуква С.Ю. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. М.: Химия, 2003. 220 с.

17. Рахманкулов Д.Л., Шавишуква С.Ю., Вихарева И.Н., Чанышев Р.Р. Применение микроволнового излучения для извлечения металлов из промышленных отходов // Башк. хим. журн. 2008. Т. 15, № 2. С. 53–55.

18. Розанов С.В. Исследование процессов массо- и теплопереноса в различных средах под воздействием микроволнового излучения и разработка энергосберегающих микроволновых технологий и установок промышленного применения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 18 с.

19. Романова Н.Н., Кудан П.В., Гравис А.Г., Бундель Ю.Г. Применение микроволновой активации в химии гетероциклических соединений // Химия гетероциклических соединений. 2000. № 10. С. 1308–1320.

20. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. М.: Солон-Пресс, 1998. 268 с.

21. Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Воробьев А.А., Чернышов В.Н. Микроволновая термовлагодетерминация / под. общ. ред. П.А. Федюнина. М.: Машиностроение-1, 2004. 208 с.

22. *Чепрасова М.Ю.* Карбоксиметилирование растительного сырья под воздействием микроволнового излучения: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Барнаул, 2012. 22 с.
23. *Шавиукова С.Ю.* Интенсификация химических процессов воздействием микроволнового излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2003. 24 с.
24. *Gedye R., Smith F., Westaway K. Ali H, Baldisera L, Laberge L, Rousell J.* The Use of Microwave Ovens for Rapid Organic Synthesis // *Tetrahedron Lett.* 1986. Vol. 27. Pp. 279–282.
25. *Giguere R.J., Bray T.L., Duncan S.M., Majetich G.* Application of Commercial Microwave Ovens to Organic Synthesis // *Tetrahedron Lett.* 1986. Vol. 27. Pp. 4945–4948.
26. *Microwave Enhanced Chemistry: Fundamentals, Sample Preparation and Applications.* Ed. by H.M. Kingston, S.J. Haswell. US, Washington DC, 1997.
27. *Mingos D.M.P., Baghurst D.R.* Microwave-Assisted Solid-State Reactions Involving Metal Powders // *Chem. Soc. Rev.* 1991. No. 20. P. 1.
28. *National Research Council. Microwave Processing of Materials.* US, Washington DC, 1994.
29. *Perreux L., Loupy A.* A Tentative Rationalization of Microwave Effects in Organic Synthesis According to the Reaction Medium, and Mechanistic Considerations // *Tetrahedron Lett.* 2001. Vol. 57. P. 9199.
30. *Thiebaut J.M., Roussy G., Medjram M., Seyfield L., Garin F., Maire J.* Durable Changes of the Catalytic Properties of Alumina-Supported Platinum Induced by Microwave Irradiation // *Catal. Lett.* 1993. Vol. 21. P. 133.

Поступила 14.11.16

UDC 621.365

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

### **Opportunities and Prospects of Microwave Radiation in Industry (Review)**

*M.A. Molodtsova, Postgraduate Student, Engineer*

*Yu.V. Sevast'yanova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

Innovative Technological Center “Modern Technologies in Processing of North Biore-sources”, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: m.molodcova@narfu.ru, J.Sevastyanova@narfu.ru

The rapid development of natural sciences, based primarily on a significant expansion of technical capabilities of research and entwinement of the achievements of chemistry, physics, biology and other fields of natural sciences, has been observed in recent decades. This contributed to the appearance of new fields of chemistry (laser chemistry, plasma chemistry, photochemistry, high-pressure chemistry) in the second half of the 20th century. Microwave chemistry as a promising direction, which arose at the intersection of physics and chemistry, joined to these new branches in the last 10...15 years. It includes chemical conversions with participation of solid dielectrics and liquids associated with the use of microwave field ener-

---

*For citation:* Molodtsova M.A., Sevast'yanova Yu.V. Opportunities and Prospects of Microwave Radiation in Industry (Review). *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.173–187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

gy or MW-field. Microwave irradiation (MWI) is capable to accelerate many chemical reactions by a factor of hundreds, cause rapid volumetric heating of liquid and solid samples, efficiently (quickly and completely) remove moisture from solids, including highly porous, drugs and modify the properties of various sorbents. The application of microwave energy instead of currently used thermal energy of heat carriers in industrial installations can significantly simplify the technological schemes, exclude all processes and devices related to the preparation of a heat carrier and reduce harmful emissions into the atmosphere. Limitations for microwave radiation application are mainly due to the lack of equipment for industrial use.

*Keywords:* microwave radiation, super-high-frequency radiation, plant raw material, wood, conventional heating.

#### REFERENCES

1. Babin L.A., Goncharova L.V., Egorov Yu.M., Udalov V.N., Spektor Yu.I., Smirnov Yu.Yu., Raguz V.V. *Ustanovka dlya obrabotki gruntovykh blokov SVCh-izlucheniem* [Installation for the Groundwater Units Treatment by Microwave Radiation]. Certificate of Authorship USSR, no. 1807587, 1993.
2. Berdonosov S.S. *Mikrovolnovaya khimiya* [Microwave Chemistry]. *Sorosovskiy obrazovat. zhurn.* [Soros Educational Journal], 2001, no. 1, pp. 32–38.
3. Bolotov V.A., Chernousov Yu.D., Udalov E.I., Tanashev Yu.Yu., Parmon V.N. *Osobennosti provedeniya vysokotemperaturnykh khimicheskikh reaktsiy pod deystviem sverkhvysokochastotnogo polya* [Features of High-Temperature Chemical Reactions under Microwave Irradiation]. *Vestn. NGU. Seriya: Fizika* [Vestnik of the Novosibirsk State University. Series: Physics], 2009, vol. 4, no. 2, pp. 78–83.
4. *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya* [Great Russian Encyclopedia]. Available at: <http://www.bigenc.ru>.
5. Vanetsev A.S. *Spekanie oksidnykh poroshkov s ispol'zovaniem mikrovolnovogo vozdeystviya. Opisaniya zadach spetspraktikuma «Metody polucheniya i analiza neorganicheskikh materialov»* [Oxide Powder Sintering by Microwave Exposure. Descriptions of Special Practical Problems “Methods of Preparation and Analysis of Inorganic Materials”]. Moscow, 2011. 32 p.
6. *Vikipediya – svobodnaya entsiklopediya* [Wikipedia – Free Encyclopedia]. Available at: <http://www.wikipedia.org>.
7. Danilov O.S., Mikheev V.A., Moskalenko T.V. *Mikrovolnovaya obrabotka tverdykh goryuchikh iskopaemykh* [Microwave Processing of Solid Fuel Fossils]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2010, no. 3, pp. 203–208.
8. Denisov O.L., Spektor Yu.I., Babin L.A., Goncharov B.V. *Primenenie SVCh-polya dlya usileniya osnovaniy i ustroystva fundamentov* [The Use of the Microwave Field to Strengthen the Foundations]. *Tr. Ross. konf. po mekhanike gruntov i fundamentam. 13–15 sentyabrya 1995 g. Sankt Peterburg. Ch. 2* [Proc. Russ. Nation. Conf. on Soil Mechanics and Foundation. Engineering (September 13–15, 1995, St. Petersburg). Part 2]. Saint Petersburg, 1995, pp. 277–281.
9. Kisurin I.V., Arapov K.A., Gushchin P.A., Ivanov E.V., Vinokurov V.A. *Perspektivy ispol'zovaniya mikrovolnovogo izlucheniya v protsesse pererabotki tsellyulozoderzhashchego syr'ya* [Prospects for the Use of Microwave Radiation in the Conversion

of Cellulose]. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, vol. 17, no. 3, pp. 167–170.

10. Kolyada V. Priruchennye nevidimki. Vse o mikrovolnovykh pechakh [Tamed Invisible Creatures. Everything of Microwave Ovens]. *Nauka i zhizn'* [Science and Life], 2004, no. 10, pp. 136–142.

11. Kubrakova I.V. Mikrovolnovoe izluchenie v analiticheskoy khimii: vozmozhnosti i perspektivy ispol'zovaniya [Microwave Radiation in Analytical Chemistry: the Scope and Prospects for Application]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2002, vol. 71, no. 4, p. 327–340.

12. Kubrakova I.V., Myasoedova G.V., Eremin S.A., Pletnev I.V., Mokhodoeva O.B., Morozova V.A., Khachatryan K.S. Podgotovka prob v usloviyakh mikrovolnovogo nagreva [Preparation of Samples under Microwave Heating]. *Metody i ob'ekty khim. analiza* [Methods and Objects of Chemical Analysis], 2006, vol. 1, no. 1, pp. 27–34.

13. Kuznetsov D.V., Raev V.A., Kuranov G.L., Arapov O.V., Kostikov R.R. Primenenie mikrovolnovogo izlucheniya v sinteze organicheskikh soedineniy [The Use of Microwave Radiation in the Organic Compounds Synthesis]. *Zhurn. obshchey khimii* [Russian Journal of General Chemistry], 2005, vol. 41, no. 12, pp. 1757–1787.

14. Markin V.I., Cheprasova M.Yu., Bazarnova N.G. Osnovnye napravleniya ispol'zovaniya mikrovolnovogo izlucheniya pri pererabotke rastitel'nogo syr'ya (obzor) [Basic Directions of Use Microwave Radiation in the Processing of Plant Raw Material (Review)]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Material], 2014, no. 4, pp. 21–42.

15. Pobedinskiy V.S. Aktivirovanie protsessov otdelki tekstil'nykh materialov energiy elektromagnitnykh voln VCh, SVCh i UF diapazonov [The Process Activation of Textile Materials Finishing by the Energy of Electromagnetic Waves of RF, Microwave and Ultraviolet Ranges]. Ivanovo, 2000. 127 p.

16. Rakhmankulov D.L., Bikbulatov I.Kh., Shulaev N.S., Shavshukova S.Yu. *Mikrovolnovoe izluchenie i intensifikatsiya khimicheskikh protsessov* [Microwaves and Intensification of Chemical Processes]. Moscow, 2003. 220 p.

17. Rakhmankulov D.L., Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N., Chanyshv R.R. Primenenie mikrovolnovogo izlucheniya dlya izvlecheniya metallov iz promyshlennykh otkhodov [Application of Microwave Radiation for Extraction of Metals from Industrial Wastes]. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2008, vol. 15, no. 2, pp. 53–55.

18. Rozanova S.V. *Issledovanie protsessov masso- i teploperenosa v razlichnykh sredakh pod vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya i razrabotka energosberegayushchikh mikrovolnovykh tekhnologiy i ustanovok promyshlennogo primeneniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of Mass and Heat Transfer in a Variety of Environments under the Influence of Microwave Radiation and the Development of Energy-Efficient Microwave Technologies and Industrial Application Systems: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Saint Petersburg, 2004. 18 p.

19. Romanova N.N., Kudan P.V., Gravis A.G., Bundel' Yu.G. Primenenie mikrovolnovoy aktivatsii v khimii geterotsiklicheskh soedineniy [The Use of Microwave Activation in Chemistry of Heterocyclic Compounds]. *Khimiya geterotsiklicheskh soedineniy* [Chemistry of Heterocyclic Compounds], 2000, no. 10, pp. 1308–1320.

20. Sapunov G.S. *Remont mikrovolnovykh pechey* [Repair of Microwave Ovens]. Moscow, 1998. 268 p.

21. Fedyunin P.A., Dmitriev D.A., Vorob'ev A.A., Chernyshov V.N. *Mikrovolnovaya termovlagometriya* [Microwave Thermo and Water Content Measurements]. Moscow, 2004. 208 p.

22. Cheprasova M.Yu. *Karboksimetilirovanie rastitel'nogo syr'ya pod vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya*: avtoref. dis. ... kand. khim. nauk [Carboxymethylation of Vegetable Raw Materials under the Influence of Microwave Radiation: Cand. Chem. Sci. Diss. Abs.]. Barnaul, 2012. 22 p.

23. Shavshukova S.Yu. *Intensifikatsiya khimicheskikh protsessov vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Intensification of Chemical Processes by Microwave Irradiation: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Ufa, 2003. 24 p.

24. Gedye R., Smith F., Westaway K. Ali H, Baldisera L, Laberge L, Rousell J. The Use of Microwave Ovens for Rapid Organic Synthesis. *Tetrahedron Lett.*, 1986, vol. 27, pp. 279–282.

25. Giguere R.J., Bray T.L., Duncan S.M., Majetich G. Application of Commercial Microwave Ovens to Organic Synthesis. *Tetrahedron Lett.*, 1986, vol. 27, pp. 4945–4948.

26. *Microwave Enhanced Chemistry: Fundamentals, Sample Preparation and Applications*. Ed. by H.M. Kingston, S.J. Haswell. US, Washington DC, 1997.

27. Mingos D.M.P., Baghurst D.R. Microwave-Assisted Solid-State Reactions Involving Metal Powders. *Chem. Soc. Rev.*, 1991, no. 20, p. 1.

28. *National Research Council. Microwave Processing of Materials*. US, Washington DC, 1994.

29. Perreux L., Loupy A. A Tentative Rationalization of Microwave Effects in Organic Synthesis According to the Reaction Medium, and Mechanistic Considerations. *Tetrahedron Lett.*, 2001, vol. 57, p. 9199.

30. Thiebaut J.M., Roussy G., Medjram M., Seyfield L., Garin F., Maire J. Durable Changes of the Catalytic Properties of Alumina-Supported Platinum Induced by Microwave Irradiation. *Catal. Lett.*, 1993, vol. 21, p. 133.

Received on November 14, 2016



## ЮБИЛЕИ

УДК 06.091

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.188

### ЮБИЛЕЙ ПРОФЕССОРА Н.А. МАКАРЕВИЧА

В феврале 2017 г. отметил свой юбилей Николай Анатольевич Макаревич, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель образования Республики Беларусь, известный ученый в области физикохимии высокомолекулярных соединений.

Родился Николай Анатольевич 18 февраля 1942 г. в Витебской области Белорусской ССР. После окончания средней школы в Перми поступил на физико-математический факультет Пермского государственного педагогического университета, специальность «физика и химия». Преподавал физику в средней школе, позднее высшую математику и физику на вечернем отделении химико-технологического техникума г. Перми. С 1966 г. в должности инженера-ис-

следователя Всесоюзного научно-исследовательского института полимерных материалов занимался разработкой новейших физико-химических методов исследования молекулярно-массового распределения высокомолекулярных соединений специального назначения. В 1974 г., будучи аспирантом Пермского государственного фармацевтического института, предложил и лично выполнил пионерские исследования в принципиально новом направлении гетерогенного катализа – окислительном катализе органических веществ в эвтектических расплавах оксидов переходных металлов, и досрочно защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Исследование свойств расплава  $KVO_3-V_2O_5$  и окисление в нем алифатических спиртов». Выполнил ряд науч-



но-исследовательских работ, посвященных катализу в оксидных и солевых расплавах, разработал промышленные процессы в этой области.

С 1974 по 1984 гг. в должности заведующего лабораторией физическо-химических методов исследования Всесоюзного научно-исследовательского института галургии занимался теоретическим и экспериментальным обоснованием промышленного способа флотационного обогащения сильвинитовых руд Верхнекамского месторождения на производственном объединении «Уралкалий». Имеет крупные промышленные внедрения. С 1984 г. в должности доцента кафедры физической и аналитической химии Пермского политехнического института проводил исследования по разработке, изготовлению и внедрению на производственном объединении «Североникель» эффективных средств индивидуальной и коллективной защиты органов дыхания работников предприятия от кислых газов. В 1987 г. в должности старшего научного сотрудника Института общей и неорганической химии АН БССР (г. Минск) продолжил исследования по обогащению сильвинитовых руд на производственном объединении «Беларуськалий». Под его руководством проведена большая работа по сертификации методик выполнения измерений качества реагентов при входном контроле и готовой экспортной продукции при выходном. В этот период Н.А. Макаревич опубликовал серию работ по термодинамике адсорбции.

С 1992 г. он возглавляет кафедру высшей математики, физики, химии в Военной академии Республики Беларусь (ВА РБ), читает курсы общей, физической, коллоидной, аналитической и специальной химии. В 1993 г. защитил диссертационную работу на соискание ученой степени доктора химических наук по теме «Модельные расчеты адсорбционно-термодинамических характеристик при исследовании межфазовых взаимодействий», выполненную в Институте общей и неорганической химии АН БССР. В 1994 г. Н.А. Макаревичу присвоено звание профессора.

Основательную теоретическую подготовку он получил также на стажировках в Институте химической физики (Москва, Черноголовка, 1968 г.), возглавляемом нобелевским лауреатом, акад. Н.Н. Семеновым; в Ленинградском технологическом институте (1985 г.); на химическом факультете Московского государственного университета (1986 г.); в лаборатории академика М.М. Дубинина Института физической химии РАН (Москва, 1990 г.). Полученными знаниями в различных областях теории и практики гетерогенных процессов Николай Анатольевич щедро делится со студентами, преподавателями, научными сотрудниками, инженерно-техническими работниками России и Белоруссии.

С 1997 г. в должности главного научного сотрудника Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН) он выполняет иссле-

дования по темам: «Структура и свойства технических и модифицированных лигнинов» (№ 01.960.009723), «Синтез и свойства наноструктур на основе лигнина» (№ 01.2.00607686) и др. С 2012 г. – профессор кафедры химии и химических технологий Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, занимается экологическими проблемами, биоконверсией лигнинов, биорефайнингом растительного сырья Архангельского Севера, утилизацией и эффективным использованием многотоннажных лигнинсодержащих и других отходов целлюлозно-бумажных производств с получением ценнейших функциональных наноматериалов нового поколения – адсорбентов и полиэлектролитных комплексов на основе биополимеров растительного и животного происхождения.

Как автор общей теории ассоциированных растворов, теории ассоциативной адсорбции неионных и ионных поверхностно-активных веществ из растворов, новых уравнений изотерм адсорбции, дифференциальных теплот адсорбции, адсорбционной активности, полученных в различных модельных приближениях, теории реальной адсорбции, уравнений диффузионной кинетики адсорбции, экстракции и сушки, он хорошо известен в России и за рубежом.

Участвовал в более чем в 70 международных симпозиумах и конференциях. С 1992 г. является членом Международного общества по адсорбции, с 1993 г. – действительным членом Нью-Йоркской академии наук.

Под руководством и при консультации Н.А. Макаревича защищено 8 кандидатских и 2 докторских диссертации. Его ученики успешно трудятся в институтах РАН и НАН Беларуси, в системе высшего образования и на ведущих промышленных предприятиях России и Белоруссии.

Николай Анатольевич – автор и соавтор 3 учебников по общей и специальной химии, основам экологии и радиационной безопасности, 3 монографий (в том числе «Структура и физико-химические свойства лигносульфонатов» (2005), «Экология северных территорий» (2014)), около 10 учебных пособий (среди них электронное – «Теоретические основы адсорбции» (2015)) и около 400 научных публикаций в отечественных и зарубежных изданиях.

Член диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора технических и химических наук Д21200802 (специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева, химия древесины»).

Заслуги Н.А. Макаревича отмечены золотой медалью Выставки достижений народного хозяйства, почетными грамотами Президиума РАН (Уральское отделение), Администрации Архангельской области и Архангельского областного собрания депутатов, дипломами победителя конкурса



им. М.В. Ломоносова и почетного педагога ВА РБ. Его биография опубликована в Большой белорусской энциклопедии.

Всегда приветливый, доброжелательный, отзывчивый и полный оптимизма Николай Анатольевич пользуется заслуженным авторитетом и глубоким уважением в коллективах, в которых он трудится.

От всей души поздравляем Николая Анатольевича Макаревича со знаменательным юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, долголетия, неиссякаемого оптимизма, новых творческих успехов в науке, активной и плодотворной жизни!

*Н.И. Богданович<sup>1</sup>, С.И. Третьяков<sup>1</sup>, В.С. Комаров<sup>2</sup>, В.И. Мелехов<sup>1</sup>,  
Н.А. Кутакова<sup>1</sup>, Л.Н. Кузнецова<sup>1</sup>, Е.А. Лагунова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>НАН Беларуси

UDC 06.091

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.188

#### **The Anniversary of Professor N.A. Makarevich**

*N.I. Bogdanovich<sup>1</sup>, S.I. Tret'yakov<sup>1</sup>, V.S. Komarov<sup>2</sup>, V.I. Melekhov<sup>1</sup>, N.A. Kutakova<sup>1</sup>,  
L.N. Kuznetsova<sup>1</sup>, E.A. Lagunova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

<sup>2</sup>The National Academy of Sciences of Belarus

«Лесной журнал» публикует научные статьи по всем отраслям лесного дела, сообщения о внедрении законченных исследований в производство, о передовом опыте в лесном хозяйстве и лесной промышленности, информацию о научной жизни высших учебных заведений, рекламные материалы и объявления. Предназначается для научных работников, аспирантов, инженеров лесного хозяйства и лесной промышленности, преподавателей и студентов.

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
«ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ» № 2/356

**Подписной индекс: 70368, 93510**

Выпускающий редактор И.В. Кузнецова, редактор Л.С. Окулова  
Компьютерная верстка О.В. Деревцовой, Е.Б. Красновой  
Перевод Е.Г. Кузнецовой

---

Сдан в набор 10.02.2017. Подписан в печать 21.03.2017. Заказ № 5130  
Форм. бум. 70×108 1/16. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 15,980.  
Уч.-изд. л. 10,620. Тираж 1000 экз.  
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

---

Адрес редакции: 163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17,  
тел./факс: +7 (818-2) 28-76-18,  
e-mail: forest@narfu.ru, <http://lesnoizhurnal.ru/>

---

Свидетельство о регистрации средств массовой информации ПИ № ФС77-68484 от 27.01.2017.

Издательский дом им. В.Н. Булатова САФУ  
163060, г. Архангельск, ул. Урицкого, 56

© ИВУЗ, «Лесной журнал», 2017

“Lesnoi Zhurnal” publishes scientific articles covering all areas of forestry, updates its readers on the use of completed research in production and on the best practice in forest industry and management. On its pages you can also find information about scientific activities at higher educational institutions, as well as advertisements and announcements. The journal is intended for scientists, PhD students, forestry engineers, university and college faculty, and students.

BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS  
“LESNOY ZHURNAL” no. 2/356

**Subscription index: 70368, 93510**

Executive editor I.V. Kuznetsova, editor L.S. Okulova  
Make-up by O.V. Derevtsova, E.B. Krasnova  
Translator E.G. Kuznetsova

---

Sent to the printer's 10.02.2017. Signed in print 21.03.2017. Order no. 5130  
Paper format 70×108 1/16. Times Font. Conv. printer's sh. 15.980.  
Acad. publ. sh. 10.620. Circulation 1000 copies.  
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

---

Contacts: 17 Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russia,  
phone/fax +7 (8182) 28-76-18,  
e-mail: forest@narfu.ru, <http://lesnoizhurnal.ru/>

---

Registration certificate ПИ № ФС77-68484 issued on 27.01.2017.

NArFU Publishing House under name of V.N. Bulatov  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
“Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”  
56 Uritskogo St., Arkhangelsk, 163060



© ИВУЗ, “Лесной журнал”, 2017

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
«Лесной журнал»

СЕНТЯБРЬ  
SEPTEMBER 5–7 КРАСНОЯРСК  
KRASNOYARSK

ВЕДУЩИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ПО ДЕРЕВООБРАБОТКЕ В РОССИИ!



XIX МЕЖДУНАРОДНАЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

**ExpoDrev  
Russia 17**  
KRASNOYARSK

INTERNATIONAL SPECIALIZED EXHIBITION

ИТОГИ  
ВЫСТАВКИ 2016:

Площадь экспозиции: **6850 кв. м.**  
Количество экспонентов: **111**, из них **28** зарубежных компаний.  
География экспонентов: **14** стран и **19** регионов России.

- **ОБОРУДОВАНИЕ**
  - **ТЕХНОЛОГИИ**
  - **ИНСТРУМЕНТ**
  - **ОСНАСТКА**
- ДЛЯ ДЕРЕВООБРАБОТКИ,  
ЛЕСОЗАГОТОВКИ,  
МЕБЕЛЬНЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ

0+

МВДЦ «Сибирь»  
г. Красноярск, ул. Авиаторов, 19  
тел.: (391) 22-88-561, 22-88-611  
expodrev@krasfair.ru



Организаторы:



Официальные партнеры:



Лицензионный  
интернет-партнер:



Подписка на II полугодие 2017 г.  
на «Лесной журнал» принимается по каталогам  
Агентства «Роспечать» «Газеты. Журналы»(индекс 70368),  
«Пресса России»,  
серия «Известия высших учебных заведений»(индекс 93510).

Адрес редакции: 163002, Россия,  
г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.  
Тел./факс: (818-2) 28-76-18  
E-mail: forest@narfu.ru

ISSN 0536 – 1036

DOI:10.17238/issn0536–1036

Изв. вузов. Лесной журнал, № 2, 1 – 191