

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

3/363

2018

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Билей П.В., д-р техн. наук, проф., акад. ЛАН Украины (Украина, Львов)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Орно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
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)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Романов Е.М., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёренсен У.Я., 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)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Черная Н.В., д-р техн. наук, проф. (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)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

3/363

2018

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)
ANGELSTAM P. – Deputy Editor-in-Chief of the European department, PhD, Prof. (Sweden, Skinnskatteberg)
KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

MEMBERS OF THE EDITORIAL STAFF:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Biley P.V., Doctor of Engineering, Prof., Member of the Forest Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Lviv)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Malygin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Severodvinsk)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Moiseev N.A., Doctor of Agriculture, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Romanov E.M., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., 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, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Chernaya N.V., Doctor of Engineering, Prof. (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)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>В.М. Лебедев, Е.В. Лебедев.</i> Функционирование листового аппарата, корневой системы и биологической продуктивности лиственницы сибирской на уровне организма в онтогенезе (на примере лиственничников Архангельской области).....	9
<i>Б.А. Кентбаева.</i> Пылеулавливающая способность листовых пластинок боярышника.....	20
<i>А.В. Кулькова.</i> Корреляция показателей корнеобразования и пострегенерационного развития черенков ели европейской (<i>Picea abies</i> (L.) Н. Karst.).....	28
<i>Д.В. Логунов.</i> Сезонная динамика основных пигментов в хвое некоторых представителей рода лиственница (<i>Larix</i> Mill.) в условиях Нижегородской области.....	37
<i>А.О. Есичев.</i> Корреляция признаков пигментного состава хвои представителей рода лиственница (<i>Larix</i> Mill.) в дендропарке Сергачского лесничества Нижегородской области.....	43
<i>Л.В. Зарубина, В.Н. Коновалов.</i> Динамика накопления пластидных пигментов у подростка ели при онтогенезе березняка черничного.....	54
<i>Г.В. Давыдова, И.В. Ласкин.</i> Леса Иркутской области: есть ли баланс между выбытием и восстановлением?.....	65
<i>А.П. Ковалев, М.А. Шешуков, В.В. Позднякова.</i> Метод восстановления кедровых лесов на Дальнем Востоке.....	77
<i>Р.С. Хамитов, М.А. Андропова, А.М. Антонов.</i> Изменчивость сосны кедровой сибирской по урожайности шишек в условиях интродукции.....	84

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>С.Н. Орловский.</i> Технология подкорневого полива саженцев лесных культур полезащитных полос.....	92
<i>А.В. Абузов, П.Б. Рябухин.</i> Исследование процесса колебаний грузовой подвески лесотранспортной аэростатно-канатной системы.....	103

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>Е.В. Микрюкова, А.С. Торопов, В.М. Пекменов.</i> Исследование объемного выхода пиломатериалов при распиловке бруса параллельно образующей.....	117
<i>Ш.Г. Зарипов.</i> Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в лиственничных пиломатериалах при сушке.....	127

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- А.Е. Присмакова, А.Б. Дягилева, А.И. Смирнова.* Реологические свойства сульфатного лигнина, модифицированного золь-гель методом..... 137
- С.И. Третьяков, А.А. Глуханов.* Оптимизация промывки сульфатного мыла кислой водой и оценка соответствия качества получаемого таллового масла требованиям стандартов..... 149
-



CONTENTS

FORESTRY

V.M. Lebedev, E.V. Lebedev. Functioning of the Leaf Apparatus, Root System and Biological Productivity of Siberian Larch on the Level of the Organism in Ontogeny (the Case of Larch Forests of the Arkhangelsk Region).....	9
B.A. Kentbaeva. Dust-Catching Capacity of the Hawthorn Leaf Blade.....	20
A.V. Kul'kova. Correlation of Indices of Root Formation and Post-Regeneration Development of Cuttings of Norway Spruce (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.).....	28
D.V. Logunov. Seasonal Dynamics of Basic Needle Pigments of Some Representatives of the Genus Larch (<i>Larix</i> Mill.) in a Climate of the Nizhny Novgorod Region.....	37
A.O. Esichev. Correlation of Characteristics of the Needle Pigment Combination of Representatives of the Genus Larch (<i>Larix</i> Mill.) in the Arboretum of the Sergachsky Forestry in the Nizhny Novgorod Region.....	43
L.V. Zarubina, V.N. Kononov. Accumulation Dynamics of Plastid Pigments in Spruce Undergrowth in Ontogenesis of the Bilberry Birch Forest.....	54
G.V. Davydova, I.V. Laskin. Forests of the Irkutsk Region: is there a Balance between Disposal and Recovery?.....	65
A.P. Kovalev, M.A. Sheshukov, V.V. Pozdnyakova. Regeneration Method of Cedar Forests in the Far East.....	77
R.S. Khamitov, M.A. Andronova, A.M. Antonov. Variability of Siberian Stone Pine Cone Production under Conditions of Introduction.....	84

WOOD EXPLOITATION

S.N. Orlovskiy. Technology of Deep Root Irrigation of Forest Seedlings in Shelterbelts.....	92
A.V. Abuzov, P.B. Ryabukhin. Investigation of Cargo Suspension Oscillations of the Timber-Hauling Aerial Logging System.....	103

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD
AND WOOD SCIENCE

E.V. Mikryukova, A.S. Toropov, V.M. Pekmenov. Study of the Board Output from the Saws when Cant Sawing Parallel to Generatrix.....	117
Sh.G. Zaripov. Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying.....	127

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- A.E. Prismakova, A.B. Dyagileva, A.I. Smirnova.* Rheological Properties of Sulfate Lignin Modified by the Sol-Gel Method..... 137
- S.I. Tret'yakov, A.A. Glukhanov.* Optimization of Sulphate Soap Washing with Acid Water and the Quality Conformance Assessment of Tall Oil with Regulatory Requirements..... 149
-



УДК: 581.43:631.811:630*161.32:676.032.14

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.9

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЛИСТОВОГО АППАРАТА, КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ НА УРОВНЕ ОРГАНИЗМА В ОНТОГЕНЕЗЕ (НА ПРИМЕРЕ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)**В.М. Лебедев, д-р с.-х. наук, проф.**Е.В. Лебедев, канд. биол. наук, доц.*

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, пр. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; e-mail: proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru

Для получения количественных данных о работе листового аппарата и корневой системы, а также показателей биологической продуктивности и депонирования углерода растениями лиственницы сибирской в онтогенезе использованы экологические, физиологические, агрохимические и балансовые методы исследования, а также характеристики почвенно-климатических условий мест произрастания и собственные результаты модельных опытов авторов. Табличные данные массы корней, хвои, стволов и сучьев, приведенные на 1 га для древостоев Ia–V классов бонитета Архангельской области, пересчитывали на среднее (по массе) растение по возрастам. Биологическую продуктивность определяли по относительному увеличению сухой массы растения в сравниваемых периодах, чистую продуктивность фотосинтеза – по формуле, приведенной А.А. Ничипоровичем (1955), минеральную продуктивность – по В.М. Лебедеву (1998). Установлен характер реакции растений на истощение почвенных ресурсов с возрастом, затрагивающий физиологические, функциональные и морфологические процессы и биологическую продуктивность растений. В древостоях всех классов бонитета с 25 до 300 лет отмечено снижение чистой и биологической продуктивности фотосинтеза и депонирования углерода в зависимости от бонитета соответственно в 4,1–8,1; 15,7–19,9 и 5,6–10,7 раза, поглощения азота, фосфора и калия – соответственно в 20,4–42,2; 24,3–53,1 и 24,0–50,2 раза. Показатели резко изменялись до возраста 75–80 лет, после чего относительно стабилизировались, оставаясь на низком уровне. При этом отношение корневого потенциала к фотосинтетическому в течение онтогенеза увеличилось в 4,5–5,4 раза. За счет этого усилилось снабжение растения элементами питания для поддержания фотосинтеза, биологическая продуктивность снижалась не так резко,

*Статья подготовлена по материалам международного симпозиума «Лесное хозяйство: интеграция и вклад в развитие сельских территорий» (15–16 мая 2018 г., г. Нижний Новгород).

Для цитирования: Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Функционирование листового аппарата, корневой системы и биологической продуктивности лиственницы сибирской на уровне организма в онтогенезе (на примере лиственничников Архангельской области) // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 9–19. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.9

как чистая продуктивность фотосинтеза и минеральная продуктивность. Представленные материалы существенно дополняют знания о биологии древесных растений, способствуют расширению исследований в области экологии и физиологии древесных растений и служат теоретической основой для разработки агротехнических приемов управления продукционным процессом. Предложенный комплексный физиологический анализ таблиц фитомассы древостоев позволяет получать количественные данные о работе листового аппарата и корневой системы древесных растений на уровне организма в онтогенезе, устанавливать характер их взаимосвязи. В древостоях всех бонитетов в ответ на снижение поглощения минеральных элементов активизировалась неспецифическая адаптивная реакция, приводящая к росту активной части корневой системы относительно поверхности хвои для увеличения подачи элементов в надземную часть в целях поддержания фотосинтеза на жизненно необходимом уровне и стабилизации биологической продуктивности.

Ключевые слова: лиственница, корневое питание, фотосинтез, уровень организма, продуктивность, онтогенез.

Введение

В связи с антропогенным изменением климата оценка биологической продуктивности лесов и депонирования углерода выходит на глобальный уровень. Восстановление нарушенного углеродного баланса биосферы за счет увеличения площади лесов имеет предел. Поэтому изучение путей повышения продуктивности лесов особенно актуально.

Интегральным показателем действия внешних факторов на лесные экосистемы является продуцирование биомассы. Наземные растения, обитая на границе атмосферы и литосферы, имеют два физиологически активных органа – листовую аппарат и корневую систему, количественные показатели которых необходимы для управления продукционным процессом на биологической основе. Чаще всего этот вопрос изучался на небольших растениях, так как для растущих в лесу деревьев получить взаимосвязанные количественные данные о работе листового аппарата и корневой системы чрезвычайно сложно. Используя опубликованные таблицы данных по сухой массе древостоев (включая ствол с корой, хвою, ветви и корни) различного возраста [15], экологические, физиологические, агрохимические, почвенно-климатические характеристики мест произрастания [3, 5], также балансовый метод, апробированный нами на лесных породах [10], проведен их комплексный физиологический анализ и получены количественные данные о работе листового аппарата и корневой системы на уровне организма в онтогенезе.

Объекты и методы исследования

Физиологическому анализу подвергли табличные данные сомкнутых естественных лиственничников (*L. sukaczewii* Dylis) Ia–IV бонитетов Архангельской области [15]. За длительность вегетации принят безморозный период – 120 сут, так как отрицательные температуры повреждают пигментную систему хвои, резко снижая ее работу [18]. Приход фотосинтетически активной радиации (ФАР) за это время, рассчитанный нами по коэффициентам [7] с использованием температурных данных для г. Архангельска, составил $18\ 026\ \text{кал/см}^2$ [13], осадки – 450 мм/год. Почвы подзолистые и тундрово-глеевые, климат суровый [3], Возрастной период – от 20 до 300 лет (интервалы: от 20 до 100 лет – 10 лет; от 100 до 200 лет – 20 лет; от 200 до 300 лет – 40 лет).

У типичных экземпляров лиственницы разных возрастов в пятикратной повторности отбирали образцы хвои, ветвей, древесины (с корой) и корней, группировали их по органам, сушили и определяли общепринятыми агрохимическими методами содержание азота, фосфора и калия (N, P и K). Потребность в элементах при формировании единицы биомассы в пределах вида достаточно стабильна и контролируется генетически, несмотря на варьирование условий произрастания [14, 20], так как метаболизм требует строго нормированного количества элементов [4, 6]. Исходя из этого определенное нами у типичных экземпляров растений (Поволжский регион) содержание элементов в биомассе лиственницы можно использовать на уровне организма в различных условиях (в других регионах). Содержание N, P и K в биомассе дерева рассчитывали для древостоев каждого возраста [15] с учетом соотношения массы органов и концентрации в них элементов. По вычисленным нами коэффициентам [1] с опорой на морфометрию хвои лиственницы [11] определяли поверхность хвои в единице ее сухой массы. Табличные данные по массе корней, хвои, стволов и сучьев, приведенные на 1 га [15], пересчитывали на среднее (по массе) растение по возрастам. Чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ, г/(м·дн.)) рассчитывали по следующей формуле [12]:

$$\text{ЧПФ} = \frac{P_2 - P_1}{\left(\frac{S_1 + S_2}{2} \right) T}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 – сухая масса растений в начале и в конце возрастного периода, г;
 S_1 и S_2 – поверхность хвои растений в начале и в конце возрастного периода, м²;
 T – длительность возрастного периода, дн.

Выражение в знаменателе формулы (1) является фотосинтетическим потенциалом (ФП, м²·дн.), характеризующим поверхность хвои, работавшей за возрастной период. Депонирование углерода (ДУ) единицей поверхности хвои определяли по [2], на 1 га – умножая его количество, накопленное 1 м² поверхности хвои за вегетацию, на среднюю поверхность хвои за сравниваемый период. Биологическую продуктивность (БП) находили по относительному увеличению сухой массы растения за сравниваемый период [9].

В расчете активной поверхности корней всего растения за основу приняты результаты наших микрополевых опытов с лиственницей [10]. В силу высокого постоянства показателей морфологии активных корней в пределах растения (диаметра, длины активного корня, удельной активной поверхности корневой системы (УАПКС, см²·м), приходящейся на 1 м длины сухой корневой пряди диаметром 2...3 мм) активную поверхность корней целого растения определяли умножением УАПКС на число метров активных корней в единице массы пряди и на массу корневой системы всего растения в виде прядей. Отношение корневого потенциала (КП) к фотосинтетическому (ФП) в наших опытах в среднем составляло 0,35. В функциональном отношении это значит, что 1,0 м² активной поверхности корней обслуживал 2,9 м² поверхности хвои. Используя средние значения отношения поверхности активных корней к поверхности хвои, полученные нами в модельных опытах [10], рассчитывали

поверхность активных корней всего растения и долю их в массе корней в каждом возрасте. Установлено, что активная часть корневой системы не превышала 3 % от массы корней растения. Эту долю и использовали в расчетах.

Полученные данные о КП в каждом возрастном периоде позволили вычислить минеральную продуктивность (МП, мг/(м²·сут)) – количество минерального элемента, поглощенного единицей активной поверхности корней [8]:

$$\text{МП} = \frac{M_2 - M_1}{\text{КП}}, \quad (2)$$

где M_1 и M_2 – содержание элемента в массе растений в начале и в конце возрастного периода, мг;

КП – активная поверхность корней, функционировавшая за возрастную период T , м²·сут,

$$\text{КП} = \frac{S_1 + S_2}{2} T, \quad (3)$$

S_1 и S_2 – поверхность корней растений в начале и в конце возрастного периода, м²;

T – длительность возрастного периода, сут.

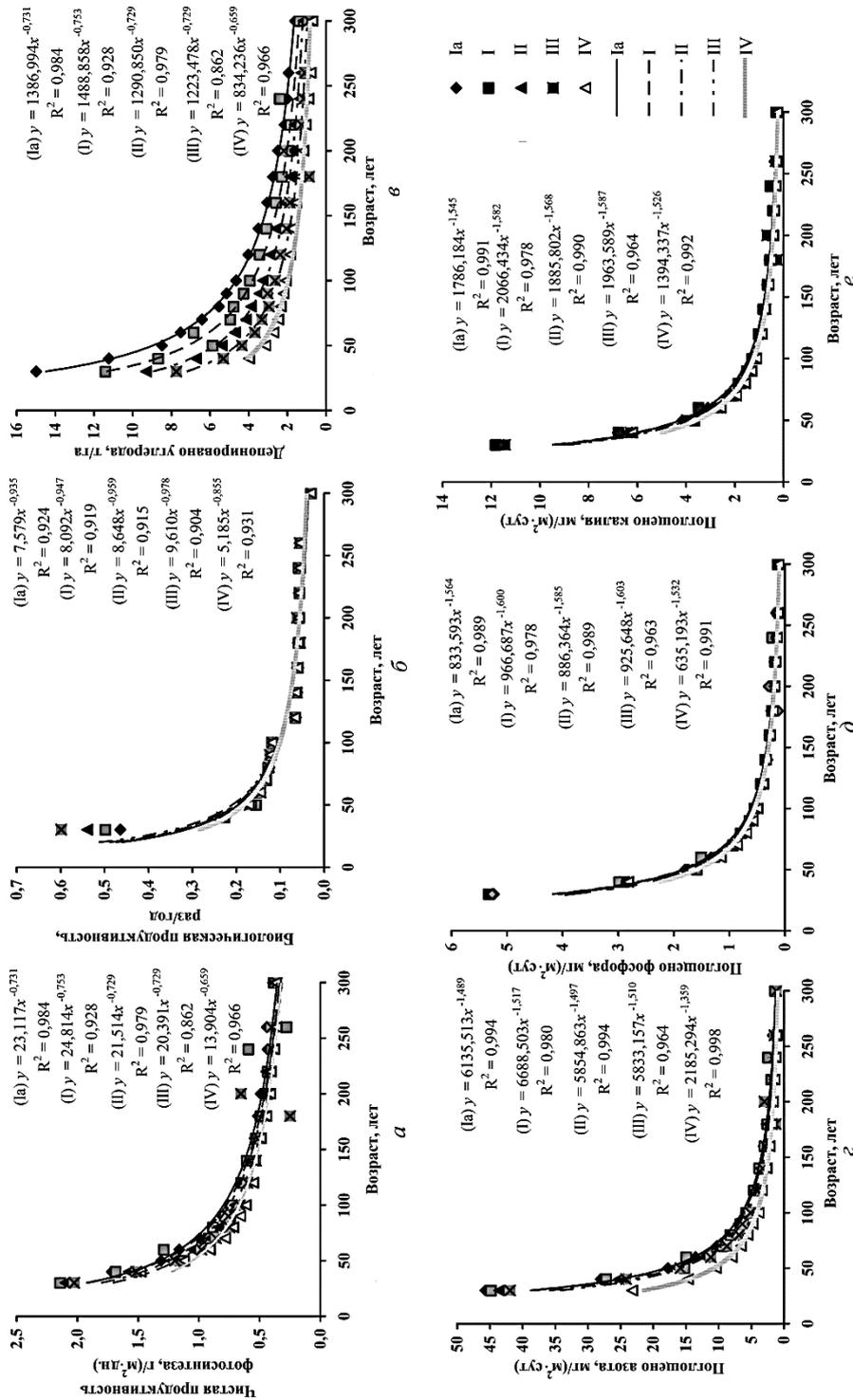
Возможность такого подхода основана на том, что древесные растения – модулярные организмы, развитие которых сводится к росту числа модулей, выполняющих различные функции. Надземные и подземные модули первого уровня всегда молоды и функционально взаимосвязаны. Поэтому у модулярного организма физиологические функции листьев и корней первичного строения у растений разного возраста идентичны [16]. Листовой (ЛИ) и корневой (КИ) индексы вычисляли как отношение поверхностей хвои и активной части корневой системы растения к площади его питания.

Результаты исследования обработаны с использованием корреляционного и регрессионного методов анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

С возрастом в древостоях всех бонитетов от 20 до 300 лет ЧПФ, БП и ДУ снижались соответственно в 4,1–8,1; 15,7–19,9 и 5,6–10,7 раза (рис. 1).

При этом показатели ЧПФ и ДУ изменялись от Ia к IV бонитету сильнее, чем БП. Связь ЧПФ, БП и ДУ с возрастом у всех бонитетов была отрицательной (соответственно $r = -0,772...-0,815$; $-0,466...-0,583$ и $-0,826...-0,929$). Показатели резко падали до возраста 75–80 лет, после чего наступала относительная стабилизация. С возрастом уменьшалось и поглощение N, P и K (соответственно в 20,4–42,2; 24,3–53,1 и 24,0–50,2 раза). Минимальными были значения МП в древостое IV бонитета. Связь МП с возрастом была отрицательной ($r = -0,685...-0,756$; $-0,652...-0,734$ и $-0,661...-0,766$ соответственно для N, P и K). МП резко падала у растений всех бонитетов к возрасту 75 лет и оставалась крайне низкой, что свидетельствует о сильной исчерпанности к этому времени минеральных почвенных ресурсов и о решающем влиянии активности корней на ЧПФ и БП.



Для удобства анализа взаимосвязь ЧПФ, БП и МП и отношения КП/ФП приведены в одном масштабе – в процентах от максимального значения (рис. 2).

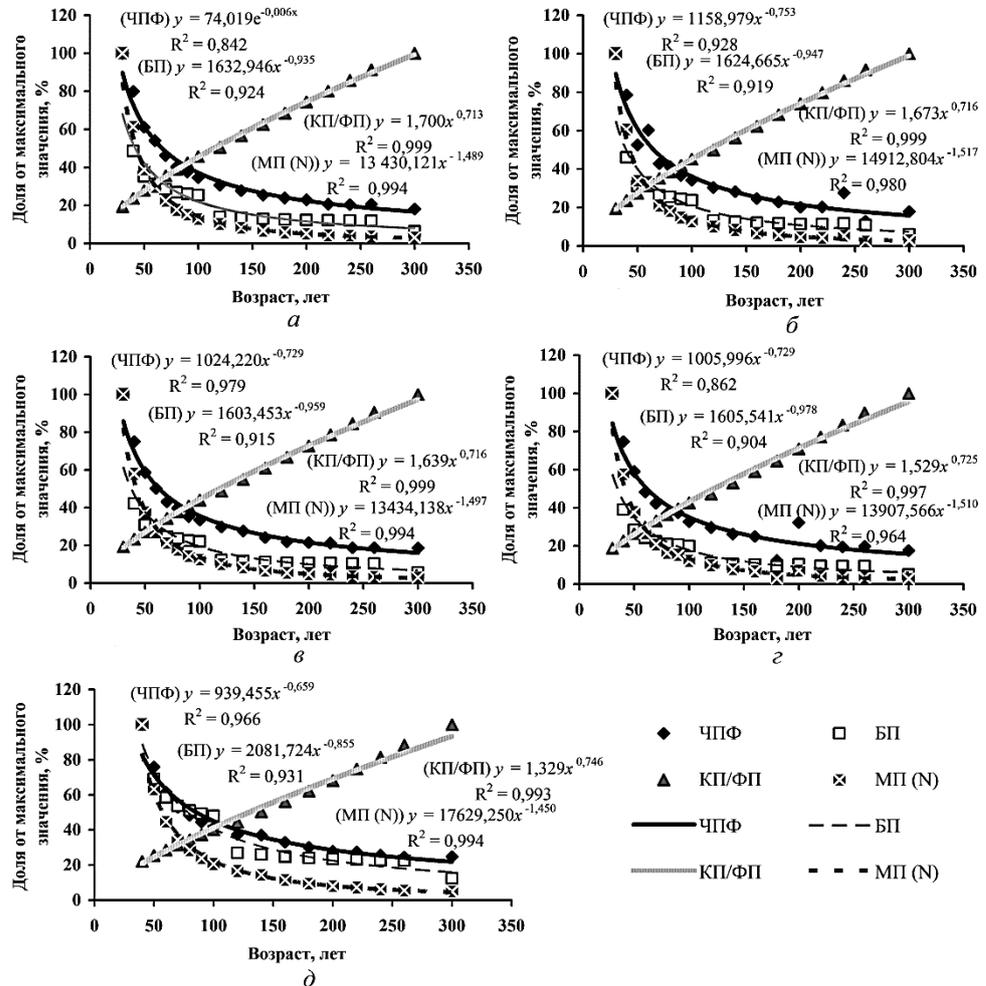


Рис. 2. Характер взаимосвязи основных физиологических показателей растений в лиственничных древостоях Архангельской области Ia (а), I (б), II (в), III (г) и IV (д) классов бонитета

Показатели сравнивали с поглощением азота – ведущего элемента питания. Связь МП с ЧПФ и БП в насаждениях всех классов бонитетов была высокой положительной ($r = 0,975...0,994$; $0,961...0,989$ и $0,965...0,990$ соответственно для N, P и K). Падение МП и ЧПФ отразилось и на БП ($r = 0,964...0,979$; $0,955...0,982$ и $0,957...0,981$ соответственно для N, P и K), которая, однако, падала не так резко, как ЧПФ и МП, в силу неспецифической адаптивной реакции растений на снижение МП, выразившейся в увеличении КП/ФП в пользу корней во всех классах бонитета в 4,5–5,4 раза, что усилило снабжение растения элементами питания для поддержания фотосинтеза и стабилизировало БП от 75 до 300 лет. Связь КП/ФП с возрастом была высокой положительной ($r = 0,998...0,999$). Функциональная связь корней с листовым аппаратом с возрастом падала, так как единица поверхности корней обслуживала все меньшую поверхность хвои.

Снижение поглощения азота сопровождалось ростом КП/ФП ($r = -0,702...-0,748$). Связи КП/ФП с ЧПФ и БП также были обратными (соответственно $r = -0,842...0,785$ и $-0,642...-0,830$). Адаптивная реакция активизировалась во всех условиях с 25 лет, когда корни поглощали N от 45,7 до 23,2; P – от 5,2 до 2,8; K – от 11,7 до 6,2 мг/(м²·сут), и продолжала работать до 300 лет при снижении МП до 1,4...1,1; 0,12...0,10 и 0,31...0,24 мг/(м²·сут) соответственно для N, P и K. В молодом возрасте МП у древостоев Ia и IV классов бонитета различалась почти в 2 раза, после 75–80 лет она была практически на одном, крайне низком уровне. Следовательно, с возрастом растущая нехватка элементов приводила к увеличению активной поверхности корней относительно площади листьев. Реакцию растений на низкую физиологическую активность корней можно объяснить низкой в естественных условиях концентрацией большинства элементов в почвенном растворе – $10^{-3}...10^{-4}$ М, а фосфора – $10^{-5}...10^{-6}$ М [17]. Растворимые в воде их формы лишь частично покрывают общую потребность, большинство же движется к корню благодаря диффузии [19], лимитирующей скорость поглощения, особенно на холодных почвах [21]. Поглощение элементов зависит от концентрации почвенного раствора, скорости диффузии около поверхности корня, площади поверхности и интенсивности работы активных корней. При низких концентрациях и скорости диффузии элементов растения не могли существенно усилить поглощение и экстенсивно наращивали поверхность корней относительно поверхности хвои в целях увеличения МП для поддержания фотосинтеза и БП. Листовые и корневые индексы в онтогенезе у всех бонитетов изменялись соответственно в 1,6–1,9 и 3,0–3,6 раза. Связь ЛИ с возрастом была обратной ($r = -0,698...-0,987$), КИ – высокой положительной ($r = 0,905...0,941$). Между ЛИ и БП отмечена положительная связь ($r = 0,204...0,628$), между КИ и БП – отрицательная ($r = -0,773...-0,947$).

Заключение

Предложенный комплексный физиологический анализ таблиц фитомассы древостоев позволяет получить количественные данные о работе листового аппарата и корневой системы древесных растений на уровне организма в онтогенезе, установить характер их взаимосвязи, что существенно расширяет знания о биологии древостоев и может служить теоретической основой при разработке технологических приемов повышения продукционного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессчетнов В.П., Лебедев Е.В. Фотосинтез и биологическая продуктивность лесообразующих пород Волго-Вятского региона // Актуальные проблемы лесного хозяйства и рациональное использование природных ресурсов Нижегородской области. Н. Новгород: НГСХА, 2002. С. 107–116.
2. Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Кузин С.Н. Углеродный цикл в еловых экосистемах северной тайги // Экология. 2006. № 1. С. 23–31.
3. Географический энциклопедический словарь: Географические названия. М.: Сов. энцикл., 1983. 528 с.
4. Ильин В.Б. Элементарный химический состав растений. Факторы его определяющие // Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. «Биол. науки». 1977. № 10, вып. 2. С. 3–14.
5. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.

6. Лавриченко В.М. Соотношение элементов питания в растениях как видовое генотипическое понятие // Вестн. с.-х. науки. 1971. № 7. С. 129–134.
7. Лебедев В.М. Минеральное питание и биологическая продуктивность яблони: дис. ... д-ра с.-х. наук. Мичуринск, 1985. 553 с.
8. Лебедев В.М. Определение активной поверхности и минеральной продуктивности корневой системы плодовых и ягодных культур // Методика исследования и вариационная статистика в научном плодоводстве: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф., Мичуринск, 25–26 марта 1998 г. Мичуринск: Изд-во МГСХА, 1998. Т. 2. С. 39–42.
9. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Сравнительное определение продуктивности лесных пород // Нетрадиционные и редкие растения, природные соединения и перспективы их использования: VII междунар. симпозиум, Белгород, 24–27 мая 2006 г. Белгород: Политекра, 2006. Т. 1. С. 213–216.
10. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Морфологические, функциональные и физиологические особенности активной части корневой системы лесообразующих пород Волго-Вятского региона // Агрехимия. 2011. № 4. С. 38–44.
11. Логунов Д.В. Экологические особенности роста и развития представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в условиях антропогенных ландшафтов Нижегородской области: дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2002. 287 с.
12. Ничипорович А.А. О методах учета и изучения фотосинтеза как фактора урожайности // Тр. ИФР АН СССР. 1955. Т. 10. С. 210–249.
13. Погода и климат. Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/22550.htm> (дата обращения: 01.03.2018).
14. Придача В.Б. Соотношение N:P:K как гомеостатический показатель функционального состояния хвойных растений в разных экологических условиях: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2002. 24 с.
15. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с.
16. Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. Ecology: Individuals, Populations and Communities. Wiley-Blackwell, 1996. 1068 p.
17. Cox G.W., Atkins M.D. Agricultural Ecology. An Analysis of World Food Production Systems. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979. 721 p.
18. Lundmark T., Bergh J., Strand M., Koppel A. Seasonal Variation of Maximum Photochemical Efficiency in Boreal Norway Spruce Stands // Trees. 1998. Vol. 13, iss. 2. Pp. 63–67.
19. Nye P.H., Tinker P.B. Solute Movement in the Soil-Root System. Berkeley: University of California Press, 1977. 342 p.
20. Pollmer W.G., Eberhard D., Klein D., Dhillon B.S. Genetic Control of Nitrogen Uptake and Translocation in Maize // Crop Science. 1979. Vol. 19, iss. 1. Pp. 82–86.
21. Rosenvald K., Ostonen I., Truu M., Truu J., Uri V., Vares A., Lõhmus K. Fine-root Rhizosphere and Morphological Adaptations to Site Conditions in Interaction with Tree Mineral Nutrition in Young Silver Birch (*Betula Pendula* Roth.) Stands // European Journal of Forest Research. 2011. Vol. 130, iss. 6. Pp. 1055–1066.

UDC 581.43:631.811:630*161.32:676.032.14

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.9

Functioning of the Leaf Apparatus, Root System and Biological Productivity of Siberian Larch on the Level of the Organism in Ontogeny (the Case of Larch Forests of the Arkhangelsk Region)

V.M. Lebedev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

E.V. Lebedev, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, pr. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru

The ecological, physiological, agrochemical, balance methods of investigation, characteristics of soil and climatic conditions of habitats and the results of model experiments carried out by the authors, are used to obtain quantitative data on the operation of the leaf apparatus, root system and indicators of biological productivity and carbon deposition by plants of Siberian larch in ontogeny. Tabular data of the root, needle, trunk and branches mass given per one hectare for the stands of Ia–V yield classes of the Arkhangelsk region are converted to an average (by weight) plant by age. Biological productivity is determined by a relative increase in the dry weight of a plant in the comparison periods, net productivity of photosynthesis according to the formula given by A.A. Nichiporovich (1955), and mineral productivity by the method of V.M. Lebedev (1998). The nature of the plant reaction on the depletion of soil resources with age, affecting physiological, functional and morphological processes and biological productivity of plants is established. In the forest stands of all yield classes from 25 to 300 years, we observe a decrease in the net and biological productivity of photosynthesis and carbon deposition, depending on the yield class, by 4.1–8.1, 15.7–19.9, 5.6–10.7 times, respectively, and the absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by 20.4–42.2, 24.3–53.1, and 24.0–50.2 times, respectively. The indicators change dramatically to the age of 75–80 years, and then they relatively stabilize, remaining at a low level. The ratio of the root potential to the photosynthetic potential during ontogeny increases by 4.5–5.4 times. The supply of plants with nutrients to maintain photosynthesis has increased, the biological productivity has not decreased as sharply as the net productivity of photosynthesis and mineral productivity. The presented data significantly supplement our knowledge of biology of woody plants, contribute to the expansion of research in the field of ecology and physiology of woody plants and serve as a theoretical basis for the development of agricultural methods for managing the production process. The proposed complex physiological analysis of tables of plant phytomass allows us to obtain quantitative data on the operation of the leaf apparatus and the root system of woody plants at the level of the organism in ontogeny, and to establish the nature of their interconnection. In the forest stands of all yield classes a nonspecific adaptive reaction is activated in response to a decrease in the absorption of mineral elements. This leads to the growth of the active part of the root system relative to the surface of needles to increase the supply of elements to the aerial part of the plant in order to maintain photosynthesis at the vital level and stabilize biological productivity.

Keywords: larch, root nutrition, photosynthesis, level of organism, productivity, ontogeny.

For citation: Lebedev V.M., Lebedev E.V. Functioning of the Leaf Apparatus, Root System and Biological Productivity of Siberian Larch on the Level of the Organism in Ontogeny (the Case of Larch Forests of the Arkhangelsk Region). *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 9–19. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.9

REFERENCES

1. Besschetnov V.P., Lebedev E.V. Fotosintez i biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod Volgo-Vyatskogo regiona [Photosynthesis and Biological Productivity of Forest-Forming Species of the Volga-Vyatka Region]. *Aktual'nye problem lesnogo khozyaystva i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov Nizhegorodskoy oblasti* [Actual Problems of Forestry and Rational Use of Natural Resources of the Nizhny Novgorod Region]. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2002, pp. 107–116. (In Russ.)
2. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V., Kuzin S.N. Uglerodnyy tsikl v elovykh ekosistemakh severnoy taygi [Carbon Cycle in Spruce Ecosystems of the Northern Taiga Subzone]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2006, no. 1, pp. 23–31.
3. *Geograficheskiy entsiklopedicheskiy slovar': Geograficheskie nazvaniya* [Geographical Encyclopedic Dictionary: Geographical Names]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1983. 528 p. (In Russ.)
4. Il'in V.B. Elementarnyy khimicheskiy sostav rasteniy. Faktory ego opredelyayushchie [Elementary Chemical Composition of Plants. Determinal Factors]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya AN SSSR. Ser.: Biologicheskie nauki*, 1977, no. 10, iss. 2, pp. 3–14.
5. Kurnaev S.F. *Lesorastitel'noe rayonirovanie SSSR* [Plant Zoning of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 203 p. (In Russ.)
6. Lavrichenko V.M. Sootnoshenie elementov pitaniya v rasteniyakh kak vidovoe genotipicheskoe ponyatie [The Ratio of Nutrients in Plants as a Species Genotypic Concept]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 1971, no. 7, pp. 129–134.
7. Lebedev V.M. *Mineral'noe pitanie i biologicheskaya produktivnost' yabloni: dis. ... d-ra s.-kh. nauk* [Mineral Nutrition and Biological Productivity of Apple Tree: Dr. Agric. Sci. Diss.]. Michurinsk, 1985. 553 p.
8. Lebedev V.M. Opredelenie aktivnoy poverkhnosti i mineral'noy produktivnosti kornevoy sistemy plodovykh i yagodnykh kul'tur [Determination of the Active Surface and Mineral Productivity of the Root System of Fruit and Berry Crops]. *Metodika issledovaniya i variatsionnaya statistika v nauchnom plodovodstve: sb. dokl. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Michurinsk, 25–26 marta 1998 g. T. 2* [Methods of Research and Variation Statistics in Scientific Fruit Growing: Proc. Intern. Sci. Practical Conf., Michurinsk, March 25–26, 1998. Vol. 2]. Michurinsk, MSAA Publ., 1998, pp. 39–42.
9. Lebedev V.M., Lebedev E.V. Sravnitel'noe opredelenie produktivnosti lesnykh porod [Comparative Determination of the Forest Species Productivity]. *Netraditsionnye i redkie rasteniya, prirodnye soedineniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya: materialy mezhdunar. nauch. konf.* [Non-traditional and Threatened Species of Plants, Natural Compounds and Prospects for Their Use: Proc. Intern. Sci. Conf.]. Belgorod, Politerra Publ., 2006, vol. 1, pp. 213–216.
10. Lebedev V.M., Lebedev E.V. Morfologicheskie, funktsional'nye i fiziologicheskie osobennosti aktivnoy chasti kornevoy sistemy lesoobrazuyushchikh porod Volgo-Vyatskogo regiona [Morphological, Functional, and Physiological Features of Active Roots of Forest-Forming Species in the Volga-Vyatka Region]. *Agrokhiimiya* [Agricultural Chemistry], 2011, no. 4, pp. 38–44.
11. Logunov D.V. *Ekologicheskie osobennosti rosta i razvitiya predstaviteley roda listvennitsa (Larix Mill.) v usloviyakh antropogennykh landshaftov Nizhegorodskoy oblasti: dis. ... kand. biol. nauk* [Ecological Features of Growth and Development of Representatives of the Genus Larch (*Larix Mill.*) in the Anthropogenic Landscapes of the Nizhny Novgorod Region: Cand. Biol. Sci. Diss.]. Nizhny Novgorod, 2002. 210 p.
12. Nichiporovich A.A. O metodakh ucheta i izucheniya fotosinteza kak faktora urozhaynosti [On the Methods of Recording and Studying Photosynthesis as a Yield Factor]. *Trudy Instituta Fiziologii Rasteniy AN SSSR*, 1955, vol. 10, pp. 210–249.

13. *Pogoda i klimat* [Weather and Climate]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/22550.htm> (accessed 01.03. 2018).

14. Pridacha V.B. *Sootnoshenie N:P:K kak gomeostatcheskiy pokazatel' funktsional'nogo sostoyaniya khvoynykh rasteniy v raznykh ekologicheskikh usloviyakh*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [The N:P:K Ratio as a Homeostatic Indicator of the Functional State of Coniferous Plants in Different Environmental Conditions: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Petrozavodsk, 2002. 24 p.

15. Usol'tsev V.A. *Fitomassa lesov Severnoy Evrazii: normativy i elementy geografii* [Phytomass of Northern Eurasia Forests: Standards and Elements of Geography]. Yekaterinburg, Ural Branch RAS Publ., 2002. 763 p.

16. Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. Wiley-Blackwell, 1996. 1068 p.

17. Cox G.W., Atkins M.D. *Agricultural Ecology. An Analysis of World Food Production Systems*. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1979. 721 p.

18. Lundmark T., Bergh J., Strand M., Koppel A. Seasonal Variation of Maximum Photochemical Efficiency in Boreal Norway Spruce Stands. *Trees*, 1998, vol. 13, iss. 2, pp. 63–67.

19. Nye P.H., Tinker P.B. *Solute Movement in the Soil-Root System*. Berkeley, University of California Press, 1977. 342 p.

20. Pollmer W.G., Eberhard D., Klein D., Dhillon B.S. Genetic Control of Nitrogen Uptake and Translocation in Maize. *Crop Science*, 1979, vol. 19, iss. 1, pp. 82–86.

21. Rosenvald K., Ostonen I., Truu M., Truu J., Uri V., Vares A., Lõhmus K. Fine-root Rhizosphere and Morphological Adaptations to Site Conditions in Interaction with Tree Mineral Nutrition in Young Silver Birch (*Betula Pendula* Roth.) Stands. *European Journal of Forest Research*, 2011, vol. 130, iss. 6, pp. 1055–1066.

Received on March 06, 2018

УДК 633/635:581.112.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.20

ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИНОК БОЯРЫШНИКА*

Б.А. Кентбаева, д-р биол. наук, проф.

Казахский национальный аграрный университет, просп. Абая, д. 8, г. Алматы, Республика Казахстан, 050010; e-mail: kentbayeva@mail.ru

Состояние воздушного бассейна является важнейшим показателем экологического благополучия мегаполисов. Алматы до недавнего времени считался одним из наиболее озелененных крупных городов, но увеличение техногенной нагрузки, численности населения и территории города, строительный и экономический рост оказывают сильное влияние на экологическую обстановку. Зеленый защитный пояс в последние годы уничтожается, его заменяют новые элементы урбанизации. Цель исследования – изучение динамики пылеулавливающей способности листовых пластинок боярышников различного происхождения, произрастающих в посадках г. Алматы. На основе административного деления были выбраны три контрастных экологических участка, расположенных с юга на север по направлению от гор. Внутри участков территория была условно разделена на зоны, характеризующиеся контрастностью антропогенной нагрузки, уровнем загрязненности. Установлено, что листовые пластинки боярышника в основном обладают шероховатой поверхностью, что предполагает высокую пылеулавливающую способность этих растений. Сезонная динамика пылеулавливающей способности боярышников двух экологических участков в сравнении с эталонным участком в 1,8–1,9 раза меньше. Экспериментальные данные показали, что пылеулавливающая способность листьев боярышников увеличивается к концу вегетации. Абсолютное воздействие можно отметить по категориям насаждений. При рассмотрении лимитных значений признака было выявлено, что максимум принадлежит *S. sanguinea* Pall. Степень изменчивости уровня пылеулавливающей способности боярышников на двух экспериментальных участках оценивается как очень низкая и низкая по сравнению с эталонным.

Ключевые слова: боярышник, листовые пластинки, пылеулавливающая способность, внутриквартальные насаждения, примагистральные насаждения.

Введение

Алматы (площадь – 324 км²) – мегаполис на юго-востоке Республики Казахстан, у подножия Тянь-Шаньского горного массива, расположенного в предгорьях северного склона хребта Заилийский Алатау. Горы тянутся в широтном направлении с запада на восток. До недавнего времени он считался одним из наиболее озелененных крупных городов, но увеличение техногенной нагрузки, численности населения, строительный и экономический рост стали оказывать сильное влияние на экологическую обстановку.

*Статья подготовлена по материалам международного симпозиума «Лесное хозяйство: интеграция и вклад в развитие сельских территорий» (15–16 мая 2018 г., г. Нижний Новгород)

Для цитирования: Кентбаева Б.А. Пылеулавливающая способность листовых пластинок боярышника // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 20–27. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.20

Зеленый защитный пояс в последние годы уничтожается, его заменяют новые элементы урбанизации. Состояние воздушного бассейна – важнейший показатель экологической обстановки. Загрязнение воздуха в г. Алматы является острой экологической проблемой, которая осложняется физико-географическими и природно-климатическими условиями [5, 9].

Морфологические характеристики и физиологическое состояние листовых пластинок растений – очень важный критерий для оценки их пылеулавливающей способности. Вследствие шероховатости ветвей и стволов деревьев и кустарников осаждение пыли на них в несколько раз выше, чем на поверхности листьев. Однако общий объем осаждающихся частиц в основном определяется поглощением листвой [10].

Цель исследований – изучение динамики пылеулавливающей способности листовых пластинок боярышников, произрастающих на контрастных экологических участках г. Алматы.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись 5 видов боярышника (*Crataegus* L.) разного географического происхождения, произрастающих в посадках г. Алматы: среднеазиатские виды – *C. almaatensis* Pojark., *C. altaica* Lge., *C. sanguinea* Pall; дальневосточный вид – *C. dahurica* Koehne; североамериканский вид – *C. douglasii* Lindl.

Отбор образцов проводился согласно административному делению и загрязнению территории г. Алматы. Для исследований были выбраны три контрастных с экологической точки зрения участка, расположенных с юга на север по направлению от гор:

№ 1 – Алмалинский район (центральная часть города; его доля в загрязнении атмосферы составляет 3,00 %);

№ 2 – Жетысуский район (северная часть; 67,53 %);

№ 3 – Бостандыкский район, Главный ботанический сад – ГБС (южная часть, наиболее близкая к горным массивам; 2,60 %) [9].

Следует отметить, что условия произрастания растений в ГБС существенно отличаются от других участков: во-первых, территория сада в экологическом плане менее загрязнена; во-вторых, находится ближе к горным системам Заилийского Алатау, что сказывается на климатических условиях и чистоте воздуха; в-третьих, в саду экоклимат приближен к природным экосистемам (лесная обстановка); в-четвертых, растения этого участка испытывают меньшее антропогенное воздействие в связи с удаленностью от основных магистралей города и ограниченностью посещения; в-пятых, работы по уходу создают благоприятные условия для роста и развития растений. Комплекс перечисленных факторов стал решающим для выбора именно этого участка в качестве эталонного.

Внутри административных районов территория была условно разделена на зоны, характеризующиеся контрастом по антропогенной нагрузке, загрязненности и влиянию факторов среды:

внутриквартальные насаждения – объекты внутриквартального озеленения;

примагистральные насаждения – объекты, приближенные к основным автомобильным магистралям;

эталонные насаждения – насаждения боярышников, расположенные в ГБС.

Время наблюдений охватывает три сезона (весна, лето, осень), в каждом из которых выбраны месяцы наблюдений: май, июль, сентябрь.

Для получения точных средних данных в опытах с древесными и кустарниковыми видами достаточно 10...40 образцов [7, 8].

Способность различных видов растений отфильтровывать из воздуха пылевидные частицы оценивалась по общепринятым методикам, для определения площади поверхности листьев использовался весовой метод [1, 10]. Цифровая информация обрабатывалась методами математической статистики [4, 6] с применением авторских компьютерных программ [2]. Степень рельефности поверхности листовых пластинок и отложение частиц пыли устанавливалось по снимкам, полученным с помощью аналитического сканирующего электронного микроскопа JSM-6510LA японской фирмы «Jeol» в нанолaborатории инженерного профиля «Электронная микроскопия» Казахского национального аграрного университета.

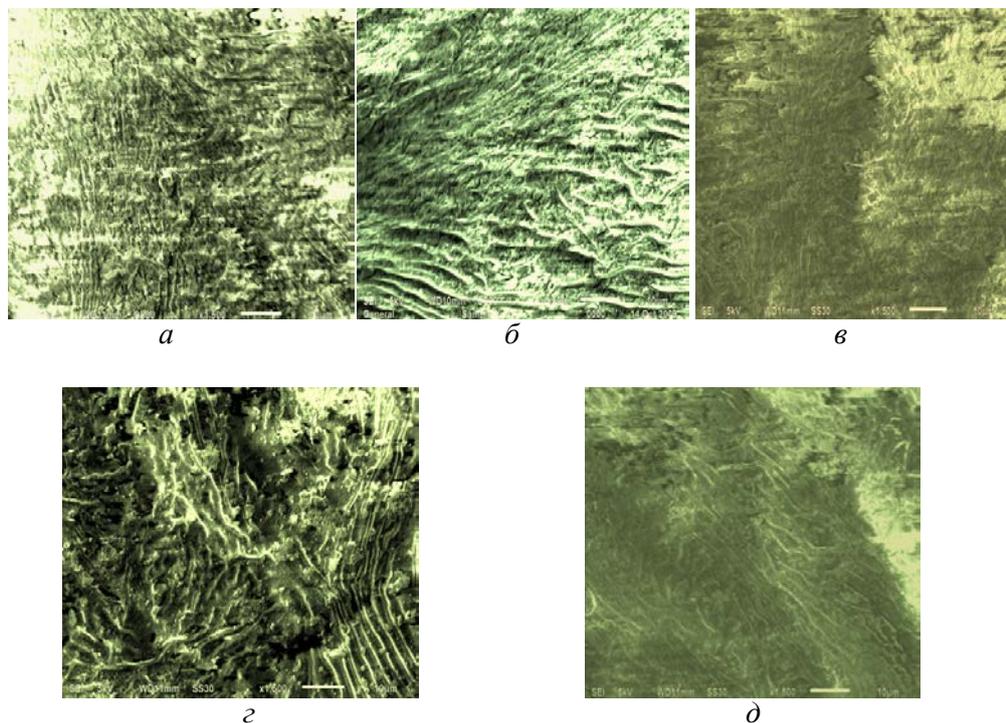
Результаты исследования и их обсуждение

Метеорологические факторы могут оказывать существенное воздействие на частицы, осаждающиеся на листовых пластинках древесных растений. Почвенно-климатические условия г. Алматы способствуют слабому проявлению пыльных бурь, что сказывается на количестве взвешенных частиц. Максимальное число дней с пыльными бурями отмечается в засушливые летние месяцы. При этом преобладает скорость ветра 6...9 м/с, наблюдается кратковременное усиление ветра до 15...17 м/с. Количество осадков в этом районе не меньше, чем в зоне достаточного увлажнения, но своеобразное их распределение и высокий температурный фон теплого периода создают условия засушливости. Значительные осадки чаще выпадают в жидком виде в дневные часы (74 %). Годовая сумма осадков в южной части города почти в 2 раза выше, чем на северных окраинах [5].

Пылеулавливающую способность листовых пластинок боярышника изучали на двух высотах от поверхности земли (1,5 и 3,0 м), что обусловлено низкой средней высотой боярышников. Пробы листьев брали не сразу после дождя, а через 7...10 дней после восстановления солнечной погоды.

Ниже приведены снимки поверхности листовых пластинок 5 видов боярышника, увеличенные в 1500 раз.

По экспериментальным данным пылеулавливающей способности изучаемые виды боярышника можно расположить в следующем порядке: *C. sanguinea* Pall. – *C. altaica* Lge. – *C. dahurica* Koehne – *C. douglasii* Lindl. – *C. almaatensis* Pojark. Лишь в редких случаях *C. altaica* Lge. и *C. dahurica* Koehne меняют положение, уступая друг другу позиции. Факт рельефности и шероховатости *C. sanguinea* Pall., зафиксированный на снимке, объясняет максимальную пылеулавливающую способность этого вида. Однако не всегда большая опушенность и рельефность ассоциируются с более высокой пылеулавливающей способностью. Подтверждением этому является четвертая позиция расположения в убывающем ряду – *C. douglasii* Lindl. Минимальной способностью на фоне остальных обладает *C. almaatensis* Pojark., т. е. можно говорить о том, что и максимумы, и минимумы показателей изучаемого признака принадлежат местным видам.



Рельефность поверхности листовых пластинок боярышника: *a* – *C. almaatensis* Pojark.; *b* – *C. altaica* Lge.; *c* – *C. douglasii* Lindl.; *г* – *C. sanguinea* Pall.; *д* – *C. dahurica* Koehne

Месяцы по убыванию выпадающих осадков располагаются в следующем порядке: май–июль–сентябрь. Количество осадков в весенний период выше по сравнению с остальными периодами. Летние и осенние месяцы отличаются меньшим количеством осадков. Таким образом, минимум пылеулавливающей способности боярышников (см. таблицу) можно отнести к маю, максимум приходится на июль – самый жаркий месяц. Пылеулавливающая способность *C. sanguinea* Pall. по месяцам варьирует в следующих пределах по всем участкам и категориям насаждений: май – 0,91...1,78 г/м², июль – 2,01...4,72 г/м², сентябрь – 1,61...3,94 г/м². У вида с минимальной пылеулавливающей способностью (*C. almaatensis* Pojark.) зафиксированы следующие показатели: май – 0,91...1,44 г/м², июль – 1,81...3,99 г/м², сентябрь – 1,34...3,21 г/м². На двух первых экологических участках влияние изучаемого фактора не имеет значимых разграничений и сильных колебаний. В сравнении же с эталонным участком разница в среднем 1,8–1,9 раза, т. е. количество осевшей пыли на листовых пластинках боярышников ГЭС значительно меньше. Годовая сумма осадков в южной части города, где и располагаются эталонные насаждения, почти в 2 раза выше, чем в северной [5]. Так, в этих насаждениях пылеулавливающая способность по месяцам для *C. almaatensis* Pojark. в мае, июле и сентябре составляла 0,72; 1,81 и 1,34 г/м²; для *C. sanguinea* Pall. – соответственно 0,91; 2,01 и 1,61 г/м². Эта же тенденция сохранялась и по сезонам, и по изучаемым видам.

Пылеулавливающая способность ($г/м^2$) листовых пластинок боярышников

Участок	Видовое название	Высота от поверхности земли, м																			
		1,5						3,0													
		Май	Июль	Сентябрь	Май	Июль	Сентябрь	Май	Июль	Сентябрь	Май	Июль	Сентябрь								
№ 1	<i>C. almaatensis</i> Pojark.	<i>Примагистральные насаждения</i>																			
		1,39±0,02	3,96±0,07	3,11±0,03	1,30±0,03	3,21±0,05	3,02±0,04	1,56±0,03	4,27±0,04	3,47±0,07	1,45±0,04	3,51±0,05	3,33±0,06	1,78±0,04	4,72±0,07	3,59±0,09	1,62±0,04	3,98±0,08	1,42±0,03	3,47±0,05	3,66±0,08
		1,56±0,03	4,27±0,04	3,47±0,07	1,45±0,04	3,51±0,05	3,33±0,06	1,78±0,04	4,72±0,07	3,59±0,09	1,62±0,04	3,98±0,08	1,42±0,03	3,47±0,05	3,66±0,08	1,56±0,04	4,53±0,07	3,51±0,07	1,56±0,04	3,86±0,04	3,61±0,06
		1,61±0,04	4,53±0,07	3,51±0,07	1,56±0,04	3,86±0,04	3,61±0,06	1,02±0,02	2,61±0,05	1,87±0,04	1,02±0,02	2,16±0,04	1,73±0,05	1,20±0,03	2,91±0,04	1,89±0,05	1,08±0,03	2,34±0,04	1,79±0,04	2,07±0,04	1,84±0,04
		1,18±0,02	3,62±0,05	2,07±0,05	1,14±0,02	2,88±0,05	1,96±0,05	1,22±0,03	3,84±0,06	2,17±0,04	1,12±0,03	2,91±0,04	2,07±0,04	1,14±0,02	3,51±0,07	1,92±0,04	1,07±0,03	2,47±0,03	1,84±0,04	2,07±0,04	1,84±0,04
	<i>C. altaica</i> Lge.	<i>Внутриквартальные насаждения</i>																			
		1,02±0,02	2,61±0,05	1,87±0,04	1,02±0,02	2,16±0,04	1,73±0,05	1,20±0,03	2,91±0,04	1,89±0,05	1,08±0,03	2,34±0,04	1,79±0,04	1,22±0,03	3,84±0,06	2,17±0,04	1,12±0,03	2,91±0,04	2,07±0,04	1,84±0,04	2,07±0,04
		1,22±0,03	3,84±0,06	2,17±0,04	1,12±0,03	2,91±0,04	2,07±0,04	1,14±0,02	3,51±0,07	1,92±0,04	1,07±0,03	2,47±0,03	1,84±0,04	1,18±0,02	3,62±0,05	2,07±0,05	1,14±0,02	2,88±0,05	1,96±0,05	1,96±0,05	1,96±0,05
		1,14±0,02	3,51±0,07	1,92±0,04	1,07±0,03	2,47±0,03	1,84±0,04	1,44±0,02	1,63±0,03	3,21±0,12	1,31±0,03	3,73±0,05	3,06±0,06	1,63±0,03	4,16±0,04	3,86±0,07	1,39±0,03	3,87±0,05	3,61±0,06	3,61±0,06	3,61±0,06
		1,68±0,04	4,48±0,07	4,02±0,05	1,57±0,04	4,44±0,07	3,70±0,05	1,75±1,66	4,61±0,06	3,94±0,04	1,66±0,04	4,51±0,08	3,71±0,08	1,68±0,04	4,36±0,09	3,88±0,04	1,42±0,04	3,93±0,05	3,53±0,06	3,53±0,06	3,53±0,06
№ 2	<i>C. almaatensis</i> Pojark.	<i>Примагистральные насаждения</i>																			
		1,44±0,02	3,99±0,08	3,21±0,12	1,31±0,03	3,73±0,05	3,06±0,06	1,63±0,03	4,16±0,04	3,86±0,07	1,39±0,03	3,87±0,05	3,61±0,06	1,75±1,66	4,61±0,06	3,94±0,04	1,66±0,04	4,51±0,08	3,71±0,08	3,53±0,06	3,53±0,06
		1,63±0,03	4,16±0,04	3,86±0,07	1,39±0,03	3,87±0,05	3,61±0,06	1,68±0,04	4,36±0,09	3,88±0,04	1,42±0,04	3,93±0,05	3,53±0,06	1,68±0,04	4,48±0,07	4,02±0,05	1,57±0,04	4,44±0,07	3,70±0,05	3,70±0,05	3,70±0,05
		1,13±0,02	2,54±0,07	1,92±0,03	1,03±0,03	2,45±0,07	1,92±0,03	1,18±0,03	3,04±0,05	2,11±0,04	1,10±0,03	2,83±0,04	2,02±0,05	1,32±0,04	3,76±0,05	2,27±0,04	1,21±0,03	3,11±0,05	2,11±0,03	1,97±0,05	1,97±0,05
		1,24±0,03	3,44±0,04	2,05±0,05	1,08±0,03	2,83±0,04	1,97±0,05	1,24±0,03	3,44±0,04	2,05±0,05	1,08±0,03	2,83±0,04	1,97±0,05	1,21±0,03	3,76±0,05	2,27±0,04	1,21±0,03	3,11±0,05	2,11±0,03	1,97±0,05	1,97±0,05
	<i>C. altaica</i> Lge.	<i>Внутриквартальные насаждения</i>																			
		1,21±0,03	3,52±0,04	2,31±0,04	1,16±0,03	3,06±0,05	2,09±0,06	0,72±0,02	1,81±0,04	1,34±0,03	0,68±0,01	1,58±0,03	1,13±0,03	0,84±0,02	1,93±0,03	1,45±0,04	0,71±0,02	1,66±0,05	1,22±0,03	1,22±0,03	1,22±0,03
		0,72±0,02	1,81±0,04	1,34±0,03	0,68±0,01	1,58±0,03	1,13±0,03	0,84±0,02	1,93±0,03	1,45±0,04	0,71±0,02	1,66±0,05	1,22±0,03	0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	1,35±0,03	1,35±0,03
		0,84±0,02	1,93±0,03	1,45±0,04	0,71±0,02	1,66±0,05	1,22±0,03	0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03
		0,81±0,02	2,03±0,04	1,74±0,03	0,79±0,05	1,80±0,04	1,29±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03
№ 3	<i>C. douglasii</i> Lindl.	<i>Эталонные насаждения</i>																			
		0,81±0,02	2,03±0,04	1,74±0,03	0,79±0,05	1,80±0,04	1,29±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03
		0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	0,86±0,02	1,84±0,03	1,48±0,04	0,75±0,02	1,59±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03	1,18±0,03
		0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	1,35±0,03	1,35±0,03
		0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	0,91±0,02	2,01±0,05	1,61±0,04	0,84±0,02	1,72±0,03	1,35±0,03	1,35±0,03	1,35±0,03

Абсолютное воздействие можно отметить и по категориям насаждений. В примагистральных посадках огромное влияние оказывает автотранспорт. Минимум накопления пыли в самом засушливом летнем месяце (июль) варьирует в следующем диапазоне: примагистральные – 3,96...4,72 г/м², внутриквартальные – 2,54...3,84 г/м². Разница между максимумами – 1,2 раза, между минимумами – 1,6 раза.

Степень изменчивости уровня пылеулавливающей способности боярышников для всех трех экспериментальных площадок по шкале уровней изменчивости коэффициентов вариации С.А. Мамаева оценивается как очень низкая и низкая. Точность опыта не превышает 5 %-й уровень во всех наблюдениях. При рассмотрении лимитных значений признака следует указать, что максимум принадлежит *C. sanguinea* Pall., минимум – *C. almaatensis* Pojark. (оба образца местные). Эта тенденция прослеживается практически по всем направлениям исследований.

Высокая пылеулавливающая способность невысоких деревьев и кустарников, в число которых входит и боярышник, связана с тем, что наибольшее количество частиц пыли обычно выпадает именно на высоте 1,5...2,0 м, за исключением дней с пыльными бурями [3, 10].

Заключение

Все изученные виды боярышника обладают шероховатыми листовыми пластинками, но лидером оказался аборигенный вид *C. sanguinea* Pall. Максимумы и минимумы показателей пылеулавливающей способности боярышников принадлежат местным видам. Установлено, что этот показатель увеличивается к концу вегетации. Максимальное осаждение пыли на поверхности листовых пластинок было отмечено в наиболее засушливом месяце наблюдений – июле. Наибольший экологический прессинг испытывают боярышники, произрастающие вдоль автомобильных магистралей.

Следует учитывать, что для городских растений при определении осаждения пыли на листовые пластинки необходимо оценивать не только площадь кроны, но и физиологическое состояние дерева.

Выявленная санитарно-гигиеническая роль боярышников, основанная на их высокой пылеулавливающей способности, позволяет включить эти виды в перечень растений для озеленения городских урбанизированных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вигоров Л.И. Практикум по физиологии древесных растений. М.: Высш. шк., 1961. 148 с.
2. Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А. Компьютерные программы «Биометрия», «Дисперсия», «Корреляция» на электронных носителях. Алматы, 2007.
3. Кентбаева Б.А. Научно-методические основы мониторинга биологической устойчивости и экологической роли древесных растений в условиях г. Алматы (на примере представителей рода *Crataegus* L.): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Алматы, 2010. 53 с.
4. Мамаев С.А. О проблемах и методах внутривидовой систематики древесных растений. II. Амплитуда изменчивости // Закономерности формообразования и дифференциации вида у древесных растений: тр. Института экологии растений и животных. Свердловск: РИС Урал. фил. АН СССР, 1969. Вып. 64. С. 3–38.
5. Основные положения ведения лесного хозяйства Алма-Атинской области. Алма-Ата: КазНИИЛХиА, 1985. С. 13–54.

6. Плохинский Н.А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с.
7. Прохоров И.А., Потапов С.П. Практикум по селекции и семеноводству овощных и плодовых культур. М.: Колос, 1975. 304 с.
8. Ромедер Э., Шенбах Г. Генетика и селекция лесных пород. М.: Сельхозгиз, 1962. 268 с.
9. Установление целевых показателей загрязнения атмосферного воздуха в г. Алматы: заключительный отчет управления природных ресурсов и охраны окружающей среды акимата г. Алматы / Республиканский научно-производственный и информационный центр «Казэкология». Алматы, 2008. 197 с.
10. Чернышенко О.В. Поглощительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города: автореф. ... дис. д-ра биол. наук. М., 2001. 36 с.

Поступила 06.03.18

UDC 634/635:581.112.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.20

Dust-Catching Capacity of the Hawthorn Leaf Blade

B.A. Kentbaeva, *Doctor of Biological Sciences, Professor*

Kazakh National Agrarian University, pr. Abaya, 8, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan; e-mail: kentbayeva@mail.ru

The state of the air basin is an important indicator of the ecological well-being of megacities. Almaty has been considered as one of the most greened large cities. However, an increase in the man-made load, population, and territory of the city, as well as construction and economic growth have a strong impact on the ecological situation. The green belt has been destroyed in recent years, and is replaced by new elements of urbanization. The goal of research is to study the dynamics of the dust-catching capacity of leaf blades of 5 hawthorn species used for planting in Almaty. Based on the administrative division, three contrasting ecological sites, located from the south to the north in the direction from the mountains, are selected for the research. Inside the plots the territory is conditionally divided into zones characterized by the contrast of the anthropogenic load, the level of pollution and the influence of environmental factors. Hawthorn leaf blades generally have a rough surface, which implies a high dust-catching capacity of these plants. Seasonal dynamics of the hawthorn dust-catching capacity of two ecological sites in comparison with the reference site is 1.8–1.9 times less. Experimental data demonstrates that the dust-catching capacity of hawthorn leaves increases by the end of the vegetation period. Absolute impact can be noted by a category of plantation. When considering limit characteristic values, we should indicate the maximum belonging to *C. sanguinea* Pall. The degree of variability in the level of the dust-catching capacity of hawthorn in the two experimental plots is estimated as very low and low in comparison with the standard zone.

Keywords: hawthorn, leafblade, dust-catching capacity, block green belt, roadside plantation.

REFERENCES

1. Vigorov L.I. *Praktikum po fiziologii drevesnykh rasteniy* [Workshop on Woody Plant Physiology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1961. 148 p. (In Russ.)

For citation: Kentbaeva B.A. Dust-Catching Capacity of the Hawthorn Leaf Blade. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 20–27. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.20

-
2. Kentbaev E.Zh., Kentbaeva B.A. *Komp'yuternye programmy «Biometriya», «Dispersiya», «Korrelyatsiya» na elektronnykh nositelyakh* [Computer Programs “Biometrics”, “Dispersion”, “Correlation” on Electronic Media]. Almaty, 2007. (In Russ.)
3. Kentbaeva B.A. *Nauchno-metodicheskie osnovy monitoringa biologicheskoy ustoychivosti i ekologicheskoy roli drevesnykh rasteniy v usloviyakh g. Almaty (na primere predstaviteley roda Crataegus L.): avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk* [Research and Methodological Bases of Monitoring of Biological Stability and Ecological Role of Woody Plants in the Almaty City (the Case of the Genus *Crataegus* L. Representatives): Dr. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Almaty, 2010. 53 p.
4. Mamaev S.A. O problemakh i metodakh vnutrividovoy sistematiki drevesnykh rasteniy. II. Amplituda izmenchivosti [On the Problems and Methods of the Intraspecific Systematics of Woody Plants. II. Amplitude of Variability]. *Zakonomnosti formoobrazovaniya i differentsiatsii vida u drevesnykh rasteniy: tr. Instituta ekologii rasteniy i zhivotnykh* [Regularities of Intermutation and Species Differentiation in Woody Plants: Proc. Institute of Plant and Animal Ecology]. Sverdlovsk, Ural Branch AS USSR Publ., 1969, no. 64, pp. 3–38. (In Russ.)
5. *Osnovnye polozheniya vedeniya lesnogo khozyaystva Alma-Atinskoy oblasti* [Fundamental Principles of Forest Management in the Alma-Ata Region]. Alma-Ata, KazSRIFA Publ., 1985, pp. 13–54. (In Russ.)
6. Plokhinskiy N.A. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, MSU Publ., 1970. 367 p. (In Russ.)
7. Prokhorov I.A., Potapov S.P. *Praktikum po seleksii i semenovodstvu ovoshchnykh i plodovykh kul'tur* [Workshop on Selection and Seed Production of Vegetable and Fruit Crops]. Moscow, Kolos Publ., 1975. 304 p. (In Russ.)
8. Rohmeder E., Schönbach H. *Genetik und Züchtung der Waldbäume*. Hamburg; Berlin, Verlag Paul Parey, 1959. 338 s.
9. Ustanovlenie tselevykh pokazateley zagryazneniya atmosfernogo vozdukha v g. Almaty [Targeted Indicators of Air Pollution Indices in the Almaty City]. *The Final Report of the Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Akimat of Almaty, "Republican Research and Production and Information Center "Kazecology"*. Almaty, 2008. 197 p. (In Russ.)
10. Chernyshenko O.V. *Poglotitel'naya sposobnost' i gazoustoychivost' drevesnykh rasteniy v usloviyakh goroda: avtoref. ... dis. d-ra biol. nauk* [Absorption Capacity and Gas Resistance of Woody Plants Under Urban Conditions: Dr. Biol. Sci. Diss.]. Moscow, 2001. 36 p.

Received on March 06, 2018

УДК 631.535

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.28

КОРРЕЛЯЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОРНЕОБРАЗОВАНИЯ И ПОСТРЕГЕНЕРАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЧЕРЕНКОВ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*PICEA ABIES* (L.) H. KARST.)****А.В. Кулькова, аспирант***

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; kulkova12@gmail.com

Исследована зависимость между корнеобразованием и пострегенерационным развитием корневых систем и надземной части однолетних черенков ели европейской. Укоренение проведено в субстратах с разными водно-физическими свойствами (агроперлит, вермикулит, речной песок). Установлена изменчивость анализируемых признаков, которая в отношении линейных параметров черенков отнесена к низкому и среднему уровню шкалы Мамаева. Варьирование значений каллюсогенеза соответствовало очень высокому уровню той же шкалы. Наличие изменчивости признаков обусловило потребность и целесообразность определения характера взаимосвязи их варьирования. Формой исследования выбран корреляционный и регрессионный анализ, выполненный по традиционным методическим схемам. Зафиксирована корреляционная зависимость между показателями регенерационных процессов, происходящих при укоренении черенков, и последующего их развития. Количественные оценки парных коэффициентов корреляции Пирсона позволили выразить тесноту связи в качественных категориях шкалы Чеддока. Связь между линейными параметрами черенков определена как положительная сильная. Достоверная положительная связь, оцениваемая как умеренная, отмечена между интенсивностью каллюсогенеза и процентом укоренившихся черенков. Зависимость изменений одного показателя регенерационной способности черенков от характера варьирования другого адекватно описывают уравнения прямой линии. Высота надземной части укорененных черенков связана с их диаметром ($R^2 = 0,521$) и мало зависит от значений других анализируемых признаков ($R^2 < 0,055$). Укореняемость черенков связана с суммарным текущим приростом побегов в длину ($R^2 = 0,378$). Интенсивность образования каллюса оказалась весьма индифферентной по отношению к другим рассматриваемым признакам.

Ключевые слова: ель европейская, черенки, укоренение, субстрат, перлит, вермикулит, речной песок, корреляция, регрессия.

Введение

Переход к устойчивому управлению выступает главным направлением развития мирового лесного хозяйства. Этот вектор был задан XI и XII всемирными лесными конгрессами, определившими особую значимость план-

*Статья подготовлена по материалам международного симпозиума «Лесное хозяйство: интеграция и вклад в развитие сельских территорий» (15–16 мая 2018 г., г. Нижний Новгород).

Работа выполнена под руководством д-ра с.-х. наук Н.Н. Бессчетновой и д-ра биол. наук В.П. Бессчетнова.

Для цитирования: Кулькова А.В. Корреляция показателей корнеобразования и пострегенерационного развития черенков ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) // Лесной журнал. 2018. № 3. С. 28–36. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.28

тационного лесоводства как формы эффективного использования одного из важнейших природных ресурсов – леса. В контексте указанных стратегий лесное хозяйство Российской Федерации ориентировано на непрерывное и неистощительное лесопользование, что последовательно отражается в директивных отраслевых материалах, определено государственными программными документами. Научно обоснованное воспроизводство лесов в России на текущий момент весьма актуально, о чем свидетельствует активное создание селекционных лесосеменных центров во многих регионах страны. Особое значение эффективного лесовосстановления обозначилось в связи с чрезвычайной лесопожарной обстановкой, сложившейся в 2010 г. в нашей стране, и в Нижегородской области в том числе, и возникшей вследствие этого необходимостью создания искусственных насаждений. Объемы подобных работ в Нижегородской области значительны: площадь лесных культур всех типов, назначений и конструкций – более 0,5 млн га, или около 1/5 всех ее лесов. Лесные культуры хвойных (в числе которых значительную долю занимает ель) в регионе проектируются на 80...90 % хвойных и на 5...10 % мягколиственных вырубках, что обуславливает устойчивый спрос на высококачественный посадочный материал.

Являясь одной из главных пород на территории Российской Федерации, ель европейская (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) широко представлена в составе естественных и искусственных насаждений многих европейских стран [8, 10, 13]. Она активно вовлекается в ассортимент плантаций разного целевого назначения, включается в структуры защитных насаждений различной конструкции, городские озеленительные посадки, где с успехом выполняет декоративно-эстетические и санитарно-гигиенические функции. Уникальное сочетание полезных признаков и свойств ели европейской обуславливает ее непрерывное изучение как у нас в стране [3, 6, 7], так и за рубежом [9, 11, 12]. Важную роль ель европейская играет в составе лесов Среднего Поволжья, в связи с чем интерес к ней со стороны лесоводов Нижегородской области не ослабевает [1–4].

Цель исследования – выявление факта наличия и определение степени проявления корреляций и регрессии между показателями корнеобразования и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части однолетних черенков ели европейской при укоренении в различных субстратах.

Объекты и методы исследования

Объектом изучения выступали однолетние черенки, заготовленные в состоянии покоя с деревьев ели европейской, произрастающих на территории дендропарка Нижегородской ГСХА.

Методологическую основу исследования составили общепризнанные представления о принципах единственного логического различия, пригодности и целесообразности опыта. Элиминация эффекта фонового влияния пестроты экологических условий на возможное проявление неоднородности материала предусматривала включение в схему опыта только тех учетных деревьев, которые произрастали на одинаковых по своим характеристикам почвах в пределах одного участка. Подавление дифференцирующего влияния фактора времени, вызывающего хронографическую изменчивость, достигалось одновременной заготовкой черенков с одновозрастных деревьев и последующим одновременным выполнением всех операций, связанных с установкой черенков

в вегетационные сооружения. Местом заготовки черенков был определен периферийный участок среднего яруса хорошо освещенной части кроны. В апреле 2016 г. было заготовлено по 20 типичных однолетних побегов с 15 учетных деревьев. Всего протестировано 300 образцов.

В целях соблюдения принципа единственного логического различия все черенки получали одинаковую стимулирующую обработку, а их последующее выращивание в летней неотапливаемой теплице происходило с едиными схемами размещения, глубиной заделки, режимами освещения и орошения. Черенки устанавливали в раствор β -индолилуксусной кислоты (гетероауксин) на 24 ч, а затем фиксировали в субстрат (рис. 1).

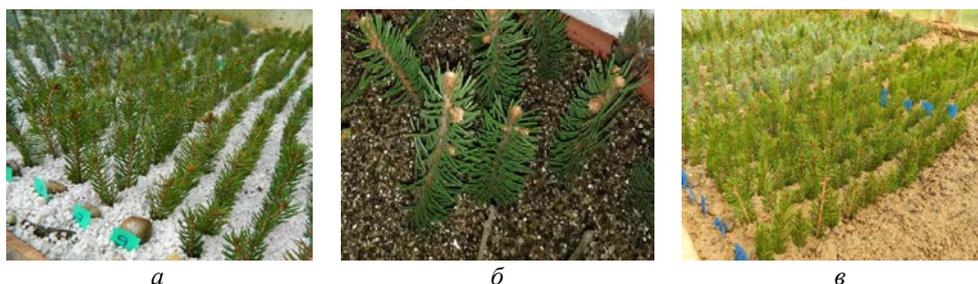


Рис. 1. Типичные однолетние побеги ели европейской, установленные на укоренение в различные субстраты: а – агроперлит; б – вермикулит; в – речной песок

Использовали двухслойный субстрат с разделением слоев нетканым иглопробивным агротекстилем «Дорнит» (плотность – 150 г/м²). Нижний дренажный слой состоял из известкового щебня крупной фракции, верхний – из крупнозернистого речного песка, агроперлита М-150 или вермикулита ВВФ-0,5 (фракции 0,16...0,63 мм). Укоренение проводили в теплице с покрытием из прозрачного сотового поликарбоната толщиной 8 мм. Теплица оснащена оросительной системой с мелкодисперсным распылением воды.

Первичной единицей выборки был принят разовый учет значений каждого из анализируемых в опыте показателей, что соответствует существующим взглядам на указанные методические аспекты. Математическая обработка первичной лесоводственной информации осуществлена в электронных таблицах Excel с привлечением общепринятых методов статистического, корреляционного и регрессионного анализов [5].

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительные испытания однотипных черенков ели европейской (рис. 2) при их укоренении в разных субстратах выявили заметную изменчивость анализируемых показателей.

В частности, варьирование высоты надземной части, составившее в разных вариантах от 16,22 (вермикулит) до 17,35 % (агроперлит), соответствовало среднему уровню по шкале Мамаева. Изменчивость диаметра в зоне корнеобразования менее выражена: от 8,45 (речной песок) до 10,75 % (агроперлит), что позволило отнести ее к низкому уровню той же шкалы. Весьма стабильной была укореняемость черенков: от 5,78 (вермикулит) до 12,68 % (речной песок). Это дало основание оценить ее изменчивость как низкую и очень низкую. Наиболее лабильной оказалась интенсивность образования каллуса: оценки изменчивости принимали значения от 54,89 (вермикулит) до 60,17 % (речной песок) и достигали очень высокого уровня.

Зафиксированная изменчивость всех исследуемых признаков и установленная статистическая достоверность полученных результатов предопределили возможность и целесообразность выполнения анализа тесноты связи признаков. Результаты вычисления парных коэффициентов корреляции Пирсона представлены в табл. 1.



Рис. 2. Укорененный черенок ели европейской

Таблица 1

Оценка тесноты связи показателей корнеобразования и пострегенерационного развития черенков ели европейской

Показатель	Признак					
	1	2	3	4	5	6
<i>Признак 1 – высота надземной части</i>						
r	1,000	0,722	0,230	0,101	0,131	0,195
$\pm m_r$	0,000	0,043	0,061	0,062	0,062	0,061
t_r	99(9)	16,759	3,789	1,637	2,121	3,198
<i>Признак 2 – диаметр в зоне корнеобразования</i>						
r	0,722	1,000	0,222	0,037	0,114	0,249
$\pm m_r$	0,043	0,000	0,061	0,062	0,062	0,060
t_r	16,759	99(9)	3,657	0,599	1,842	4,128
<i>Признак 3 – интенсивность образования каллюса</i>						
r	0,230	0,222	1,000	0,501	0,513	0,427
$\pm m_r$	0,061	0,061	0,000	0,054	0,053	0,056
t_r	3,789	3,657	99(9)	9,308	9,594	7,578
<i>Признак 4 – длина осевого корня</i>						
r	0,101	0,037	0,501	1,000	0,153	-0,140
$\pm m_r$	0,087	0,088	0,076	0,000	0,087	0,087
t_r	1,162	0,425	6,607	99(9)	1,763	1,607
<i>Признак 5 – суммарный текущий прирост побегов в длину</i>						
r	0,131	0,114	0,513	0,153	1,000	-0,615
$\pm m_r$	0,067	0,067	0,058	0,067	0,000	0,054
t_r	1,945	1,689	8,799	2,278	99(9)	11,480
<i>Признак 6 – укореняемость черенков</i>						
r	0,195	0,249	0,427	-0,140	-0,615	1,000
$\pm m_r$	0,106	0,104	0,098	0,107	0,085	0,000
t_r	1,846	2,383	4,375	1,307	7,227	99(9)

Примечания. 1. Обозначения показателей: r – парный коэффициент корреляции Пирсона; $\pm m_r$ – ошибка коэффициента корреляции; t_r – опытное значение критерия Стьюдента для коэффициента корреляции. 2. Табличное значение критерия Стьюдента при 5 %-м уровне значимости $t_{05} = 1,96$.

Перевод количественных значений коэффициента корреляции в качественные показатели тесноты связи, выполненный по шкале Чеддока, позволил признать связь для высоты надземной части и диаметра в зоне корнеобразования как положительную высокую ($0,722 \pm 0,043$) при достоверных оценках ($t_r = 16,759$ при $t_{0,5} = 1,96$). Интенсивность образования каллюса обнаружила положительную связь с длиной сформированного осевого корня ($0,501 \pm 0,076$) и она может быть оценена как заметная и достоверная ($t_r = 6,607$ при $t_{0,5} = 1,96$). С интенсивностью каллюсообразования столь же тесно связан суммарный текущий прирост побегов в длину ($0,513 \pm 0,058$), а достоверность связи подтверждена оценками критерия достоверности коэффициента корреляции ($t_r = 8,799$ при $t_{0,5} = 1,96$). Теснота связи между варьирующими значениями интенсивности каллюсообразования и укореняемости также признана положительной и оценивается как умеренная ($0,427 \pm 0,098$) при убедительно подтвержденной достоверности ($t_r = 4,375$ при $t_{0,5} = 1,96$). Притом, что в подавляющем большинстве парных сравнений связь была положительно направленной, в двух случаях она оказалась отрицательной. В частности, такую направленность корреляций имела связь укореняемости с длиной осевого корня ($-0,140 \pm 0,107$) и суммарным текущим осевым приростом побегов ($-0,615 \pm 0,085$). В последнем случае теснота связи достоверна и по шкале Чеддока оценивается как заметная. Установленная по итогам корреляционного анализа зависимость была представлена уравнениями прямой линии, полученными в ходе парного регрессионного анализа (табл. 2).

Невысокие в большинстве своем значения коэффициентов корреляции (см. табл. 1) определили достаточно низкий уровень коэффициентов детерминации в парном регрессионном анализе взаимозависимости процессов укоренения черенков и их последующего развития (табл. 2). Уравнения прямой линии, которые удалось построить по результатам регрессионного анализа, в целом адекватно описывают зависимость изменения одного показателя регенерационной способности черенков ели от характера варьирования другого (табл. 2). Высота надземной части достаточно заметно связана с показателями диаметра: $y = 4,949x - 1,979$ ($R^2 = 0,521$), но слабо зависит от проявления других анализируемых признаков ($R^2 < 0,055$).

Этому соответствует результат анализа диаметра в зоне корнеобразования: его связь с высотой надземной части определена как $y = 0,105x + 1,046$ ($R^2 = 0,521$), при этом коэффициенты детерминации по остальным вариантам значительно ниже ($R^2 < 0,050$). Интенсивность образования каллюса оказалась весьма индифферентной по отношению к другим рассматриваемым признакам ($R^2 < 0,55$), и только в случае регрессии по укореняемости зафиксирован некоторый рост оценок коэффициента детерминации ($R^2 = 0,182$). Укореняемость черенков в наибольшей мере связана с суммарным текущим приростом побегов в длину: $y = -11,075x + 93,928$ ($R^2 = 0,378$). Укореняемость черенков имеет достоверную положительную связь, хотя и намного меньшую, с интенсивностью образования каллюса: $y = 0,680x + 9,687$ ($R^2 = 0,182$).

Таблица 2

**Взаимозависимость варьирования показателей укоренения
и последующего развития черенков ели европейской**

При- знак	Уравнение связи	R ²	t-статистика коэффициентов		Критерий Фишера	
			a	b	F _{оп}	F ₀₅
<i>Признак 1 – высота надземной части</i>						
2	$y = 4,949x - 1,979$	0,521	31,353	-7,135	983,004	1E-146
3	$y = 0,008x + 6,227$	0,053	7,089	84,538	50,248	2,7E-12
4	$y = 0,072x + 6,236$	0,023	1,025	14,142	1,051	0,31086
5	$y = -0,047x + 6,870$	0,002	-0,274	9,940	0,075	0,78503
6	$y = 0,012x + 6,081$	0,038	1,321	13,189	1,744	0,19342
<i>Признак 2 – диаметр в зоне корнеобразования</i>						
1	$y = 0,105x + 1,046$	0,521	31,353	45,977	983,004	1E-146
3	$y = 0,001x + 1,686$	0,049	6,841	156,613	46,803	1,4E-11
4	$y = -0,001x + 1,757$	0,001	-0,169	43,107	0,029	0,86630
5	$y = -0,009x + 1,787$	0,008	-0,592	28,389	0,350	0,55698
6	$y = 0,001x + 1,680$	0,062	1,705	40,388	2,907	0,09527
<i>Признак 3 – интенсивность образования каллюса</i>						
1	$y = 6,736x + 12,995$	0,053	7,089	2,018	50,248	2,7E-12
2	$y = 44,645x - 20,129$	0,049	6,841	-1,755	46,803	1,4E-11
4	$y = 0,610x + 54,249$	0,016	0,859	12,231	0,738	0,39482
5	$y = -1,227x + 62,965$	0,012	-0,725	9,136	0,525	0,47246
6	$y = 0,268x + 44,849$	0,182	3,130	10,525	9,795	0,00310
<i>Признак 4 – длина осевого корня</i>						
1	$y = 0,322x + 3,996$	0,023	1,025	1,897	1,051	0,31086
2	$y = -0,589x + 7,179$	0,001	-0,169	1,179	0,029	0,8663
3	$y = 0,027x + 4,580$	0,006	0,859	2,500	0,738	0,39482
5	$y = 0,308x + 4,904$	0,017	0,865	3,390	0,749	0,39154
6	$y = -0,018x + 7,054$	0,019	-0,935	7,184	0,875	0,35481
<i>Признак 5 – суммарный текущий осевой прирост побегов</i>						
1	$y = -0,037x + 4,228$	0,002	-0,274	4,791	0,075	0,78503
2	$y = -0,863x + 5,553$	0,008	-0,592	2,176	0,350	0,55698
3	$y = -0,010x + 4,601$	0,011	-0,725	5,958	0,525	0,47246
4	$y = 0,054x + 3,709$	0,017	0,865	9,452	0,749	0,39154
6	$y = -0,034x + 5,720$	0,378	-5,169	17,395	26,722	5,5E-06
<i>Признак 6 – укореняемость</i>						
1	$y = 3,120x + 28,296$	0,038	1,321	1,787	1,744	0,19342
2	$y = 43,536x - 27,044$	0,062	1,705	-0,605	2,907	0,09527
3	$y = 0,680x + 9,687$	0,182	3,130	0,765	9,795	0,00310
4	$y = -1,058x + 55,646$	0,019	-0,935	7,882	0,875	0,35481
5	$y = -11,075x + 93,928$	0,378	-5,169	10,774	26,722	5,5E-06

Примечание. R² – достоверность аппроксимации; a – коэффициент при аргументе уравнения; b – свободный член уравнения; t-статистика – расчетное значение критерия Стьюдента для оценки статистической надежности коэффициентов уравнения при t₀₅ = 1,96; F_{оп} и F₀₅ – опытное и табличное значения критерия Фишера.

Следует отметить, что коэффициенты при аргументе и свободные члены уравнений чаще были достоверными: их расчетные t-статистики превосходили критический порог на 5 %-м уровне значимости. Существенность установленной

связи в полученных уравнениях зависимости между характеристиками процессов укоренения и последующего развития черенков подтверждена опытными критериями Фишера: в большинстве случаев они превышают соответствующие критические значения.

Заключение

Показатели корнеобразования и последующего развития однолетних одревесневших черенков ели европейской при их укоренении в различных по водно-физическим свойствам субстратах переменны. Более изменчивы линейные параметры укоренившихся черенков, менее стабильны оценки интенсивности образования каллюса на них. Существует высокая корреляционная зависимость линейных параметров надземной части укоренившихся черенков между собой. Их укореняемость в большей мере зависит от интенсивности каллюсогенеза и мало связана с другими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Образование и лигнификация ксилемы плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Лесн. журн. 2013. № 2. С. 45–52. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Бессчетнова Н.Н. Содержание жиров в клетках побегов плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Лесн. журн. 2012. № 4. С. 48–55. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кулькова А.В., Мишукова И.В. Содержание крахмала в тканях побегов разных видов ели (*Picea A. Dietr.*) в условиях интродукции // Лесн. журн. 2017. № 4. С. 57–68. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Бессчетнова Н.Н., Кулькова А.В. Сравнительная оценка представителей рода ель (*Picea L.*) по содержанию жиров в тканях годичных побегов // Научные и инновационные разработки молодых ученых-аграриев: сб. тр. молодых ученых ФГБОУ ВПО «Нижегородская ГСХА» за 2014–2015 гг. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2015. С. 53–58.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
6. Падутов В.Е., Сидор А.И., Каган Д.И., Ковалевич О.А., О.А. Верас О.А. Изменчивость гаплотипов цитоплазматической ДНК ели европейской в географических культурах // Сиб. лесн. журн. 2014. № 4. С. 64–68.
7. Ташев А.Н., Седельникова Т.С., Пименов А.В. Число хромосом и хромосомные перестройки у ели обыкновенной *Picea abies* (L.) H. Karst. в лесах Рило-Родопского горного массива Болгарии // Сиб. лесн. журн. 2015. № 5. С. 77–86.
8. Alexandrov A. Structure of the Populations and Growth of the Progeny of Representative Populations of *Picea abies* (L.) Karsten in the Rila Mountain. Sofia: PENSOFT Publishers, 2006. Pp. 55–60, 190–191.
9. Chrimes D., Lundqvist L., Atlegrim O. *Picea abies* Sapling Height Growth after Cutting *Vaccinium myrtillus* in an Uneven-Aged Forest in Northern Sweden // Forestry. 2004. Vol. 77, iss. 1. Pp. 61–66.
10. Gryc V., Vavrčik H., Horn K. Density of Juvenile and Mature Wood of Selected Coniferous Species // Journal of Forest Science. 2011. Vol. 57, iss. 3. Pp. 123–130.
11. Konôpka B., Pajtik J., Šebeň V., Lukac M. Belowground Biomass Functions and Expansion Factors in High Elevation Norway Spruce // Forestry. 2011. Vol. 84, iss. 1. Pp. 41–48.
12. Ulvcróna T., Lindberg H., Bergsten U. Impregnation of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Wood by Hydrophobic Oil and Dispersion Patterns in Different Tissues // Forestry. 2006. Vol. 79, iss. 1. Pp. 123–134.

13. Zenner E.K., Peck J.E., Lähde E., Laiho O. Decomposing Small-Scale Structural Complexity in Even- and Uneven-Sized Norway Spruce-Dominated Forests in Southern Finland // *Forestry*. 2012. Vol. 85, iss. 1. Pp. 41–49.

Поступила 06.03.18

UDC 631.535

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.28

Correlation of Indices of Root Formation and Post-Regeneration Development of Cuttings of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.)

A.V. Kul'kova, Postgraduate Student

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, pr. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: kulkova12@gmail.com

The paper presents the relationship between root formation and post-regeneration development of root systems and the overground part of annual cuttings of Norway spruce. Rooting was carried out in substrates with different water and physical properties (perlite, vermiculite, river sand). The variability of the analyzed characteristics is established, which is referred to the low and medium level of the Mamaev scale with respect to the linear parameters of cuttings. Varying the callusogenesis values corresponds to a very high level of the same scale. The variability of characteristics stipulates the need and expediency of determining the nature of the relationship between their variations. The correlation and regression analysis performed according to traditional methodological schemes is chosen as the form of the study. The correlation between the indices of regenerative processes occurring during the rooting of cuttings and their further development is established. Quantitative evaluations of Pearson pair correlation coefficients allows expressing the correlation ratio in the qualitative categories of the Chaddock scale. The relationship between the linear parameters of cuttings is defined as a positive strong one. A reliable positive correlation, assessed as moderate, is observed between the intensity of callusogenesis and the percentage of rooted cuttings. The dependence of changes in one index of the regenerative capacity of cuttings on the nature of variation of another one is adequately described by the equation of a straight line. The height of the aerial part of the rooted cuttings is associated with their diameter ($R^2 = 0.521$), and depends little on the values of the other analyzed characteristics ($R^2 < 0.055$). The rooting ability of cuttings is related to the total current increment of shoots in length ($R^2 = 0.378$). The intensity of callus formation is very indifferent to other characteristics under consideration.

Keywords: Norway spruce, cutting, rooting, substrate, perlite, vermiculite, river sand, correlation, regression.

REFERENCES

1. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. Obrazovanie i lignifikatsiya ksilemy plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy [Formation and Lignification of Xylem of Scotch Pine Elite Trees]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2013, no. 2, pp. 45–52.
2. Besschetnova N.N. Soderzhanie zhirov v kletkakh pobegov plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy [Fat Content in Shoot Cells of Scotch Pine Elite Trees]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2012, no. 4, pp. 48–55.

For citation: Kul'kova A.V. Correlation of Indices of Root Formation and Post-Regeneration Development of Cuttings of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.). *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 28–36. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.28

3. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kul'kova A.V., Mishukova I.V. Soderzhanie krakhmala v tkanyakh pobegov raznykh vidov eli (*Picea* A. Dietr.) v usloviyakh introduktsii [Starch Content in Shoot Tissues of Different Spruce Species (*Picea* A. Dietr.) in Introduction]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 4, pp. 57–68.

4. Besschetnova N.N., Kul'kova A.V. Sravnitel'naya otsenka predstaviteley roda el' (*Picea* L.) po sodержaniyu zhirov v tkanyakh godichnykh pobegov [Comparative Evaluation of the Genus Spruce (*Picea* L.) Representatives by the Fat Content in Annual Shoot Tissues]. *Nauchnye i innovatsionnye razrabotki molodykh uchenykh-agrariyev: sb. tr. molodykh uchenykh FGBOU VPO «Nizhegorodskaya GSKhA» za 2014–2015 gg.* [Scientific and Innovative Solutions of Young Agricultural Scientists: Collected Papers of Young Scientists of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy for 2014–2015]. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2015, pp. 53–58. (In Russ.)

5. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of Field Tests (with the Basics of Statistical Processing of Research Results)]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 351 p. (In Russ.)

6. Padutov V.E., Sidor A.I., Kagan D.I., Kovalevich O.A., Veras S.N. Izmenchivost' gaplotipov tsitoplazmaticheskoy DNK eli evropeyskoy v geograficheskikh kulturakh [The Variability of Cytoplasmic DNA Haplotypes of Norway Spruce in the Provenance Trials]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2014, no. 4, pp. 64–68.

7. Tashev A.N., Sedel'nikova T.S., Pimenov A.V. Chislo khromosom i khromosomnye perestroyki u eli obyknovennoy *Picea abies* (L.) H. Karst. v lesakh Rilo-Rodopskogo gomogo massiva Bolgarii [Number of Chromosomes and Chromosome Rearrangement of Norway Spruce *Picea abies* (L.) H. Karst. in the Forests of Rilo-Rhodope Mountain of Bulgaria]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2015, no. 5, pp. 77–86.

8. Alexandrov A. *Structure of the Populations and Growth of the Progeny of Representative Populations of Picea abies (L.) Karsten in the Rila Mountain*. Sofia, Bulgaria, PENSOFT Publishers, 2006, pp. 55–60, 190–191.

9. Chrimes D., Lundqvist L., Atlegrim O. *Picea abies* Sapling Height Growth after Cutting *Vaccinium myrtillus* in an Uneven-Aged Forest in Northern Sweden. *Forestry*, 2004, vol. 77, iss. 1, pp. 61–66.

10. Gryc V., Vavrčik H., Horn K. Density of Juvenile and Mature Wood of Selected Coniferous Species. *Journal of Forest Science*, 2011, vol. 57, iss. 3, pp. 123–130.

11. Konôpka B., Pajtik J., Šebeň V., Lukac M. Belowground Biomass Functions and Expansion Factors in High Elevation Norway Spruce. *Forestry*, 2011, vol. 84, iss. 1, pp. 41–48.

12. Ulvcrona T., Lindberg H., Bergsten U. Impregnation of Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.) Wood by Hydrophobic Oil and Dispersion Patterns in Different Tissues. *Forestry*, 2006, vol. 79, iss. 1, pp. 123–134.

13. Zenner E.K., Peck J.E., Lähde E., Laiho O. Decomposing Small-Scale Structural Complexity in Even- and Uneven-Sized Norway Spruce-Dominated Forests in Southern Finland. *Forestry*, 2012, vol. 85, iss. 1, pp. 41–49.

Received on March 06, 2018

УДК 630*18

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.37

**СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ОСНОВНЫХ ПИГМЕНТОВ
В ХВОЕ НЕКОТОРЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА ЛИСТВЕННИЦА
(*LARIX MILL.*) В УСЛОВИЯХ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ****Д.В. Логунов, канд. биол. наук, доц.*

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; e-mail: logunov.dv1977@mail.ru

Лиственница является одной из перспективнейших древесных пород в деле повышения продуктивности лесов, увеличения биоразнообразия природных территорий. Интродукция растений представляет собой важнейший конструктивный механизм для стабильного функционирования природных ландшафтов, подверженных сильному антропогенному стрессу. Правильный выбор ассортимента древесно-кустарниковых пород позволяет эффективно проводить озеленительные работы, создавать устойчивые к неблагоприятным факторам насаждения на землях, испытывающих сильные нагрузки. Создание насаждений предопределяет необходимость изучения биологических особенностей лиственницы. Важной характеристикой листового аппарата растений служит содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях. Цель исследования – выявление сезонного характера изменения содержания хлорофилла и каротиноидов в хвое некоторых видов лиственницы. В ходе исследования установлено, что на протяжении периода вегетации в хвое изучаемых видов происходит постепенное накопление пигментов. При этом максимальное содержание хлорофилла и каротиноидов зафиксировано у лиственниц ширококочешуйчатой и плакучей. Высокие значения данных показателей у интродуцентов по сравнению с аборигенным представителем рода важны при адаптации видов и свидетельствуют о перспективности их дальнейшего хозяйственного использования для нужд зеленого строительства в Нижегородской области.

Ключевые слова: лиственница, интродукция, хлорофилл, каротиноиды, лесные культуры, антропогенный стресс.

Введение

Повышение продуктивности лесных насаждений, увеличение биологического разнообразия природных территорий являются актуальнейшими задачами лесного хозяйства и современной лесной экологии [10, 11]. Одним из действенных механизмов реализации данных задач выступает интродукция перспективных и экологически значимых видов древесных растений, биологические особенности которых соответствовали бы данным природно-климатическим и лесорастительным условиям [2, 5].

*Статья подготовлена по материалам международного симпозиума «Лесное хозяйство: интеграция и вклад в развитие сельских территорий» (15–16 мая 2018 г., г. Нижний Новгород).

Финансирование выполнено за счет бюджетных ассигнований на содержание вуза в соответствии с индивидуальным планом научно-педагогического работника.

Для цитирования Логунов Д.В. Сезонная динамика основных пигментов в хвое некоторых представителей рода лиственница (*Larix Mill.*) в условиях Нижегородской области // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 37–42. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.37

Аборигенный представитель флоры Нижегородской области – лиственница сибирская, отличается высокой продуктивностью как при чистом произрастании, так и в смешении с различными породами [3, 4, 6]. В средней полосе на богатых почвах лиственница сибирская в 100-летнем возрасте имеет запас $1000 \text{ м}^3/\text{га}$, что в 1,5 раза превышает производительность сосновых насаждений I класса бонитета [5].

Несмотря на высокую экологическую и хозяйственную значимость лиственничных насаждений [12, 13], площадь, занятая ими в Нижегородской области, ничтожно мала [5]. Создание лиственничных насаждений различного целевого назначения предопределяет необходимость изучения биологических особенностей данной породы.

Важной характеристикой листового аппарата растений является содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях. Материалов по изучению сезонного накопления хлорофилла и каротиноидов в хвое лиственницы крайне мало. Отмечена неоднородность древесных растений различного географического происхождения по содержанию хлорофилла и каротиноидов [7].

Установлено, что основной причиной пожелтения хвои сосны в осенне-зимний период является снижение в ней хлорофилла [7]. Содержание хлорофилла в хвое и листьях изменяется по высоте кроны, а наименьшее количество его отмечается в листьях (хвое) верхнего более освещенного яруса [9]. В течение вегетационного периода происходит постепенное накопление хлорофилла, а его максимум наблюдается в период окончания роста растений.

Цель исследования – установление характера сезонного изменения содержания основных пигментов в хвое некоторых видов лиственницы в условиях Нижегородской области и их сравнительная оценка по данному показателю.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись 8 видов лиственницы, имеющих в коллекции дендрария ботанического сада Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Возраст растений – от 55 до 60 лет. Все исследуемые виды были выращены из семян, полученных из следующих пунктов интродукции: лиственница европейская – С.-Петербург; лиственница сибирская – аборигенный вид; лиственница даурская – г. Хабаровск; лиственница японская – республика Украина; лиственница широкочешуйчатая – Москва; лиственница плакучая – республика Украина; лиственница Любарского – г. Таллин; лиственница польская – г. Каунас.

Образцы хвои для анализа отбирали в ясную погоду с периферийных хорошо освещенных и развитых побегов средней части кроны [8] и анализировали с мая по октябрь через каждые 10...15 сут. Для сравнительной оценки содержания пигментов использовали средние значения этих показателей в следующие фенологические фазы: начало роста хвои, окончание роста хвои, окончание роста побегов, начало пожелтения хвои.

Вытяжки из хвои готовили по стандартной методике [1] в четырехкратной повторности. Для определения оптической плотности вытяжки пигментов использовали спектрофотометр при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения хлорофилла *a* (665 нМ), хлорофилла *b* (649 нМ) и каротиноидов (440,5 нМ), с последующим расчетом концентрации пигментов по уравнению Вернона и Ветшттейна для 80 %-го ацетона. Содержание пигментов определяли в миллиграммах на 1 г сырого вещества.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе изучения сезонной динамики пигментов в хвое 8 видов лиственницы установлена следующая закономерность. На протяжении анализируемого периода в хвое происходит постепенное накопление пигментов: минимальное содержание пигментов зафиксировано в период начала роста хвои, максимальное – приходится на период окончания роста побегов, что по календарным срокам соответствует августу, с варьированием от 7 до 14 сут (окончание роста побегов у лиственниц европейской, сибирской и даурской наступает примерно на две недели раньше, чем у лиственниц японской и ширококочешуйчатой). Значительное уменьшение количества пигментов в хвое наблюдается в период начала ее пожелтения.

В таблице приведены результаты определения основных пигментов в хвое изученных представителей рода лиственница.

Содержание основных пигментов (мг/г) в хвое представителей
рода лиственница по периодам роста

Лиственница	Хлорофилл			Каротиноиды
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	
<i>Начало роста хвои</i>				
Европейская (<i>L. decidua</i> Mill.)	0,31	0,20	0,51	0,08
Сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.)	1,07	0,97	2,04	0,85
Даурская (<i>L. dahurica</i> Turcz ex Trautv.)	1,39	1,21	2,60	1,09
Японская (<i>L. leptolepis</i> Gord.)	1,45	1,29	2,74	1,19
Ширококочешуйчатая (<i>L. eurolepis</i> A. Henry)	1,68	1,53	3,21	1,41
Плакучая (<i>L. pendula</i> Salisb.)	2,11	1,98	4,09	1,85
Любарского (<i>L. lubarskii</i> Sukacz.)	1,28	1,16	2,44	1,03
Польская (<i>L. polonica</i> Racib)	1,30	1,20	2,50	1,06
<i>Окончание роста хвои</i>				
Европейская (<i>L. decidua</i> Mill.)	0,78	0,48	1,26	0,38
Сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.)	1,52	1,20	2,72	1,12
Даурская (<i>L. dahurica</i> Turcz ex Trautv.)	1,86	1,52	3,38	1,37
Японская (<i>L. leptolepis</i> Gord.)	1,92	1,60	3,52	1,42
Ширококочешуйчатая (<i>L. eurolepis</i> A. Henry)	2,15	1,84	3,99	1,74
Плакучая (<i>L. pendula</i> Salisb.)	2,58	2,27	4,85	2,16
Любарского (<i>L. lubarskii</i> Sukacz.)	1,72	1,43	3,15	1,30
Польская (<i>L. polonica</i> Racib)	1,74	1,41	3,15	1,29
<i>Окончание роста побегов</i>				
Европейская (<i>L. decidua</i> Mill.)	1,31	0,83	2,14	0,68
Сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.)	1,99	1,29	3,28	0,99
Даурская (<i>L. dahurica</i> Turcz ex Trautv.)	2,14	1,44	3,58	0,98
Японская (<i>L. leptolepis</i> Gord.)	2,05	1,44	3,49	1,05
Ширококочешуйчатая (<i>L. eurolepis</i> A. Henry)	2,27	1,58	3,85	1,15
Плакучая (<i>L. pendula</i> Salisb.)	2,72	2,26	4,98	1,36
Любарского (<i>L. lubarskii</i> Sukacz.)	1,84	1,18	3,02	0,93
Польская (<i>L. polonica</i> Racib)	1,85	1,27	3,12	0,96
<i>Начало пожелтения хвои</i>				
Европейская (<i>L. decidua</i> Mill.)	0,61	0,35	0,96	0,32
Сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.)	0,84	0,49	1,33	0,43
Даурская (<i>L. dahurica</i> Turcz ex Trautv.)	0,88	0,59	1,47	0,40
Японская (<i>L. leptolepis</i> Gord.)	0,78	0,56	1,34	0,38
Ширококочешуйчатая (<i>L. eurolepis</i> A. Henry)	0,92	0,79	1,71	0,41
Плакучая (<i>L. pendula</i> Salisb.)	0,99	1,04	2,03	0,42
Любарского (<i>L. lubarskii</i> Sukacz.)	0,77	0,54	1,31	0,36
Польская (<i>L. polonica</i> Racib)	0,80	0,57	1,37	0,37

Анализ данных, приведенных в таблице, свидетельствует о неоднородности рассматриваемых представителей рода лиственница по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в хвое. Так, у лиственницы плакучей наблюдалось максимальное содержание основных пигментов (хлорофилл *a* – 2,72 мг/г; хлорофилл *b* – 2,26 мг/г; суммарный хлорофилл – 4,98 мг/г; каротиноиды – 1,36 мг/г), у лиственницы европейской – минимальное (хлорофилл *a* – 1,31 мг/г; хлорофилл *b* – 0,83 мг/г; суммарный хлорофилл – 2,14 мг/г; каротиноиды – 0,68 мг/г). Сравнительно высокое содержание основных пигментов зафиксировано также в хвое лиственницы ширококочешуйчатой. Данная закономерность сохраняется по всем фенологическим фазам, что свидетельствует о надежности полученных результатов.

Заключение

На протяжении вегетационного периода в хвое исследуемых видов лиственницы происходит накопление основных пигментов, причем минимальное их содержание наблюдалось в период начала роста хвои, максимальное – в период окончания роста побегов. При пожелтении хвои содержание анализируемых пигментов резко снижалось.

Высокое содержание основных пигментов в хвое, отмеченное у интродуцентов (лиственницы плакучая и ширококочешуйчатая), в сравнении с аборигенным представителем рода (лиственница сибирская) свидетельствует о повышенной энергии их роста, успешной адаптации этих видов к новым экологическим условиям и неплохих перспективах их дальнейшего хозяйственного использования в условиях Нижегородской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власова Т.А., Гавриленко В.Ф., Казаков А.С., Макарова Е.Н., Потапов Н.Г., Таймла Э.А., Тукеева М.И., Хандобина Л.М. Малый практикум по физиологии растений / под ред. М.В. Гусева. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
2. Ибрагимов А.К., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Логунов Д.В. О биологическом разнообразии лесных ресурсов Нижегородского Поволжья // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 13. С. 36–38.
3. Куприянов Н.В., Веретенников С.С., Шишов В.В. Леса и лесное хозяйство Нижегородской области. Н. Новгород: Волго-Вятское кн. изд-во, 1995. 350 с.
4. Лебедев Е.В. Влияние типа лесорастительных условий на поглотительную деятельность корневой системы и биологическую продуктивность лиственницы сибирской на уровне организма в онтогенезе // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 1. С. 68–74.
5. Логунов Д.В. Экологические особенности роста и развития представителей рода лиственница (*Larix Mill.*) в условиях антропогенных ландшафтов Нижегородской области: дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2002. 287 с.
6. Логунов Д.В. Дифференциация и средний текущий прирост деревьев лиственницы сибирской в географических культурах (на примере Нижегородской области) // Вестн. Нижегород. гос. с.-х. акад. 2015. № 3(7). С. 27–32.
7. Надеждин В.В. Влияние географического происхождения семян лиственницы на ее рост в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1971. 131 с.
8. Прохоров И.А., Потапов С.П. Практикум по селекции и семеноводству овощных и плодовых культур. М.: Колос, 1975. 304 с.
9. Смольская Е.Н. Содержание хлорофилла в листьях и хвое в зависимости от расположения их в кроне дерева // Эксперим. ботаника. Минск: Изд-во АН БССР, 1962. С. 62–65.

10. Bond J., Randall L. Dwarf and Slow-Growing Conifers. London: Octopus Publishing Group, 1993. 64 p.

11. Carter K.K. Rooting of Tamarack Cuttings (*Larix laricina*). Forest Science, 1984, vol. 30, iss. 2, pp. 392–394.

12. Elias T.S. The Complete Trees of North America: Field Guide and Natural History. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980. 948 p.

13. Mutch R.W., Briggs G.S. The Maintenance of Natural Ecosystems: Smoke as a Factor // Proc. Intern. Symp. «Air Quality and Smoke from Urban and Forest Fires», October 24–26, 1973, Ft. Collins, CO. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, pp. 255–281.

Поступила 06.03.18

UDC 630*18

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.37

Seasonal Dynamics of Basic Needle Pigments of Some Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in a Climate of the Nizhny Novgorod Region

D.V. Logunov, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, pr. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: logunov.dv1977@mail.ru

Larch is one of the most promising tree species for the increasing the productivity of forests and biodiversity of natural areas. The introduction of plants is the most important constructive mechanism for the stable functioning of natural stressful landscapes. The right choice of assortment of hardy-shrub species allows effectively conducting landscaping operations, creating plantations resistant to unfavorable factors on the areas experiencing heavy anthropogenic loads. The creation of plantations predetermines the need to study the biological features of larch. The chlorophyll and carotenoid content in the leaves is an important characteristic of the plant leaf apparatus. The goal of research is to reveal the seasonal character of the change in the chlorophyll and carotenoid content in the needles of some species of larch. During the growing season, a gradual accumulation of pigments occurs in the needles of the species under study. The maximum chlorophyll and carotenoid content is recorded in *Larix pendula* and *Larix eurolepis*. The high values of these indices in the invasive plants in comparison with the native representative of the genus are of great importance for the adaptation of species and indicate the prospects of their economic use for the needs of sustainable construction in the Nizhny Novgorod region.

Keywords: larch, introduction, chlorophyll, carotenoid, forest culture, anthropogenic stress.

REFERENCES

1. Vlasova T.A., Gavrilenko V.F., Kazakov A.S., Makarova E.N., Potapov N.G., Taymla E.A., Tukeeva M.I., Khandobina L.M. *Malyy praktikum po fiziologii rasteniy* [Brief Practical Course on Plant Physiology]. Ed. by M.V. Gusev. Moscow, MSU Publ., 1982. 192 p. (In Russ.)

For citation: Logunov D.V. Seasonal Dynamics of Basic Needle Pigments of Some Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in a Climate of the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 37–42. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.37

2. Ibragimov A.K., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Logunov D.V. O biologicheskom raznoobrazii lesnykh resursov Nizhegorodskogo Povolzh'ya [On the Biological Diversity of Forest Resources of the Nizhniy Novgorod Volga Region]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 13, pp. 36–38.

3. Kupriyanov N.V., Veretennikov S.S., Shishov V.V. *Lesa i lesnoe khozyaystvo Nizhegorodskoy oblasti* [Forests and Forestry of the Nizhny Novgorod Region]. Nizhny Novgorod, Volgo-Vyatskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1995. 350 p. (In Russ.)

4. Lebedev E.V. Vliyaniye tipa lesorastitel'nykh usloviy na poglotitel'nuyu deyatel'nost' kornevoy sistemy i biologicheskuyu produktivnost' listvennitsy sibirskoy na urovne organizma v ontogeneze [The Forest Vegetation Condition Type Influence on the Root System Absorbing Activity and on Siberian Larch Biological Productivity at the Organism Level in Ontogenesis]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [the Bulletin of KrasGAU], 2013, no. 1, pp. 68–74.

5. Logunov D.V. *Ekologicheskie osobennosti rosta i razvitiya predstaviteley roda listvennitsa (Larix Mill.) v usloviyakh antropogennykh landshaftov Nizhegorodskoy oblasti*: dis. ... kand. biol. nauk [Ecological Features of Growth and Development of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Anthropogenic Landscapes of the Nizhny Novgorod Region: Cand. Biol. Sci. Diss.]. Nizhny Novgorod, 2002. 287 p.

6. Logunov D.V. Differentatsiya i sredniy tekushchiy prirost derev'ev listvennitsy sibirskoy v geograficheskikh kul'turakh (na primere Nizhegorodskoy oblasti) [Differentiation and the Average Current Increment Siberian Larch in the Provenance (on the Example of Nizhny Novgorod Region)]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2015, no. 3(7), pp. 27–32.

7. Nadezhdin V.V. *Vliyaniye geograficheskogo proiskhozhdeniya semyan listvennitsy na ee rost podzone khvoynno-shirokolistvennykh lesov* [The Influence of the Geographical Origin of Larch Seeds on Its Growth in the Subzone of Coniferous-Deciduous Forests]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 131 p. (In Russ.)

8. Prokhorov I.A., Potapov S.P. *Praktikum po selektsii i semenovodstvu ovoshchnykh i plodovykh kul'tur* [Practical Course on Selection and Seed Production of Vegetable and Fruit Crops]. Moscow, Kolos Publ., 1975. 304 p. (In Russ.)

9. Smol'skaya E.N. Soderzhanie khlorofilla v list'yakh i khvoe v zavisimosti ot raspolozheniya ikh v krone dereva [The Chlorophyll Content in Leaves and Needles, Depending on Their Location in the Tree Crown]. *Ekspperimental'naya botanika* [Experimental Botany]. Minsk, AS BSSR Publ., 1962, pp. 62–65. (In Russ.)

10. Bond J., Randall L. *Dwarf and Slow-Growing Conifers*. London, Octopus Publishing Group, 1993. 64 p.

11. Carter K.K. Rooting of Tamarack Cuttings (*Larix laricina*). *Forest Science*, 1984, vol. 30, iss. 2, pp. 392–394.

12. Elias T.S. *The Complete Trees of North America: Field Guide and Natural History*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1980. 948 p.

13. Mutch R.W., Briggs G.S. The Maintenance of Natural Ecosystems: Smoke as a Factor. *Proc. Intern. Symp. "Air Quality and Smoke from Urban and Forest Fires"*, October 24–26, 1973, Ft. Collins, CO//Washington, D.C., National Academy of Sciences, pp. 255–281.

Received on March 06, 2018

УДК: 582.475.2+581.174.1/2
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.43

**КОРРЕЛЯЦИЯ ПРИЗНАКОВ ПИГМЕНТНОГО СОСТАВА ХВОИ
ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА ЛИСТВЕННИЦА (*Larix* Mill.)
В ДЕНДРОПАРКЕ СЕРГАЧСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА
НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ***

А.О. Есичев, асп.

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

Лиственница – порода лесообразователь – занимает обширные территории лесного фонда Российской Федерации, обеспечивая видовое разнообразие дендрофлоры. В границах ареала создает высокопродуктивные устойчивые чистые и смешанные насаждения. В Нижегородской области ее распространение достаточно ограничено. Однако здесь она представляет интерес для плантационного лесоводства, городского озеленения, защитного лесоразведения и др. Это и определяет внимание к многоплановой оценке перспектив дальнейшего использования видов рода лиственница. Эффективное привлечение этих видов в состав вновь создаваемых искусственных насаждений невозможно без исследования их адаптационной способности. Наличие зеленых пигментов и каротиноидов обуславливает нормальную работу фотосинтезирующего аппарата растений. Их содержание и соотношение в хвое коррелирует с резистентностью и может выступать индикатором устойчивости к неблагоприятным факторам среды. В связи с этим перед нами стояла задача установления тесноты связи и характера зависимости между показателями пигментного состава хвои различных видов лиственницы в условиях интродукции в Нижегородскую область. Объектом исследований выступали автохтонные и интродуцированные виды лиственницы, представители которых расположены в коллекционных посадках дендрологического комплекса «Явлейка» в Сергачском лесничестве Нижегородской области. Общее количество учетных деревьев – 30 (по 10 деревьев каждого вида). Видовой состав представлен лиственницами сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), даурской (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и Сукачева (*Larix sukaczewii* Djl. Dyl). Для анализа было заготовлено 90 образцов. Для количественного определения пигментов листового аппарата использовали спектрофотометрический анализ как наиболее точный. Концентрацию пигментов вычисляли по уравнениям Ветштейна и Хольма. Результатом анализа стали корреляционные матрицы и уравнения взаимозависимости значений основных характеристик пигментного состава хвои лиственницы. Обнаружены тесные связи между изучаемыми признаками в обобщенном массиве по всем исследуемым видам лиственницы. Опытные значения критериев Стьюдента оказались выше табличных, показатель точности опыта не превысил допустимого для биологических исследований 5-процентного уровня.

* Статья подготовлена по материалам международного симпозиума «Лесное хозяйство: интеграция и вклад в развитие сельских территорий» (15–16 мая 2018 г., г. Нижний Новгород).

Выражаю благодарность научному руководителю, д-ру с.-х. наук Н.Н. Бессчетновой за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению рукописи.

Для цитирования: Есичев А.О. Корреляция признаков пигментного состава хвои представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в дендропарке Сергачского лесничества Нижегородской области // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 43–53. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.43

Численные значения содержания всех основных пигментов свидетельствуют о наличии корреляции.

Ключевые слова: лиственница, хвоя, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды, интродукция, межвидовая изменчивость, корреляция, регрессия.

Введение

Использование различных видов хвойных, в том числе интродуцентов, при создании промышленных плантаций изучаемых как одно из стратегических направлений развития лесного хозяйства во всем мире. Весьма перспективной в контексте рассматриваемых вопросов древесной породой является лиственница, с успехом используемая для этих целей [7]. Важность такой формы лесопользования отмечена в государственной программе [6]. Создание плантационных лесных культур и коротко-ротационных промышленных плантаций интенсивного типа успешно проводилось на территории Российской Федерации [17]. Заметные результаты достигнуты в Нижегородской области [1, 3–5].

Залогом успешного создания и результативного использования промышленных плантаций выступает эффективное формирование их наиболее продуктивного ассортимента [9], сочетающего в себе высокие темпы роста, адаптированность к экологическим условиям и резистентность растений к лимитирующим факторам среды, технические и технологические характеристики древесины. Решение этих непростых задач предполагает многоплановое и детальное изучение биологии вовлекаемых в хозяйственный оборот растений. В числе их важнейших характеристик повсеместно выделяются признаки листового аппарата, в том числе состав и соотношение пластидных пигментов, участвующих в фотосинтезе [10, 15, 16].

Содержание в листовом аппарате пигментов коррелирует с устойчивостью растений к лимитирующим экологическим факторам [16, 22]. Адаптивные реакции хвойных на условия освещенности выражаются в изменении пигментного состава их фотосинтезирующего аппарата [21–23]. Отмечена связь содержания пигментов в хвое с репродуктивной деятельностью растений. Содержание хлорофилла и других пигментов листового аппарата рассматривается в качестве информативных признаков сравнительной оценки и ранней диагностики селекционного материала древесных видов [19]. На территории Российской Федерации, в частности в Нижегородской области, лиственница представлена как аборигенными видами (лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Djil. Dyl)), так и интродуцентами (лиственницы сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) и даурская (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)) [2].

Цель наших исследований – определение тесноты связи и корреляционной зависимости между характеристиками пигментного состава хвои различных видов лиственницы в условиях интродукции в Нижегородскую область.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались деревья лиственницы сибирской, даурской и Сукачева в возрасте 32 лет, представленные в дендрологической коллекции Сергачского лесничества Нижегородской области. Общее

количество учетных деревьев составляло 30 шт., по 10 деревьев каждого вида. Согласно действующему лесорастительному [13] и лесосеменному [14] районированию, опытный участок лежит в границах хвойно-широколиственного (смешанного) лесного района европейской части Российской Федерации (второй лесосеменной район) зоны хвойно-широколиственных лесов (третья лесорастительная зона). Климат – переходный от морского типа к континентальному – охарактеризован расположением участка в границах Скандинавско-Русской провинции, в которой находится Нижегородская область. Обширность территории области обуславливает формирование различий в норме реакции, что предопределяет разную адаптированность интродуцентов к конкретным условиям места произрастания. В связи с этим необходим дифференцированный подход к их оценке при введении в ассортимент вновь создаваемых плантационных и ландшафтных культур, защитных и озеленительных посадок.

Предмет исследований – корреляция и регрессия характеристик пигментного состава хвои различных видов рода лиственница. В качестве методологической основы был принят принцип единственного логического различия, целесообразности и пригодности опыта [8, 11]. В соответствии с этим в схему анализа были вовлечены одновозрастные деревья, размещенные на участке по одинаковым схемам, имеющие равную площадь питания и находящиеся на выровненном экофоне. Для целей исследования в мае 2015 г. одновременно было заготовлено 90 образцов.

Использовали общепринятые методики выявления фотосинтетических пластидных пигментов [17–19, 20] и спектрофотометрический метод анализа как наиболее точный для количественного определения пигментов листового аппарата [17, 24]. Для получения вытяжек пигментов применяли 96 %-й этанол. Оптическую плотность устанавливали спектрофотометром Grating 722. Концентрацию пигментов вычисляли по уравнениям Ветштейна и Хольма [24]. Статистическую обработку первичной лесоводственной информации осуществляли по общепринятым алгоритмам корреляционного и регрессионного анализа [2, 8, 12].

Результаты исследования и их обсуждение

Сравниваемые виды рода лиственница различались средними значениями количественных показателей содержания пигментов в хвое. Статистическая достоверность подавляющего большинства полученных оценок, прежде всего, определена достаточным числом наблюдений: для Дендрологического комплекса «Явлейка» оно составило 90 первичных единиц выборки по каждому признаку. Опытные значения критериев Стьюдента оказались выше табличных, показатель точности опыта не превысил допустимый для биологических исследований 5 %-й уровень. Статистическая достоверность и надежность сведений о количественных характеристиках пигментного состава хвои дали основание для проведения по ним корреляционного и регрессионного анализа.

Во всех случаях значения корреляционных матриц по одноименным парам сравнения оказались относительно близкими, что позволило признать устойчивым характер взаимозависимости между анализируемыми показателями. Полученные матрицы коэффициентов корреляции представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции показателей пигментного состава
хвои лиственницы (обобщенный массив данных по всем видам)**

Показатель	Признак									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Признак 1 – содержание хлорофилла а</i>										
r	1,00	0,87	0,48	0,06	0,74	0,79	0,07	-0,07	-0,77	0,98
±m _r	0,00	0,05	0,09	0,11	0,07	0,07	0,11	0,11	0,07	0,02
t _r	–	16,74	5,09	0,52	10,13	11,63	0,62	0,61	10,85	41,46
<i>Признак 2 – содержание хлорофилла b</i>										
r	0,87	1,00	0,68	-0,43	0,45	0,78	-0,42	0,42	-0,55	0,95
±m _r	0,05	0,00	0,08	0,10	0,10	0,07	0,10	0,10	0,09	0,03
t _r	16,74	–	8,72	4,42	4,60	11,28	4,25	4,22	5,86	27,96
<i>Признак 3 – содержание каротиноидов</i>										
r	0,48	0,68	1,00	-0,51	-0,23	0,07	-0,51	0,51	0,15	0,61
±m _r	0,09	0,08	0,00	0,09	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,09
t _r	5,12	8,77	–	5,43	2,21	0,68	5,37	5,33	1,34	6,85
<i>Признак 4 – отношение содержания хлорофилла а к содержанию хлорофилла b</i>										
r	0,06	-0,43	-0,51	1,00	0,44	-0,15	1,00	-1,00	-0,31	-0,15
±m _r	0,11	0,10	0,09	0,00	0,10	0,11	0,01	0,01	0,11	0,11
t _r	0,53	4,47	5,47	–	4,55	1,37	114,80	114,11	2,92	1,31
<i>Признак 5 – отношение содержания хлорофилла а к содержанию каротиноидов</i>										
r	0,74	0,45	-0,23	0,44	1,00	0,82	0,46	-0,46	-0,97	0,62
±m _r	0,07	0,10	0,10	0,10	0,00	0,06	0,10	0,10	0,03	0,09
t _r	10,31	4,68	2,24	4,58	–	13,11	4,66	4,63	35,45	6,95
<i>Признак 6 – отношение содержания хлорофилла b к содержанию каротиноидов</i>										
r	0,79	0,78	0,07	-0,15	0,82	1,00	-0,13	0,13	-0,88	0,78
±m _r	0,07	0,07	0,11	0,11	0,06	0,00	0,11	0,11	0,05	0,07
t _r	11,90	11,55	0,69	1,38	13,18	–	1,22	1,22	16,38	11,06
<i>Признак 7 – доля содержания хлорофилла а</i>										
r	0,07	-0,42	-0,51	1,00	0,46	-0,13	1,00	-1,00	-0,32	-0,14
±m _r	0,11	0,10	0,09	0,01	0,10	0,11	–	–	0,11	0,11
t _r	0,63	4,38	5,50	116,86	4,72	1,23	–	–	3,04	1,22
<i>Признак 8 – доля содержания хлорофилла b</i>										
r	-0,07	0,42	0,51	-1,00	-0,46	0,13	-1,00	1,00	0,32	0,14
±m _r	0,11	0,10	0,09	0,01	0,10	0,11	–	–	0,11	0,11
t _r	0,63	4,38	5,50	116,86	4,72	1,23	–	–	3,04	1,22
<i>Признак 9 – отношение содержания каротиноидов к сумме хлорофиллов а + b</i>										
r	-0,77	-0,55	0,15	-0,31	-0,97	-0,88	–	0,32	1,00	-0,68
±m _r	0,07	0,09	0,11	0,10	0,03	0,05	0,10	0,11	0,00	0,08
t _r	11,38	6,14	1,39	3,02	36,54	16,79	3,09	3,07	–	8,18
<i>Признак 10 – суммарное содержание пигментов</i>										
r	0,98	0,95	0,61	-0,15	0,62	0,78	-0,14	0,14	-0,68	1,00
±m _r	0,02	0,03	0,09	0,11	0,09	0,07	0,11	0,11	0,08	0,00
t _r	43,76	29,51	7,19	1,37	7,21	11,40	1,25	1,24	8,23	–

Примечание: r – коэффициент корреляции; ±m_r – ошибка; t_r – фактическое значение t-критерия Стьюдента.

Весьма высокая (по шкале Чеддока) теснота связи обнаружена при сопоставлении признаков «содержание хлорофилла *a*» и «суммарное содержание пигментов» ($r = 0,97 \pm 0,02$; $t = 41,46$). Высокая теснота связи зафиксирована между признаками «содержание хлорофилла *a*» и «содержание хлорофилла *b*» ($r = 0,87 \pm 0,05$; $t = 16,74$), а также по отношению содержания различных форм хлорофилла к содержанию каротиноидов: отношение содержания хлорофилла *a* – $r = 0,74 \pm 0,07$; $t = 10,13$; отношение содержания хлорофилла *b* ($r = 0,79 \pm 0,07$; $t = 11,63$). В случае признака «содержание хлорофилла *b*» прослеживается аналогичная картина: весьма высокая связь с суммарным содержанием пигментов ($r = 0,95 \pm 0,03$; $t = 27,96$); высокая связь – с отношением содержания хлорофилла *b* к содержанию каротиноидов ($r = 0,78 \pm 0,07$; $t = 11,28$). Однако в этом случае связь с признаком «отношение содержания хлорофилла *a* к содержанию каротиноидов» оказалась умеренной ($r = 0,45 \pm 0,10$; $t = 4,60$). Корреляция между признаками «содержание каротиноидов» и «суммарное содержание пигментов» относится к заметной ($r = 0,61 \pm 0,09$; $t = 6,85$). Зависимость содержания каротиноидов от содержания хлорофилла *a* оказалась умеренной ($r = 0,48 \pm 0,09$; $t = 5,12$), по содержанию хлорофилла *b* – заметной ($r = 0,68 \pm 0,08$; $t = 8,77$).

Характер взаимосвязи значений основных характеристик пигментного состава хвои лиственницы представлен в табл. 2.

В табл. 2 приведены уравнения регрессии и оценки их статистической достоверности, полученные для ключевых количественных признаков содержания основных пигментов в хвое лиственницы.

Таблица 2

**Взаимозависимость основных характеристик пигментного состава
хвои лиственницы**

Признак	Уравнение $y = ax + b$	R ²	t-статистика коэффициентов		F	Значи- мость F ₀₅
			a	b		
<i>Признак 1 – содержание хлорофилла a</i>						
2	$y = 1,628x + 0,920$	0,761	16,741	4,715	280,257	4,29E-29
3	$y = 4,681x + 1,351$	0,229	5,116	2,466	26,178	1,81E-06
4	$y = 0,209x + 3,695$	0,003	0,528	4,410	0,279	5,99E-01
5	$y = 0,490x + 0,715$	0,547	10,309	2,134	106,267	8,38E-17
6	$y = 1,198x + 0,163$	0,617	11,903	0,484	141,678	4,99E-20
7	$y = 2,565x + 2,320$	0,005	0,634	1,034	0,401	5,28E-01
8	$y = 4,884x - 2,320$	0,005	-0,634	4,125	0,401	5,28E-01
9	$y = -37,03x + 7,797$	0,595	-11,382	24,015	129,551	5,53E-19
10	$y = 0,631x - 0,092$	0,956	43,755	-0,944	1914,463	1,68E-61
<i>Признак 2 – содержание хлорофилла b</i>						
1	$y = 0,467x + 0,042$	0,761	16,741	0,361	280,257	4,29E-29
3	$y = 3,575x - 0,153$	0,466	8,767	-0,625	76,862	1,24E-13
4	$y = -0,858x + 3,782$	0,185	-4,469	9,320	19,975	2,33E-05
5	$y = 0,159x + 0,868$	0,199	4,682	3,640	21,919	1,03E-05
6	$y = 0,634x - 0,128$	0,602	11,549	-0,700	133,383	2,55E-19
7	$y = -7,794x + 7,252$	0,179	-4,375	6,010	19,145	3,32E-05
8	$y = 7,794x - 0,542$	0,179	4,375	-0,940	19,145	3,32E-05
9	$y = -14,08x + 3,367$	0,300	-6,142	14,717	37,726	2,30E-08
10	$y = 0,329x - 0,233$	0,908	29,514	-3,077	871,079	2,02E-47

Окончание табл. 2

Признак	Уравнение $y = ax + b$	R^2	t-статистика коэффициентов		F	Значи- мость F_{05}
			a	b		
<i>Признак 3 – содержание каротиноидов</i>						
1	$y = 0,049x + 0,392$	0,229	5,116	9,793	26,178	1,81E-06
2	$y = 0,130x + 0,337$	0,466	8,767	11,319	21,745	1,10E-05
4	$y = -0,193x + 1,001$	0,256	-5,497	13,511	30,213	3,73E-07
5	$y = -0,016x + 0,705$	0,054	-2,251	14,245	5,069	2,69E-02
6	$y = 0,012x + 0,557$	0,005	0,696	10,039	0,484	4,89E-01
7	$y = -1,787x + 1,805$	0,258	-5,526	8,240	30,537	3,29E-07
8	$y = -0,103x + 0,636$	0,198	-4,663	58,695	21,745	1,10E-05
9	$y = 0,724x + 0,523$	0,022	1,400	10,132	1,959	1,65E-01
10	$y = -0,103x + 0,636$	0,198	-4,663	58,695	21,745	1,10E-05

Примечание: R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации; F – критерий Фишера; F_{05} – теоретическое значение критерия Фишера на 5 %-м уровне значимости.

По всем признакам опытное значение критерия Фишера превышает табличное. Уравнение прямой линии достаточно надежно описывает взаимосвязь признаков «содержание хлорофилла a» и «суммарное содержание пигментов»: $y = 0,631x - 0,092$ ($R^2 = 0,956$). Достаточно близкий уровень зависимости наблюдается при сопоставлении признаков «содержание хлорофилла a» и «содержание хлорофилла b»: $y = 1,628x + 0,920$ ($R^2 = 0,761$).

В представленных уравнениях значения коэффициентов при аргументах (a) и свободных членов (b) статистически достоверны и близки, о чем свидетельствуют t-критерии, во много раз превышающие критический уровень: $t_a = 43,755$ и $16,741$; $t_b = -0,944$ и $4,715$ соответственно. Относительно достоверна и положительно направлена связь признака «содержание хлорофилла a» с двумя признаками «отношение содержания хлорофилла b к содержанию каротиноидов» и «отношение содержания хлорофилла a к содержанию каротиноидов». Уравнения имели следующий вид: $y = 1,198x + 0,163$ ($R^2 = 0,617$) и $y = 0,490x + 0,715$ ($R^2 = 0,547$). По остальным признакам коэффициент достоверности аппроксимации оказался преимущественно статистически ненадежен.

Заключение

Связь между содержанием в хвое пигментов разных форм для исследуемых видов лиственницы тесная и статистически достоверная, что позволит использовать эти показатели в качестве критерия информационной оценки селекционного материала. Количественные показатели содержания зеленых пигментов тесно связаны с суммарным содержанием пигментов, включая каротиноиды, в фотосинтезирующем аппарате анализируемых видов лиственницы. Связь показателей содержания зеленых пигментов с долей их участия, а также между их отношениями друг к другу предельно низкая. Полученные в ходе исследований данные могут подтвердить резистентность опытных интродуцентов к лимитирующим факторам среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессчетнов В.П. Перспективы развития плантационного лесоводства на селекционно-генетической основе в Нижегородской области // Лесной комплекс Нижегородского Поволжья: проблемы, состояние и перспективы развития. Н. Новгород: Нижегород. гос. с.-х. акад., 2006. С. 21–32.

2. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Есичев А.О. Оценка физиологического состояния представителей рода лиственница (*Larix Mill.*) в условиях Нижегородской области // Лесн. журн. 2018. № 1. С. 9–17. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Бессчетнов В.П., Чишкина А.В., Рубцов Б.В. Сравнительная оценка таксационных показателей ели европейской в лесных культурах и промышленных плантациях на севере Нижегородской области // Лесной комплекс Нижегородского Поволжья: проблемы, состояние и перспективы развития. Н. Новгород: Нижегород. гос. с.-х. акад., 2006. С. 32–36.

4. Бокова В.В. Перспективы создания плантационных культур ели в Нижегородской области // Защитное лесоразведение, мелиорация земель и проблемы земледелия в Российской Федерации: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Волгоград, 23–26 сент. 2008 г. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2008. С. 138–140.

5. Бокова В.В. Состояние и перспективы развития плантационных культур в Нижегородской области и России // Нижегород. аграр. вестн. Н. Новгород: Нижегород. гос. с.-х. акад., 2012. С. 284–290.

6. Государственная программа Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства на 2013–2020 гг.»: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 дек. 2012 г. № 2593-р // Собр. законодательства РФ. 2013. № 2. 230 с.

7. Демаков Ю.П., Краснов В.Г., Исаев А.В. Закономерности строения и развития древостоя на плантации лиственницы сибирской в краткочерном экотопе // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 1(33). С. 36–49.

8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

9. Есичев А.О. Сравнительная оценка ассортимента клонов плюсовых деревьев лиственницы Сукачевы (*L. Sukaczewii Džil*) на лесосеменной плантации в Нижегородской области // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2016. № 3(59). С. 66–68.

10. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Особенности сезонной динамики пигментов в листьях растений сосняка кустарничково-сфагнового // Лесн. журн. 2009. № 4. С. 24–32. (Изв. высш. учеб. заведений).

11. Коптев В.В., Богомягких В.А., Трифонова М.Ф. Основы научных исследований и патентования. М.: Колос, 1993. 144 с.

12. Лакин Г.Ф. Биометрия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1980. 293 с.

13. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18 авг. 2014 г. № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации» (с изменениями на 21 марта 2016 г.): зарегистрировано в Мин-ве юстиции РФ 29 сент. 2014 г., № 34186. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420224339> (дата обращения: 30.03.2018).

14. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 28 марта 2016 г. № 100 «О внесении изменений в приказ Рослесхоза от 08.10.2015 № 353 “Об установлении лесосеменного районирования”» // Собр. законодательства РФ. 2013. № 2. 230 с.

15. Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Внутри- и межвидовые метаболические особенности у лиственницы при адаптации на севере // Лесн. журн. 2008. № 5. С. 30–36. (Изв. высш. учеб. заведений).

16. Ходасевич Э.В. Фотосинтетический аппарат хвойных (онтогенетический аспект). Минск: Наука и техника, 1982. 199 с.

17. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений. М.: Наука, 1971. С. 154–170.

18. Duysens L.N.M., Amesz J., Kamp B.M. Two Photochemical Systems in Photosynthesis // Nature. 1961. Vol. 190, no. 4775. Pp. 510–511.

19. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy // Current Protocols in Food Analytical Chemistry / Ed. by R.E. Wrolstad, T.E. Acree, H. An, E.A. Decker, M.H. Penner, D.S. Reid, S.J. Schwartz, C.F. Shoemaker, P. Sporns. New York: John Wiley and Sons, 2001. F4.3.1-F4.3.8. Available at: http://www.thyssen-web.de/assets/files/fd_documents/sp_buche/uv_vis_pigmente.pdf (accessed 10.05.2014).

20. Miazek K., Ledakowicz S. Chlorophyll Extraction from Leaves, Needles and Microalgae: a Kinetic Approach // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2013. Vol. 6. no. 2. Pp. 107–115. Available at: <http://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/viewFile/642/580> (accessed 17.07.2014).

21. Niinemets Ü. Stomatal Conductance Alone does not Explain the Decline in Foliar Photosynthetic Rates with Increasing Tree Age and Size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* // Tree Physiology. 2002. Vol. 22, iss. 8. Pp. 515–535. Available at: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/22/8/515.full.pdf+html> (accessed 27.03.2012).

22. Niinemets Ü., Ellsworth D.S., Lukjanova A., Tobias M. Site Fertility and the Morphological and Photosynthetic Acclimation of *Pinus sylvestris* Needles to Light // Tree Physiology. 2001. Vol. 21, iss. 17, Pp. 1231–1244. Available at: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/21/17/1231.full.pdf+html> (accessed 27.03.2012).

23. Niinemets Ü., Ellsworth D.S., Lukjanova A., Tobias M. Dependence of Needle Architecture and Chemical Composition on Canopy Light Availability in Three North American *Pinus* Species with Contrasting Needle Length // Tree Physiology. 2002. Vol. 22, iss. 11. Pp. 747–761. Available at: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/22/11/747.full.pdf+html> (accessed 29.03.2012).

24. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // Journal of Plant Physiology. 1994. Vol. 144, iss. 3. Pp. 307–313. Available at: http://www.thyssen-web.de/assets/files/fd_documents/sp_buche/Wellburn.pdf (accessed 29.03.2012).

Поступила 06.03.18

UDC 582.475.2+581.174.1/.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.43

Correlation of Characteristics of the Needle Pigment Combination of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Arboretum of the Sergachsky Forestry in the Nizhny Novgorod Region

A.O. Esichev, Postgraduate Student

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, pr. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: andrey.esichev@mail.ru

Larch as a forest-forming species, occupies vast territories of the forest fund of the Russian Federation, providing a species diversity of dendroflora. Within the range, larch creates highly productive, stable, pure and mixed plantations. Larch distribution is rather limited in the Nizhny Novgorod region. This species is of interest for plantation forestry, urban landscaping, protective forestation. This attracts attention to a multifaceted assessment of the prospects for the further species use of the genus larch. The effective attraction for of these species in the newly created artificial plantations is impossible without a study of their adaptive capacity.

For citation: Esichev A.O. Correlation of Characteristics of the Needle Pigment Combination of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Arboretum of the Sergachsky Forestry in the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 43–53. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.43

Green pigments and carotenoids determine the normal operation of the plant photosynthetic apparatus. Their content and ratio in needles correlate with resistance and can be the indicator of resistance to unfavorable environmental factors. In this regard, the author faces a task of establishing the correlation ratio and the nature of the dependence between characteristics of the needles pigment combination of various species of larch during the introduction in the Nizhny Novgorod region. The study subject is autochthonous and introduced species of larch; their representatives are located in the collection plantings of the dendrological complex “Yavleika” in the Sergachsky forestry of the Nizhny Novgorod region. The total number of accounting trees is 30 (10 trees of each type). Species composition is represented by Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), Dahurian (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) and Sukachev's larch (*Larix sukaczewii* Djil. Dyl). 90 samples are prepared for the analysis. Spectrophotometric analysis is applied as the most accurate for the quantitative estimation of pigments of the leaf apparatus. The concentration of pigments is calculated by the equations of Wetstein and Holm. The result of the analysis is the correlation matrices and the equations of interdependence of values of main characteristics of the pigment combination of larch needles. The linkage between the studied characteristics for all the larch species are determined. Experimental values of the Student's test turn out to be higher than the tabulated ones; the accuracy factor of the experiment does not exceed the values permissible for biological studies of the five-percent level. The numerical values of the content of all the main pigments indicate a correlation.

Keywords: larch, needles, chlorophyll-*a*, chlorophyll-*b*, carotenoid, introduction, interspecies variation, correlation, regression.

REFERENCES

1. Besschetnov V.P. Perspektivy razvitiya plantatsionnogo lesovodstva na selekcionno-geneticheskoy osnove v Nizhegorodskoy oblasti [Prospects for the Development of Plantation Forestry on the Breeding and Genetic Basis in the Nizhny Novgorod Region]. *Lesnoy kompleks Nizhegorodskogo Povolzh'ya: problemy, sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Forest Complex of the Nizhny Novgorod Volga Region: Problems, State and Development Prospects]. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2006, pp. 21–32. (In Russ.)
2. Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Esichev A.O. Otsenka fiziologicheskogo sostoyaniya predstaviteley roda listvennitsa (*Larix* Mill.) v usloviyakh Nizhegorodskoy oblasti [Physiological State Evaluation of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod Region]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 1, pp. 9–17.
3. Besschetnov V.P., Chishkina A.V., Rubtsov B.V. Sravnitel'naya otsenka taksatsionnykh pokazateley eli evropeyskoy v lesnykh kul'turakh i promyshlennykh plantatsiyakh na severe Nizhegorodskoy oblasti [Comparative Assessment of Taxation Indicators of Norway Spruce in Forest Cultures and Industrial Plantations in the North of the Nizhny Novgorod Region]. *Lesnoy kompleks Nizhegorodskogo Povolzh'ya: problemy, sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Forest Complex of the Nizhny Novgorod Region: Problems, State and Development Prospects]. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2006, pp. 32–36. (In Russ.)
4. Bokova V.V. Perspektivy sozdaniya plantatsionnykh kul'tur eli v Nizhegorodskoy oblasti [Prospects for the Creation of Plantation Spruce Crops in the Nizhny Novgorod Region]. *Zashchitnoe lesorazvedenie, melioratsiya zemel' i problemy zemledeliya v Rossiyskoy Federatsii: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Volgograd, 23–26 sent. 2008 g.* [Protective Afforestation, Land Reclamation and Farming Problems in the Russian Federation: Proc. Intern. Sci. Practical Conf., Volgograd, September 23–26, 2008]. Volgograd, All-Russ. Agroforestry Research Institute Publ., 2008, pp. 138–140. (In Russ.)
5. Bokova V.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya plantatsionnykh kul'tur v Nizhegorodskoy oblasti i Rossii [State and Prospects of Development of Plantation Crops in the Nizhny Novgorod Region and Russia]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2012, vol. 1, pp. 284–290.

6. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitie lesnogo khozyaystva na 2013–2020 gg.»: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 dek. 2012 g. № 2593-r [The State Program of the Russian Federation “Forestry Development for 2013–2020”: Approved by the Decree of the Government of the RF of 28 December 2012, No. 2593-r]. *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collected Acts of the Russian Federation], 2013, no. 2. 230 p.

7. Demakov Yu.P., Krasnov V.G., Isaev A.V. Zakonomernosti stroeniya i razvitiya drevostoya na plantatsii listvennitsy sibirskoy v kratkopoymennom ekotopie [Structural and Developmental Patterns of the Stand in the Siberian Larch Plantations in the Bottomland Ecotope]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2017, no. 1(33), pp. 36–49.

8. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Field Test Methodology (with the Basics of Statistical Processing of Research Results)]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 351 p. (In Russ.)

9. Esichev A.O. Sravnitel'naya otsenka assortimenta klonov plusovoykh derev'ev listvennitsy Sukacheva (*L. Sukaczewii* Djil) na lesosemnoy plantatsii v Nizhegorodskoy oblasti [Comparative Assessment of Plus Trees Clones of Sukachev Larch (*L. Sukaczewii* Djil) Grown on the Forest-Seed Plantation in Nizhegorodsky Region]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestia of Orenburg State Agrarian University], 2016, no. 3(59), pp. 66–68.

10. Zarubina L.V., Konovalov V.N. Osobennosti sezonnoy dinamiki pigmentov v list'yakh rasteniy sosnyaka kustarnichkovo-sfagnovogo [Seasonal Dynamics' Peculiarities of Leaves' Pigments in Fruticulose-sphagnous Pine Stands]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2009, no. 4, pp. 24–32.

11. Koptev V.V., Bogomyagkikh V.A., Trifonova M.F. *Osnovy nauchnykh issledovaniy i patentovedeniya* [Fundamentals of Scientific Research and Patent Science]. Moscow, Kolos Publ., 1993. 144 p. (In Russ.)

12. Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 293 p. (In Russ.)

13. *Prikaz Ministerstva prirodnikh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 18 avg. 2014 g. № 367 «Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nykh zon Rossiyskoy Federatsii i Perechnya lesnykh rayonov Rossiyskoy Federatsii» (s izmeneniyami na 21 marta 2016 g.): zaregistrirvano v Ministerstve yustitsii RF 29 sent. 2014 g., № 34186* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation on August 18, 2014, No. 367 “On Approval of the List of Forest Plant Zones of the Russian Federation and the List of Forest Regions of the Russian Federation” (as Amended on March 21, 2016): Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on 29 September 2014, No. 34186]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420224339> (accessed 30.03.2018).

14. *Prikaz Federal'nogo Agentstva lesnogo khozyaystva ot 28 marta 2016 g. № 100 «O vnesenii izmeneniy v prikaz Rosleskhoza ot 08.10.2015 № 353 «Ob ustanovlenii lesosemennogo rayonirovaniya»* [Order of the Federal Forestry Agency No. 100 of March 28, 2016 “On Amendments to the Order of the Federal Forestry Agency No. 353 of 08.10.2015 “On the Establishment of Forest Seed Zoning”]. *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collected Acts of the Russian Federation], 2013, no. 2. 230 p.

15. Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Vnutri- i mezhhvidovye metabolicheskie osobennosti u listvennitsy pri adaptatsii na severe [Intra- and Interspecies Metabolic Peculiarities of Larch under Adaptation to North]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2008, no. 5, pp. 30–36.

16. Khodasevich E.V. *Fotosinteticheskiy apparat khvoynykh: ontogeneticheskiy aspekt* [Photosynthetic Apparatus of Conifers: Ontogenetic Aspect]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 199 p. (In Russ.)

17. Shlyk A.A. Opredelenie khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'ev [Determination of Chlorophylls and Carotenoids in Extracts of Green Leaves]. *Biokhimicheskie metody v fiziologii rasteniy* [Biochemical Methods in Plant Physiology]. Moscow, Nauka Publ, 1971, pp. 154–170. (In Russ.)

18. Duysens L.N.M., Ames J., Kamp B.M. Two Photochemical Systems in Photosynthesis. *Nature*, 1961, vol. 190, no. 4775, pp. 510–511.

19. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. Ed. by R.E. Wrolstad, T.E. Acree, H. An, E.A. Decker, M.H. Penner, D.S. Reid, S.J. Schwartz, C.F. Shoemaker, P. Sporns. New York, John Wiley and Sons, 2001, F4.3.1-F4.3.8. Available at: http://www.thyssen-web.de/assets/files/fd_documents/sp_buche/uv_vis_pigmente.pdf (accessed 10.05.2014).

20. Miazek K., Ledakowicz S. Chlorophyll Extraction from Leaves, Needles and Microalgae: a Kinetic Approach. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 107–115. Available at: <http://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/viewFile/642/580> (accessed 17.07.2014).

21. Niinemets Ü. Stomatal Conductance Alone does not Explain the Decline in Foliar Photosynthetic Rates with Increasing Tree Age and Size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 2002, vol. 22, iss. 8, pp. 515–535. Available at: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/22/8/515.full.pdf+html> (accessed 27.03.2012).

22. Niinemets Ü., Ellsworth D.S., Lukjanova A., Tobias M. Site Fertility and the Morphological and Photosynthetic Acclimation of *Pinus sylvestris* Needles to Light. *Tree Physiology*, 2001, vol. 21, iss. 17, pp. 1231–1244. Available at: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/21/17/1231.full.pdf+html> (accessed 27.03.2012).

23. Niinemets Ü., Ellsworth D.S., Lukjanova A., Tobias M. Dependence of Needle Architecture and Chemical Composition on Canopy Light Availability in Three North American *Pinus* Species with Contrasting Needle Length. *Tree Physiology*, 2002, vol. 22, iss. 11, pp. 747–761. Available at: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/22/11/747.full.pdf+html> (accessed 29.03.2012).

24. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*, 1994, vol. 144, iss. 3, pp. 307–313. Available at: http://www.thyssen-web.de/assets/files/fd_documents/sp_buche/Wellburn.pdf (accessed 29.03.2012).

Received on March 06, 2018

УДК: 630*161.4:631.811.1+630*181.22:630*232.31

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.54

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ ПЛАСТИДНЫХ ПИГМЕНТОВ У ПОДРОСТА ЕЛИ ПРИ ОНТОГЕНЕЗЕ БЕРЕЗНЯКА ЧЕРНИЧНОГО

Л.В. Зарубина¹, д-р с.-х. наук, проф.

В.Н. Коновалов², д-р с.-х. наук, проф.

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555;

e-mail: Liliya270975@yandex.ru

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

С помощью бумажной хроматографии и спектрофотометрического метода у подростка ели в березняке черничных типов леса на Северо-Востоке России была изучена сезонная и многолетняя динамика накопления фотосинтетических пигментов при онтогенезе березового древостоя. Установлено, что минимальное количество хлорофилла и каротиноидных пигментов в хвое подростка ели содержится в 1–8-летних насаждениях березняка, когда поступающий под полог световой поток еще не ограничивает потребность ели в солнечной радиации. В этот период в хвое отмечаются максимальные соотношения между компонентами хлорофилла и минимальные между светособирающим и хлорофилл-белковыми комплексами в энергопреобразующей системе хлоропластов (1,05 : 1,40). По данным авторов, такие соотношения у подростка ели соответствуют максимальной интенсивности фотосинтеза и способствуют усилению в хлоропластах синтеза углеводов. При увеличении возраста березняка в связи с образованием верхнего затеняющего полога из листовых пород концентрация пигментов в хвое ели постепенно возрастает. Максимальная концентрация хлорофилла и минимальные соотношения между его компонентами у подростка ели наблюдаются в 50–80-летних березняках, когда подрост испытывает острый дефицит солнечной радиации. Постепенные рубки в березняках черничных типов леса интенсивностью по объему 45...52 %, увеличивая приток солнечного света под полог, приводят к снижению в хвое подростка ели содержания зеленых пигментов, особенно хлорофилла *b*, увеличивают соотношение хлорофилл *a*/хлорофилл *b*, сокращают соотношение в энергопреобразующей системе хлоропластов между светособирающим и хлорофилл-белковыми комплексами до 1,26, одновременно повышают интенсивность фотосинтеза в 2,2–2,4 раза и активизируют в клетке процессы, связанные с синтезом углеводов. Установлено, что у подростка ели в березняках черничных типов леса в зимний период явно выраженная деградация хлорофилла отсутствует, хотя обычно она отмечается. В сезонной динамике накопления зеленых пигментов у подростка ели явно отмечаются максимумы: первый большой летом, второй (менее значительный) после завершения листопада, который у деревьев ели отсутствует.

Ключевые слова: подрост ели, березняк черничный, хлорофилл, каротиноиды, энергопреобразующие комплексы пластид, освещенность.

Введение

Изучению пигментного комплекса древесных растений посвящено значительное число публикаций. Интерес к данной проблеме вызван особой ролью

Для цитирования: Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Динамика накопления пластидных пигментов у подростка ели при онтогенезе березняка черничного // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 54–64. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.54

хлорофилла и каротиноидных пигментов зеленого листа в процессе фотосинтеза. Концентрация зеленых и желтых пигментов в фотосинтезирующих органах растения часто используется в качестве биологического индикатора, определяющего потенциальную фотосинтетическую продуктивность вида, его реакцию на динамику факторов внешней среды, степень адаптации к изменяющимся экологическим условиям, скорость ассимиляции атмосферного углерода [2, 5, 11, 15, 17–19, 22–25]. В связи с этим определен интерес представляет изучение динамики накопления хлорофилла и каротиноидных пигментов в хвое подроста ели при онтогенезе березняка черничного на различных возрастных этапах его формирования, особенностей сезонной динамики в связи со сменой светового и температурного режимов. На Севере такие исследования до последнего времени не проводились.

Цель исследования – изучение сезонной и многолетней динамики накопления фотосинтетических пигментов в хвое подроста ели в березняке черничном при сезонной смене светового и температурного режимов, возрастном развитии подроста и проведении постепенных рубок. Для сравнения аналогичные исследования осуществлялись также в осиннике черничном.

Объекты и методы исследования

Изучение содержания пигментов в хвое подроста ели в березняке черничных типов леса на различных возрастных этапах развития подроста проводили на стационарных пробных площадях Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства (опытные участки «Ломовое» и «Холмогорская»). Описание пробных площадей – в [4, 5]. Дополнительные исследования выполняли на временных пробных площадях березняка путем подбора хронорядов аналогичного состава и соответствующего возраста с одновременным определением в них светового режима. Для получения данных по содержанию пигментов в экстрактах свежей хвои использовали спектрофотометрический метод (спектрофотометр СФ-46М фирмы «ЛОМО») [20] и метод бумажной хроматографии [13], для определения хлорофилла в светособирающем и хлорофилл-белковых комплексах фотосистем I и II энергопреобразующей системы хлоропластов – методику [14]. Освещенность замеряли в околополуденные часы [1, 18, 24, 25].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования светового режима на изучаемых объектах показали (рис. 1), что наибольшее количество света еловый подрост получает на свежих вырубках и в 1–8-летнем березняке, когда возобновляющиеся листовые породы для подроста еще не создают серьезного верхнего затенения (все показатели на рис. 1, 2 представляют собой средние значения, полученные на объектах двух опытных участков).

В 13-летнем березовом насаждении береза и примесь осины уже начинают создавать подросту ели конкуренцию за солнечную радиацию. В околополуденные часы ясных безоблачных дней июня–июля в условиях северотаежной подзоны под полог насаждения такого возраста проникает около 65 % солнечной радиации, приходящей к кронам верхнего полога. При дальнейшем разрастании и укреплении эдафических позиций береза и осина начинают вытеснять ель во второй ярус, где условия для ее возобновления и роста становятся крайне неблагоприятными. Продолжительность дневного освещения для подпологовой ели значительно сокращается.

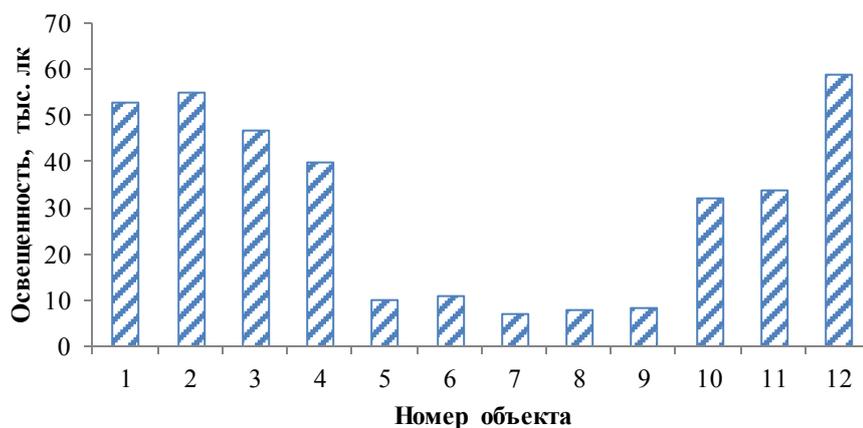


Рис. 1. Освещенность на опытных объектах: 1 – 10-дневная вырубка; 2–6, 8 – березняки возраста соответственно 1, 8, 13, 23, 33 и 80 лет; 7 и 10 – березняки возраста 53 года соответственно без вырубкой и с вырубкой 50% запаса; 9, 11 – осинники возраста 53 года соответственно без вырубкой и с вырубкой 45 % запаса; 12 – открытое место

Уже к 23-летнему возрасту березняка в дневное время под его полог проникает не более 10...12 % приходящей солнечной радиации. Установлено [1, 18, 24, 25], что для формирования перспективного подроста ели необходимый минимум освещенности не должен быть ниже 25...40 %.

В березняке старшего возраста, несмотря на некоторое увеличение изреженности крон верхнего полога, световые условия для подпологовой ели остаются неблагоприятными и не соответствуют ее биологической потребности.

Исследования фонда фотосинтетических пигментов у подроста ели при онтогенезе березняка черничного типа леса показали (рис. 2), что наименьшая концентрация зеленых пигментов в его хвое содержится на однолетней вырубке (0,40 мг хлорофилла *a* и 0,15 мг хлорофилла *b* на 1 г свежей хвои) в условиях максимальной освещенности. Это в 1,5–2,0 раза меньше, чем в спелом березняке.

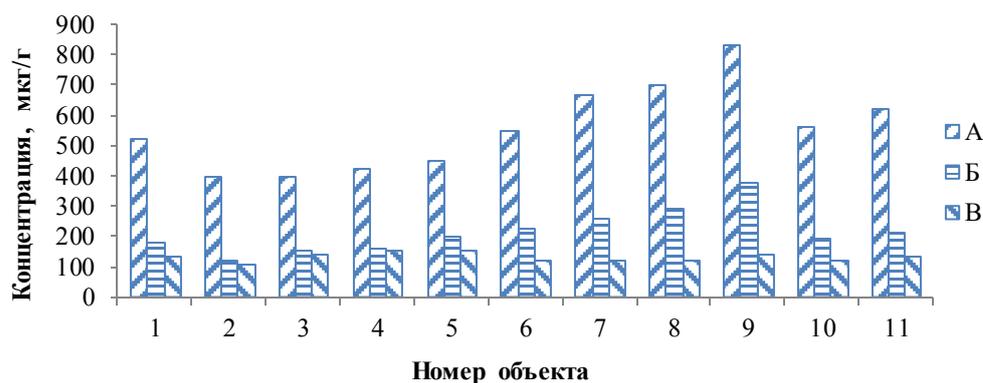


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* (А), хлорофилла *b* (Б), каротиноидов (В) у подроста ели на опытных объектах: 1 – 10-дневная вырубка; 2–6, 8 – березняки возраста соответственно 1, 8, 13, 23, 33 и 80 лет; 7 и 10 – березняки возраста 53 года соответственно без вырубкой и с вырубкой 50% запаса; 9 и 11 – осинники возраста 53 года соответственно без вырубкой и с вырубкой 45 % запаса

На 10-дневной вырубке концентрация зеленых пигментов в хвое подростка ели дорубочных генераций еще сохраняется на достаточно высоком уровне, несмотря на отсутствие затеняющего полога. На вырубке такой давности концентрация пигментов в хвое подростка уже на 24 % ниже, чем в спелом березовом древостое, однако все еще продолжает быть на 36 % выше, чем у подростка на однолетней вырубке. По мере поселения и разрастания на вырубке березы и осины в результате ухудшения световых условий концентрация пигментов в хвое начинает постепенно увеличиваться. Уже в 23-летнем возрасте березняка концентрация зеленых пигментов становится на 29 % выше, чем на однолетней вырубке. Особенно активно в этот период в хвое накапливается хлорофилл *b*.

Наблюдаемое в этот период снижение в хвое отношения между хлорофиллом *a* и *b* (от 2,7–3,0 до 2,3–2,5) указывает на ослабление позиций ели по отношению к сопутствующим породам и ухудшение ее жизненного состояния, обуславливаемого общим недостатком световой энергии [14, 18, 19]. Ослабление позиций ели могло быть связано также с переориентацией метаболических процессов с синтеза клетчатки на биосинтез дополнительного количества пигментов, необходимых для улавливания рассеянной радиации. Такое состояние подростка подтверждается и его слабым ростом [3–5] из-за возможного снижения в хлоропластах синтеза углеводов [9, 16]. При увеличении возраста березняка содержание хлорофилла у подростка ели продолжает повышаться. Максимальное количество пигментов в его хвое накапливается в спелом березняке. В 53-летних березняке и осиннике черничных типов леса у подростка ели в однолетней хвое содержится 0,69...0,83 мг/г хлорофилла *a* и 0,28...0,38 мг/г хлорофилла *b*. Увеличение возраста березняка до 80 лет уже мало влияет на концентрацию зеленых пигментов у ели. После вырубки в 53-летних березняке и осиннике 45...50 % листовного запаса содержание хлорофилла в хвое на второй год снизилось на 18...27 %, что привело к росту соотношения хлорофилл *a* / хлорофилл *b* от 2,1–2,6 до 2,8–3,0, при этом у подростка значительно возросла интенсивность фотосинтеза [3–5]. Если обратиться к известной концепции А.Л. Курсанова [11], А.Т. Мокроносова [12] и Н.И. Судачковой [15], указывающих на существование в растительной клетке разветвленных путей использования ассимилятов и наличие конкуренции за них между отдельными метаболическими путями, можно заключить, что наблюдаемое в хвое ели увеличение отношения хлорофилл *a* / хлорофилл *b* после выборочных рубок является положительным результатом, поскольку позволяет клетке высвобождающуюся от синтеза пигментов часть углеводов эффективно использовать на синтез других не менее важных биологических соединений. Увеличение этого отношения у ели на вырубках может свидетельствовать также о возрастании в ее фотосинтезирующих клетках количества мембранных компонентов, повышении в них синтеза углеводных соединений [10, 14, 16], а также усилении интенсивности фотосинтеза и ростовых процессов [3–6].

Для подростка ели на разных стадиях формирования березняка черничного дополнительно были проведены расчеты размеров компонентов энергопреобразующего комплекса пластид светособирающего (ССК) и хлорофилл-белковых комплексов (ХБК) фотосистем I и II и отношений между ними. Интерес к проведению таких расчетов обусловлен тем, что установлена обратная статистически значимая закономерность между продуктивностью растения и соотношением ССК : ХБК в его ассимилирующих органах. Отмечено, что

увеличение этого соотношения у вида и сорта растения приводит к снижению его продуктивности и уменьшению в клеточных структурах мембранных комплексов электротранспортной сети [9, 10, 14, 16]. Наши расчеты показали, что в 1- и 8-летних березняках подрост ели, несмотря на низкое содержание у него пигментов, имеет самую высокую интенсивность фотосинтеза [3–5]. Соотношение ССК : ХБК у подрост ели в насаждениях такого возраста не превышает 1,05–1,30. Начиная с 13-летнего возраста березняка, в связи с ухудшением световых условий, соотношение между ССК и ХБК в хлоропластах повышается до 1,77–2,17, что может свидетельствовать об утрате подростом лидирующих позиций и ухудшении его роста. В 53- и 80-летнем березняке интенсивность фотосинтеза у подрост ели самая низкая несмотря на высокое содержание пигментов, а соотношение ССК : ХБК самое высокое (2,17). После вырубki 50 и 45 % запаса соответственно в 53-летнем березняке и осиннике соотношение ССК : ХБК у подрост ели уменьшилось до 1,26–1,27, при этом в 2,0–2,5 раза повысилась интенсивность фотосинтеза и ускорился рост его побегов [4, 5].

Фон каротиноидных пигментов у подрост ели при онтогенезе березняка черничного меняется мало. Это, по-видимому, связано с необходимостью постоянной защиты хлорофилла каротиноидами от неблагоприятных внешних воздействий: от яркого солнечного освещения в летний период и низких температур зимой.

Заслуживает особого рассмотрения сезонная динамика накопления пигментов у подрост ели в березняке. Такие исследования нами проведены на стационаре «Ломовое» СевНИИЛХа в 53-летнем березняке черничного типа леса III класса бонитета, сформировавшемся на месте сосняка черничного. Состав насаждения до рубки – 7Б2Ос1Е, возраст – 60 лет, высота березы – 14,3 м, полнота – 0,97, класс бонитета – III. Почва – гумусово-иллювиальный супесчаный подзол, подстилаемый на глубине 40...60 см тяжелым моренным суглинком. Количество жизнеспособного подрост ели – 4,9 тыс. экз./га. В 1991–1992 гг. у подрост ели средней крупности (1,0...1,5 м) на хвое 1991 г. была подробно изучена динамика накопления хлорофиллов *a* и *b*, а также сумма каротиноидных пигментов. Наблюдения за световым режимом показали, что в июле в околополуденные часы при ясной погоде под полог данного березняка к кронам подрост ели проникает не более 14 % приходящего к верхнему ярусу солнечного света, в утренние и вечерние часы – не более 6,9 тыс. лк [3].

В ходе изучения динамики накопления пигментов установлено, что в 53-летнем березняке наименьшее количество хлорофилла и каротиноидов у подрост ели в молодой хвое содержится ранней весной, сразу после распускания вегетативных почек (см. таблицу).

Визуально это обнаруживается по слабо-зеленому цвету и укороченному размеру хвои. В июне–июле с повышением температуры в хвое начинает интенсивно формироваться пигментный фонд. Так, только за период с 5 июня по 31 июля в хвое образовалось 67 % хлорофилла и 20 % каротиноидных пигментов от их максимального количества, характерного для первого года вегетации. Ранее нами было установлено, что примерно такое же количество пигментов за аналогичный период молодая хвоя деревьев ели накапливает в спелом ельнике черничного типа леса в пригундровой зоне России [6, 8].

В августе, перед началом листопада, процесс синтеза пигментов у подрост ели стабилизировался. После завершения листопада в связи с усилением светового режима в хвое произошло дальнейшее наращивание пигментов.

**Накопление хлорофилла и каротиноидов в хвое подроста ели по годам
(мг/г свежей хвои)**

Дата	Хлорофилл				Каротиноиды
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>	<i>a : b</i>	
<i>1991 г.</i>					
5.VI	0,074±0,004	0,029±0,003	0,103±0,010	2,55	0,036±0,004
20.VI	0,160±0,005	0,052±0,003	0,212±0,015	3,08	0,053±0,003
31.VII	0,438±0,008	0,197±0,006	0,635±0,010	2,22	0,078±0,003
27.VIII	0,420±0,009	0,194±0,004	0,614±0,018	2,16	0,079±0,004
10.X	0,539±0,009	0,251±0,005	0,790±0,013	2,15	0,138±0,006
<i>1992 г.</i>					
20.II	0,543±0,011	0,200±0,004	0,743±0,008	2,72	0,219±0,005
10.VI	0,520±0,013	0,242±0,002	0,762±0,017	2,15	0,146±0,006
13.VIII	0,666±0,017	0,266±0,006	0,932±0,011	2,50	0,126±0,010

К 10 октября содержание зеленых пигментов в молодой хвое по сравнению с предыдущим периодом увеличилось еще на 29 %, каротиноидов – на 43 %. Исследования показали, что общее увеличение фонда каротиноидных пигментов у ели в осенний период в значительной мере связано с синтезом более восстановленных пигментов – каротина и лютеина [6–8]. В феврале содержание хлорофилла в молодой хвое незначительно понизилось, а каротиноидов увеличилось еще на 59 %. В течение второго года вегетации содержание хлорофилла и каротиноидов в хвое возросло соответственно на 12 и 6 %. По исследованиям А.С. Щербатюка [21], в Предбайкалье пик накопления пигментов в хвое деревьев ели (в расчете на сухую массу) приходится на фазу разверзания почек, а потом оно поддерживается на стационарном уровне до окончания вегетации.

В сезонной динамике накопления фотосинтетических пигментов подрост ели в березняках черничных типов леса существенно отличается от деревьев ели в ельниках черничных типов леса [4, 6]. В наших исследованиях у подрост ели в березовом насаждении не обнаружено ярко выраженной зимней деградации фонда хлорофилла. Очевидно, что полог из листовенных пород служит для подрост определенным защитным экраном и в холодное время предохраняет его хлоропласты и молекулы зеленых пигментов от разрушения. В свою очередь, деревья ели, по сравнению с подростом, после летней вегетации больше не накапливают зеленых пигментов. Дальнейшее увеличение концентрации хлорофилла у них происходит только с наступлением положительных температур нового вегетационного периода [8–6].

Соотношение между отдельными компонентами хлорофилла (*a : b*) максимально у подрост ели в весенний период (2,6–3,1). Когда световые и температурные условия для синтеза хлорофилла *b* становятся менее благоприятными, это соотношение сокращается до 2,1. Максимум соотношения между зелеными и желтыми пигментами достигает летом (7,8–8,1), минимума – весной (2,9) и зимой (5,4).

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют, что наиболее низкая концентрация хлорофилла и каротиноидных пигментов в хвое подрост ели

в березовом древостое черничных типов леса содержится на вырубке в начальные периоды формирования подроста. В его хвое в этом возрасте отмечаются самые низкие значения соотношения между компонентами энергопреобразующей системы (ССК и ХБК), самые высокие значения соотношения между хлорофиллами *a* и *b* в хлоропластах и наибольшая продуктивность деревьев по созданию органического вещества. Начиная с 13-летнего возраста березняка, когда световые условия в нем для подроста ели начинают постепенно ухудшаться в результате образования верхнего затеняющего полога, в его хвое происходит достаточно быстрое возрастание концентрации хлорофилла и каротиноидных пигментов, увеличение соотношения между ССК и ХБК и снижение соотношения между хлорофиллами *a* и *b*. Фонд фотосинтетических пигментов максимальных значений достигает при возрасте спелости березняка.

Сезонная динамика фонда зеленых и желтых пигментов свидетельствует о значительных флуктуациях их содержания у подроста ели в течение года. В березняках черничных типов лесорастительных условий количество всех пигментов у ели при формировании молодой хвои постепенно возрастает от весны к осени. Однако, если у деревьев концентрация зеленых пигментов в хвое максимума достигает к концу вегетационного периода (август) и с наступлением отрицательных температур понижается, то у подроста в березняках черничных типов леса первый пик в содержании хлорофилла приходится на июль, когда завершается видимый рост молодых побегов, второй, меньший, максимум – на октябрь, после окончания листопада, сохраняясь примерно на этом уровне и в зимние месяцы. Максимальное количество каротиноидных пигментов у деревьев и подроста накапливается зимой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.А.* Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 227 с.
2. *Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокроносов А.Т.* Проективное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных ботанико-географических зон России // Физиология растений. 1995. Т. 42, № 2. С. 295–302.
3. *Зарубина Л.В.* Эколого-биологическое обоснование постепенных рубок в березняках черничных северной подзоны тайги европейской части России: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск, 2004. 19 с.
4. *Зарубина Л.В., Коновалов В.Н.* Эколого-физиологические особенности ели в березняках черничных: моногр. Архангельск: САФУ, 2014. 378 с.
5. *Зарубина Л.В., Коновалов В.Н.* Эколого-биологические особенности ели в северотаежных фитоценозах (состояние, антропогенное влияние): моногр. Архангельск: САФУ, 2015. 186 с.
6. *Коновалов В.Н.* Сезонная динамика содержания пластидных пигментов в хвое ели в связи с внесением минеральных удобрений // Журн. общей биологии. 1988. Т. XLIX, № 5. С. 611–617.
7. *Коновалов В.Н., Зарубина Л.В.* Биологические особенности подроста ели в березняках черничных после выборочных рубок // Вестн. КрасГАУ. 2011. № 8. С. 99–104.
8. *Коновалов В.Н., Зарубина Л.В.* Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах: моногр. Архангельск: САФУ, 2011. 338 с.

9. Коновалов В.Н., Листов А.А. Динамика содержания пластидных пигментов у сосны в связи с внесением удобрений в северотаежных лишайниковых борах // Лесн. журн. 1985. № 6. С. 18–22. (Изв. высш. учеб. заведений).
10. Кренделева Т.А., Низовская Н.В., Тулбу Г.В., Храмова Г.А., Алауддин М. К вопросу об организации фотосинтетического аппарата у различных по продуктивности сортов риса // Физиология растений, 1985. Т. 32. Вып. 4. С. 651–660.
11. Курсанов А.Л. Эндогенная регуляция транспорта ассимилятов и донорно-акцепторные отношения у растений // Физиология растений. 1984. Т. 31, вып. 3. С. 579–595.
12. Мокронос А.Т. Онтогенетический аспект фотосинтеза. М.: Наука, 1981. 196 с.
13. Попова И.А. Исследование пигментов пластид с помощью хроматографии на бумаге // Тр. БИН СССР. Вып. 16. Л., 1963. С. 154–164.
14. Рубин А.Б., Венедиктов П.С., Кренделева Т.Е., Пащенко В.З. Регуляция первичных стадий фотосинтеза при изменении физиологического состояния растений // Фотосинтез и продукционный процесс. М.: Наука, 1988. С. 29–39.
15. Судаchkова Н.Е. Метаболизм хвойных и формирование древесины. Новосибирск: Наука, 1977. 230 с.
16. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // Физиология растений. 1980. Т. 27, вып. 2. С. 341–347.
17. Тужилкина В.В., Бобкова К.С. Хлорофильный индекс и ежегодный сток углерода в еловые фитоценозы // Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера. СПб.: Наука, 2001. С. 203–207.
18. Цельникер Ю.Л. Влияние интенсивности света на параметры структуры крон ели // Лесоведение. 1995. № 5. С. 73–78.
19. Цельникер Ю.Л., Малкина И.С. Хлорофильный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41, вып. 3. С. 325–330.
20. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений. М.: Наука, 1971. С. 154–169.
21. Щербатюк А.С., Суворова Г.Г., Янькова Л.С., Русакова Л.В., Копытова Л.Д. Видовая специфичность реакции фотосинтеза хвойных на факторы среды // Лесоведение. 1999. № 5. С. 41–49.
22. Heinze M., Fiedler H.J. Beziehungen des Chlorophyllgehaltes zu Standortsfaktoren, Ernährungszustand und Wachstum bei Koniferen [Correlations between Chlorophyll Content and Site Factors, Nutritive Condition as Well as Growth of Conifers] // Flora. 1976. Vol. 165, iss. 3. Pp. 269–293.
23. Heinze M., Fiedler H.J. Wasserverbrauch, Ernährung und Wachstum von Kiefern sämlingen bei verschiedener Belichtung, Bewässerung und Düngung [Water Consumption, Nutrition and Growth of Pine Seedlings under the Conditions of Different Radiation Intensity, Watering and Fertilization] // Flora. 1980. Vol. 169, iss. 1. Pp. 89–103.
24. Lieffers V.J., Messier C., Stadt K.J., Gendron F., Comeau P.G. Predicting and Managing Light in the Understory of Boreal Forests // Canadian Journal of Forest Research. 1999. Vol. 29, no. 6. Pp. 796–811.
25. Lieffers V.J., Stadt K.J. Growth of Understory *Picea glauca*, *Calamagrostis canadensis*, and *Epilobium angustifolium* in Relation to Overstory Light Transmission // Canadian Journal of Forest Research. 1994. Vol. 24, no. 6. Pp. 1193–1198.

UDC 630*161.4:631.811.1+630.181.22:630*232.31

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.54

Accumulation Dynamics of Plastid Pigments in Spruce Undergrowth in Ontogenesis of the Bilberry Birch Forest

*L.V. Zarubina*¹, *Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

*V.N. Konovalov*², *Doctor of Agricultural Sciences, Professor*

¹Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: Liliya270975@yandex.ru

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

The paper presents the study of the seasonal and long-term dynamics of accumulation of photosynthetic pigments in spruce undergrowth in the ontogenesis of birch stands in the bilberry birch forests of the Northeast of Russia. The study was carried out by the spectrophotometric method. The minimum amount of chlorophyll and carotenoid pigments in needles of spruce undergrowth is in 1–8-year-old stands of birch forests, when the light stream arriving under the canopy does not limit the need of spruce in solar radiation. During this period, the maximum ratios between the components of chlorophyll and the minimum ratios between the light-harvesting and chlorophyll-protein complexes in the energy-converting system of chloroplasts (1.05 : 1.40) are recorded in the needles. According to the authors' data, such proportions in spruce undergrowth correspond to the maximum intensity of photosynthesis and promote the synthesis of carbohydrates in chloroplasts. With increasing the age of the birch forest, due to the formation of the upper shading hardwood canopy, the concentration of pigments in the needles of spruce gradually increases. The maximum concentration of chlorophyll and the minimum ratios between its components in spruce undergrowth are observed in 50–80-year-old birch forests, when the undergrowth is experiencing an acute shortage in solar radiation. Gradual felling in bilberry birch forests with the volume intensity of 45...52 % increase the influx of sunlight under the canopy and lead to a decrease of the concentration of green pigments in the needles in spruce undergrowth, especially chlorophyll *b*, increase the ratio of chlorophyll *a* : chlorophyll *b*, reduce the ratio in the energy-converting chloroplast system between the light-harvesting and chlorophyll-protein complexes to 1.26, while improving the rate of photosynthesis to 2.2–2.4 times and activate the processes in the cell associated with carbohydrate synthesis. The salient degradation of chlorophyll is absent in spruce undergrowth in the bilberry birch forests during winter, although it is usually noted. In the seasonal dynamics of accumulation of green pigments maxima are clearly marked: the first is large in summer, and the second, which is less significant, is observed after the leaf fall, not found in spruce trees.

Keywords: spruce undergrowth, bilberry birch forest, chlorophyll, carotenoid, energy-converting plastid complex, illumination.

REFERENCES

1. Alekseev V.A. *Svetovoy rezhim lesa* [Forest Light Status]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 227 p. (In Russ.)

2. Voronin P.Yu., Efimtsev E.I., Vasil'ev A.A., Vatkovskiy O.S., Mokronosov A.T. *Proektivnoe sodержanie khlороfills i bioraznoobrazie rastitel'nosti osnovnykh botaniko-geograficheskikh zon Rossii* [Projective Chlorophyll Content and Biodiversity of Vegetation

For citation: Zarubina L.V., Konovalov V.N. Accumulation Dynamics of Plastid Pigments in Spruce Undergrowth in Ontogenesis of the Bilberry Birch Forest. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 54–64. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.54

of the Main Botanical and Geographical Zones of Russia]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1995, vol. 42, no. 2, pp. 295–302.

3. Zarubina L.V. *Ekologo-biologicheskoe obosnovanie postepennykh rubok v bereznyakakh chernichnykh severnoy podzony taygi evropeyskoy chasti Rossii*: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk [Ecological and Biological Characteristics of the Gradual Felling in the Bilberry Birch Forests of the Northern Taiga Subzone: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Bryansk, 2004. 19 p.

4. Zarubina L.V., Konovalov V.N. *Ekologo-fiziologicheskie osobennosti eli v bereznyakakh chernichnykh: monogr.* [Ecological and Physiological Characteristics of Spruce in the Bilberry Birch Forests]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2014. 378 p. (In Russ.)

5. Zarubina L.V., Konovalov V.N. *Ekologo-biologicheskoe osobennosti eli v severotaezhnykh fitotsenozakh (sostoyanie, antropogennoe vliyaniye)* [Ecological and Biological Features of Spruce in North Taiga Phytocenoses (State, Anthropogenic Influence)]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 186 p. (In Russ.)

6. Konovalov V.N. Sezonnaya dinamika sodержaniya plastidnykh pigmentov v khvoe eli v svyazi s vneseniem mineral'nykh udobreniy [Seasonal Dynamics of the Plastid Pigment Content in Spruce Needles due to the Introduction of Mineral Fertilizers]. *Zhurnal obshchey biologii* [Biology Bulletin Reviews], 1988, vol. 49, no. 5, pp. 611–617.

7. Konovalov V.N., Zarubina L.V. Biologicheskie osobennosti podrosta eli v bereznyakakh chernichnykh posle vyborochnykh rubok [Young Spruce Biological Peculiarities in Bilberry Birch Forests after Selective Cuttings]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [The Bulletin of KrasGAU], 2011, no. 8, pp. 99–104.

8. Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ekologo-fiziologicheskie osobennosti khvoynykh na udobrennykh pochvakh: monogr.* [Ecological and Physiological Features of Coniferous at the Fertilized Soils]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011. 338 p. (In Russ.)

9. Konovalov V.N., Listov A.A. Dinamika sodержaniya plastidnykh pigmentov u sosny v svyazi s vneseniem udobreniy v severotaezhnykh lishaynikovyykh borakh [Dynamics of the Plastid Pigment Content in Pine due to the Introduction of Fertilizers in Northern Taiga Lichen Forests]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 1985, no. 6, pp. 18–22.

10. Krendeleva T.A., Nizovskaya N.V., Tulbu G.V., Khramova G.A., Alauddin M. K voprosu ob organizatsii fotosinteticheskogo apparata u razlichnykh po produktivnosti sortov risa [On the Organization of the Photosynthetic Apparatus in Rice Varieties, Different in Their Productivity]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1985, vol. 32, no. 4, pp. 651–660.

11. Kursanov A.L. Endogennaya regulyatsiya transporta assimilyatov i donorno-aktseptomnye otnosheniya u rasteniy [Endogenous Regulation of Assimilate Transport and Donor-Acceptor Relations in Plants]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1984, vol. 31, no. 3, pp. 579–595.

12. Mokronosov A.T. *Ontogeneticheskiy aspekt fotosinteza* [Ontogenetic Aspect of Photosynthesis]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 196 p. (In Russ.)

13. Popova I.A. Issledovanie pigmentov plastid s pomoshch'yu khromatografii na bumage [Investigation of Plastid Pigments by Paper Chromatography]. *Trudy BIN SSSR* [Proceedings of the Botanical Institute of the USSR], 1963, no. 16, pp. 154–164.

14. Rubin A.B., Venediktov P.S., Krendeleva T.E., Pashchenko V.Z. Regulyatsiya pervichnykh stadiy fotosinteza pri izmenenii fiziologicheskogo sostoyaniya rasteniy [Regulation of Primary Stages of Photosynthesis when a Change in the Physiological State of Plants]. *Fotosintez i produktsionnyy protsess* [Photosynthesis and the Production Process]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 29–39. (In Russ.)

15. Sudachkova N.E. *Metabolizm khvoynykh i formirovaniye drevesiny* [Metabolism of Conifers and Wood Formation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 230 p. (In Russ.)

16. Tarchevskiy I.A., Andrianova Yu.E. Soderzhanie pigmentov kak pokazatel' moshchnosti razvitiya fotosinteticheskogo apparata u pshenitsy [Pigment Content as an Indicator of the Development Power of Photosynthetic Apparatus in Wheat]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1980, vol. 27, no. 2, pp. 341–347.

17. Tuzhilkina V.V., Bobkova K.S. Khlorofill'nyy indeks i ezhegodnyy stok ugleroda v elovye fitotsenozy [Chlorophyll Index and Annual Carbon Sink in Spruce Phytocenoses]. *Bioproduktsionnyy protsess v lesnykh ekosistemakh Severa* [Bioproduction in Forest Ecosystems of the North]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001, pp. 203–207. (In Russ.)

18. Tsel'niker Yu.L. Vliyanie intensivnosti sveta na parametry struktury kron eli [Influence of Light Intensity on the Parameters of the Crown Structure]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1995, no. 5, pp. 73–78.

19. Tsel'niker Yu.L., Malkina I.S. Khlorofill'nyy indeks kak pokazatel' godichnoy akkumulyatsii ugleroda drevostoyami lesa [Chlorophyll Index as an Indicator of Carbon Annual Accumulation by Forest Stands]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology], 1994, vol. 41, no. 3, pp. 325–330.

20. Shlyk A.A. Opredelenie khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'ev [Determination of Chlorophylls and Carotenoids in Green Leaves Extracts]. *Biokhimicheskie metody v fiziologii rasteniy* [Biochemical Methods in Plant Physiology]. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 154–169. (In Russ.)

21. Shcherbatyuk A.S., Suvorova G.G., Yan'kova L.S., Rusakova L.V., Kopytova L.D. Vidovaya spetsifichnost' reaktsii fotosinteza khvoynykh na faktory sredy [Specificity of the Photosynthesis Reaction of Conifers to Environmental Factors]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1999, no. 5, pp. 41–49.

22. Heinze M., Fiedler H.J. Beziehungen des Chlorophyllgehaltes zu Standortsfaktoren, Ernährungszustand und Wachstum bei Koniferen [Correlations between Chlorophyll Content and Site Factors, Nutritive Condition as Well as Growth of Conifers]. *Flora*, 1976, vol. 165, iss. 3, pp. 269–293.

23. Heinze M., Fiedler H.J. Wasserverbrauch, Ernährung und Wachstum von Kiefersämlingen bei verschiedener Belichtung, Bewässerung und Düngung [Water Consumption, Nutrition and Growth of Pine Seedlings under the Conditions of Different Radiation Intensity, Watering and Fertilization]. *Flora*, 1980, vol. 169, iss. 1, pp. 89–103.

24. Lieffers V.J., Messier C., Stadt K.J., Gendron F., Comeau P.G. Predicting and Managing Light in the Understory of Boreal Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, no. 6, pp. 796–811.

25. Lieffers V.J., Stadt K.J. Growth of Understory *Picea glauca*, *Calamagrostis canadensis*, and *Epilobium angustifolium* in Relation to Overstory Light Transmission. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, vol. 24, no. 6, pp. 1193–1198.

Received on December 05, 2017

УДК 630*571.53

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.65

ЛЕСА ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ: ЕСТЬ ЛИ БАЛАНС МЕЖДУ ВЫБИТИЕМ И ВОССТАНОВЛЕНИЕМ?

Г.В. Давыдова, д-р экон. наук, проф.

И.В. Ласкин, магистр

Байкальский государственный университет, ул. Ленина, д. 11, г. Иркутск, Россия, 664003; e-mail: kafles@bgu.ru, liv.69@gambler.ru

В статье выявлены и проанализированы наиболее значимые факторы, влияющие на сохранение площадей, занятых лесными насаждениями. Рассчитан баланс между выбитием и восстановлением лесов. Констатируется, что с каждым годом происходит выбитие площадей, занятых лесными насаждениями. С точки зрения определения баланса между выбитием и восстановлением леса на примере Иркутской области рассмотрен период с 1946 по 2016 гг.; выявлены его особенности; проанализированы наиболее значимые факторы, влияющие на сохранение площадей, занятых лесными насаждениями. Установлен факт сокращения площадей, занятых лесными насаждениями. Получен прогноз среднегодовых площадей вырубок и лесовосстановления, позволяющий обоснованно применять управленческие решения по определению необходимого объема лесовосстановительных работ на планируемый период. Рассчитано соотношение фонда и площадей лесовосстановления, дающее возможность уточнять баланс между ними. Показано, что в Иркутской области за исследуемый период наблюдались не только обезлесивание, но и деградация лесов, т. е. ухудшение породного состава, снижение запасов древостоя, гибель подроста, уменьшение биологической продуктивности, сокращение видового разнообразия лесных экосистем и упрощение их структуры. В регионе, как и в России в целом, сохраняется традиционная политика хозяйствования, при которой государство активно стимулирует инвестиции в сельское хозяйство, промышленность, тем самым уничтожая лесные территории. Накопившиеся площади обезлесивания требуют кардинального изменения отношения к проблеме лесовосстановления. Для сохранения баланса между выбитием и восстановлением лесов предложено планировать объем лесовосстановительных работ на следующий период исходя из площадей вырубок и пройденных пожарами в отчетном периоде, т. е. с учетом временного лага. Полученные нами данные позволяют сделать вывод о необходимости увеличения объемов искусственного лесовосстановления в лесах Иркутской области в целях улучшения качества лесов и выравнивания баланса между выбитием и восстановлением лесных площадей.

Ключевые слова: выбитие, рубка, лесовосстановление, лесные площади, баланс, обезлесивание, лесные пожары.

Введение

Основная цель мировой лесной политики – сохранение лесных ресурсов, их рациональное, неистощительное использование и устойчивое управление. Одним из направлений реализации этой цели является сохранение равновесия между выбывающими и восстановленными лесными площадями [1, 2].

Для цитирования: Давыдова Г.В., Ласкин И.В. Леса Иркутской области: есть ли баланс между выбитием и восстановлением? // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 65–76. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.65

По оценке Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО) площадь лесов в мире продолжает сокращаться. За период с 1990 по 2015 гг. она уменьшилась на 129 млн га, т. е. ежегодное сокращение составило 0,13 %, что по меркам планетарного масштаба является серьезным ухудшением. Большинство сценариев показывают будущий рост потребления древесины в Европе из-за растущего глобального спроса, повышения цен на энергоносители, экономических и экологических преимуществ использования этого ресурса [18]. В настоящее время большие потери лесов наблюдаются в таких странах, как Мадагаскар, Вьетнам и Индонезия, которые вырубают их для поставки в Китай [16]. Самое большое ежегодное сокращение лесов отмечено в регионах с низким уровнем доходов на душу населения (Южная Америка, Африка и др.) [3].

Что же происходит с лесами в России?

По результатам обследования, проведенного специалистами Мэрилендского университета совместно с компанией «Гугл» и Институтом мировых ресурсов, в России в 2011–2013 гг. среднегодовые потери лесного покрова составили около 4,3 млн га, хотя официальный сайт Рослесхоза утверждает, что Россия соблюдает баланс между вырубкой и восстановлением леса [11, 15]. Различные точки зрения на состояние наших лесов затрудняют принятие правильных управленческих решений по вопросам обеспечения их рационального и неистощительного использования.

Цель нашего исследования – на примере лесного хозяйства Иркутской области оценить баланс между вырубкой и восстановлением лесов на ее территории.

Объекты и методы исследования

Иркутская область в качестве объекта исследований выбрана в связи с тем, что она относится к лесоизбыточным регионам, лидируя в России по лесистости и объемам лесозаготовок.

Одним из условий сохранения лесных ресурсов является выполнение в полном объеме лесовосстановительных работ и сведение к минимуму площадей, пройденных пожарами.

Для определения баланса между вырубкой и восстановлением лесов в Иркутской области исследована динамика этих показателей за длительный период (1946–2016 гг.) на основании данных Государственного лесного реестра (ГЛР) Министерства лесного комплекса Иркутской области [4, 14].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты, представленные на рис. 1, свидетельствуют, что за весь период исследования площади вырубок лесов превышают площади лесовосстановления, т. е. идет сокращение лесных площадей. Графики, характеризующие изменение площадей вырубок и лесовосстановления, практически совпадают (коэффициент парной корреляции – 0,91).

На основании поведения графиков на рис. 1 условно поделим временной интервал на три части:

период 1 (1946–1990 гг.) – темпы роста лесовосстановления опережают темпы роста вырубок. Если бы эта тенденция сохранялась и дальше, то в 1994 г. площади вырубок и лесовосстановления совпали, что положительно повлияло бы на сохранение лесных площадей и их качество;

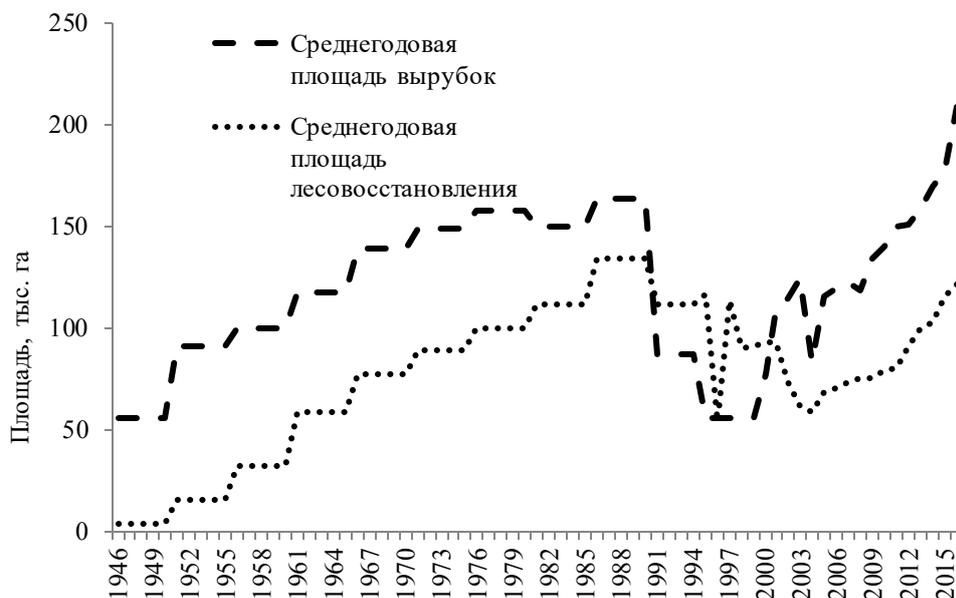


Рис. 1. Динамика среднегодовых площадей вырубок и лесовосстановления (1946–2016 гг.)

период 2 (1991–2000 гг.) – резкое падение площадей вырубок и лесовосстановления, что свидетельствует о значительной деградации лесов (сокращаются площади лесов и их качество);

период 3 (2001–2016 гг.) – рост площадей вырубок (в 3 раза) и лесовосстановления (в 2 раза). Это подтверждает предположение об обезлесивании лесных территорий Иркутской области, о чем свидетельствует и выполненный нами прогноз на основе ГЛР для среднегодовых данных по вырубке и лесовосстановлению (рис. 2) [4].

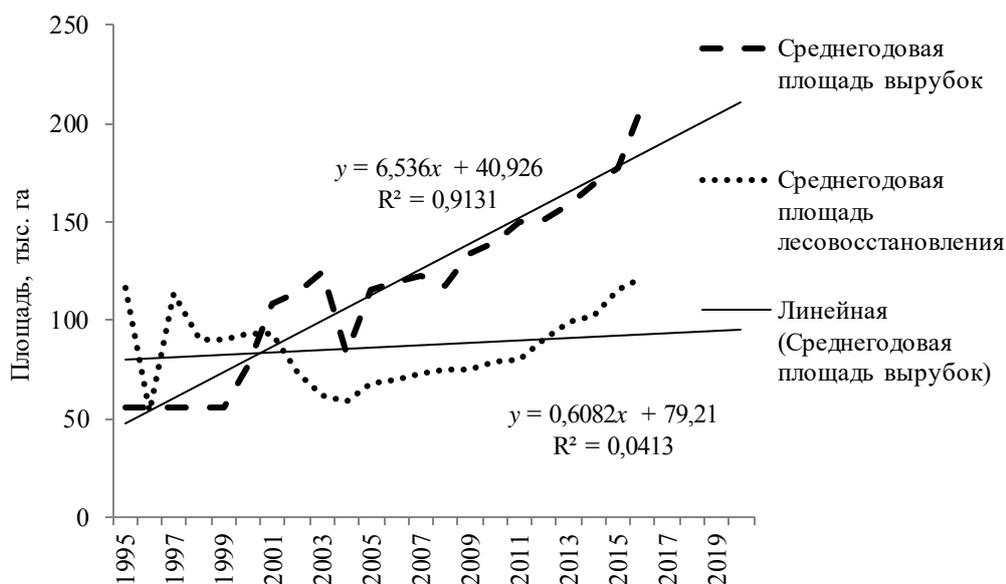


Рис. 2. Прогноз среднегодовых площадей вырубок и лесовосстановления (1995–2020 гг.)

Приведенные на рис. 2 эмпирические уравнения получены на основе построения линейных прогнозных трендов среднегодовых площадей вырубок и лесовос-становления (где y – прогнозные значения площади, тыс. га; x – номер периода).

Главными объективными факторами, влияющими на изменение лесных пространств и характеристик лесных ресурсов, являются лесные пожары и лесозаготовки. Значительный ущерб лесам также наносят вредители (насекомые), ураганные ветры, сильные снегопады, засухи, антропогенное воздействие и др. [7, 10].

Рассчитанные нами на основе ГЛР [4] данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Динамика площадей выбытия (тыс. га) лесных насаждений
за счет заготовки древесины, лесных пожаров, незаконной вырубки
и биологических причин (2010–2016 гг.)**

Год	Заготовка древесины	Лесные пожары	Незаконные вырубки	Биологические причины	Всего площадей обезлесивания
2010	140,20	40,40	1,33	24,30	206,23
2011	149,87	121,80	1,61	25,90	299,18
2012	151,14	23,60	1,32	11,10	187,16
2013	159,14	26,80	2,27	11,10	199,31
2014	169,70	770,80	2,80	9,00	952,30
2015	177,65	395,80	2,70	21,10	584,15
2016	209,13	569,10	2,60	19,80	800,63

Как видно из табл. 1, площадь обезлесивания по годам возрастает не только вследствие повышения точности учета площадей, пройденных лесными пожарами (применение авиационной, аэрокосмической техники), но и увеличения заготовки древесины и других причин. Поэтому, разрабатывая меры по уменьшению площадей обезлесивания, в первую очередь следует обращать внимание на снижение влияния этих факторов.

В Иркутской области баланс между выбытием и восстановлением лесных площадей нарушен, площади обезлесивания увеличиваются. Среднегодовые потери лесных территорий в области за 2010–2016 гг. составили 461,28 тыс. га. Нарушение баланса оказывает отрицательное влияние и на структуру породного состава лесов региона.

Несмотря на то, что область богата «зеленым золотом» (средний показатель лесистости – самый высокий в России (83 %) [6, 8]), площади, покрытые лесом, распределены не равномерно.

Общий запас насаждений (по состоянию на 2016 г.) составлял 8,7 млрд м³ на площади 62,5 млн га, в том числе спелых и перестойных – 4,9 млрд м³ на площади 25,5 млн га, из них в древостоях с преобладанием хвойных пород – 4,2 млрд м³ на площади 20,7 млн га. Запасы спелой и перестойной сосны – 2,5 млрд м³ на площади 6,0 млн га.

Наиболее высокими темпами сокращаются площади спелых и перестойных сосновых древостоев. Их доля в покрытой этой лесообразующей породой площади неуклонно снижается. В 1961 г. процент таких сосняков составлял 72,0 %, к 2008 г. – 40,9 %, на 1 января 2016 г. – 39,3 % (рис. 3) [8].

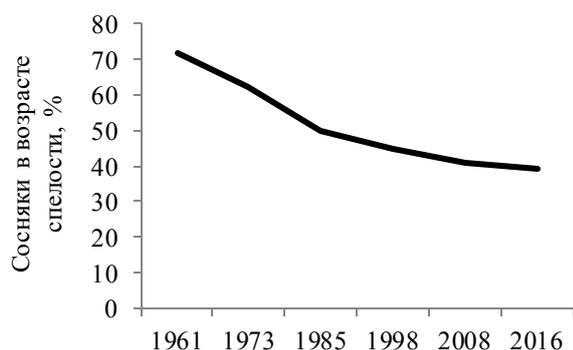


Рис. 3. Процент сосняков, достигших возраста спелости (1961–2016 гг.)

За последние три года наблюдается рост площади, требующей лесовосстановления. Основным фактором, влияющим на изменение лесных пространств, являются пожары. Второй фактор – это проведение вырубок, особенно в тех регионах, где находятся крупные лесоперерабатывающие предприятия, третий – болезни леса.

Особый интерес представляет сопоставление площадей обезлесивания и лесовосстановления по отдельным лесничествам региона [4, 5] (рис. 4).

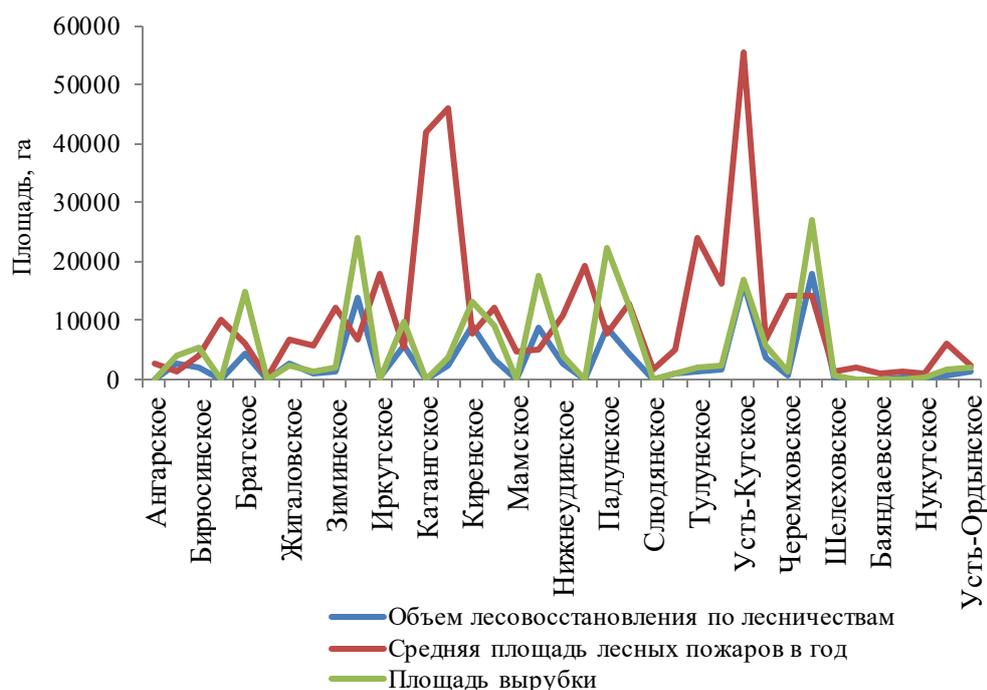


Рис. 4. Сопоставление данных по площадям лесовосстановления, лесных пожаров и рубок по лесничествам (2016 г.)

Данные, приведенные на рис. 4, позволяют констатировать следующее: лесозаготовками наиболее активно занимались Братское, Илимское, Нижнеилимское, Падунское, Усть-Кутское и Чунское лесничества;

основной причиной сокращения лесных пространств в Иркутской области являются пожары, которые уничтожили 569,1 тыс. га, что составляет 71,3 % территории обезлесивания (табл. 2);

наибольшие потери лесных площадей из-за пожаров приходятся на Кантангское, Качугское, Тулунское, Усть-Удинское и Иркутское лесничества; итоги работы лесничеств позволяют определить требуемые площади лесовосстановления как в целом по региону, так и по каждому лесничеству; в будущем для сохранения баланса между выбытием и лесовосстановлением в лесах Иркутской области следует увеличить площади лесовосстановления в лесничествах, в первую очередь там, где велась интенсивная лесозаготовка и происходили потери лесных насаждений в результате пожаров.

Таблица 2

**Соотношение площадей лесовосстановительных работ (ПЛВ)
и фонда лесовосстановления (ФЛВ) в Иркутской области (тыс. га)**

Год	ФЛВ	ПЛВ	Баланс +/-	ПЛВ/ФЛВ, %
2010	885,4	74,6	-810,8	8,4
2011	891,2	79,8	-811,4	8,9
2012	904,4	90,8	-813,6	10,0
2013	927,0	99,5	-827,5	10,7
2014	920,2	102,6	-817,6	11,1
2015	963,1	115,2	-847,9	11,9
2016	1067,7	121,4	-946,3	11,4

Сопоставление данных [4, 7] для Иркутской области по площади лесовосстановительных работ и фонду лесовосстановления показало, что разрыв между этими показателями увеличивается (табл. 2) [4].

В последнее время прослеживается устойчивая тенденция к выбытию лесных ресурсов в результате сплошных вырубок и гибели лесов из-за пожаров.

Исходя из соотношения лесовосстановительного фонда и объема лесовосстановления, можно сделать вывод, что проводимые работы являются недостаточными, количество посадок лесных культур очень низкое. Эффективность лесовосстановления остается невысокой. Причины кроются в недостаточном естественном лесовосстановлении, недобросовестно проводимых мероприятиях по содействию естественному возобновлению и, самое главное, в небольших объемах искусственного лесовосстановления. Например, в Канаде более половины вырубаемых лесов возобновляются с помощью искусственного лесовосстановления [19]. Создание лесных культур предотвращает смену пород, сокращает лесовосстановительный период до минимума, способствует появлению возможности организации лесоразведения на участках, ранее не занятых лесными насаждениями, и т. д. [12, 13, 16].

Для примера сравним объемы лесозаготовок с объемами лесовосстановления в Братском, Падунском, Илимском и Чунском лесничествах [4].

Из графиков, представленных на рис. 5, где показаны прогнозные линии тренда и эмпирические уравнения вырубок (y – прогнозные значения площади, тыс. га; x – номер периода), можно сделать вывод, что в данных лесничествах доля объемов лесовосстановления по сравнению с рубками мала. Этот пример иллюстрирует положение дел не только в них, но и общую картину выбытия площадей, занятых лесными насаждениями, а в конечном итоге – отсутствие баланса между выбытием и восстановлением лесов.

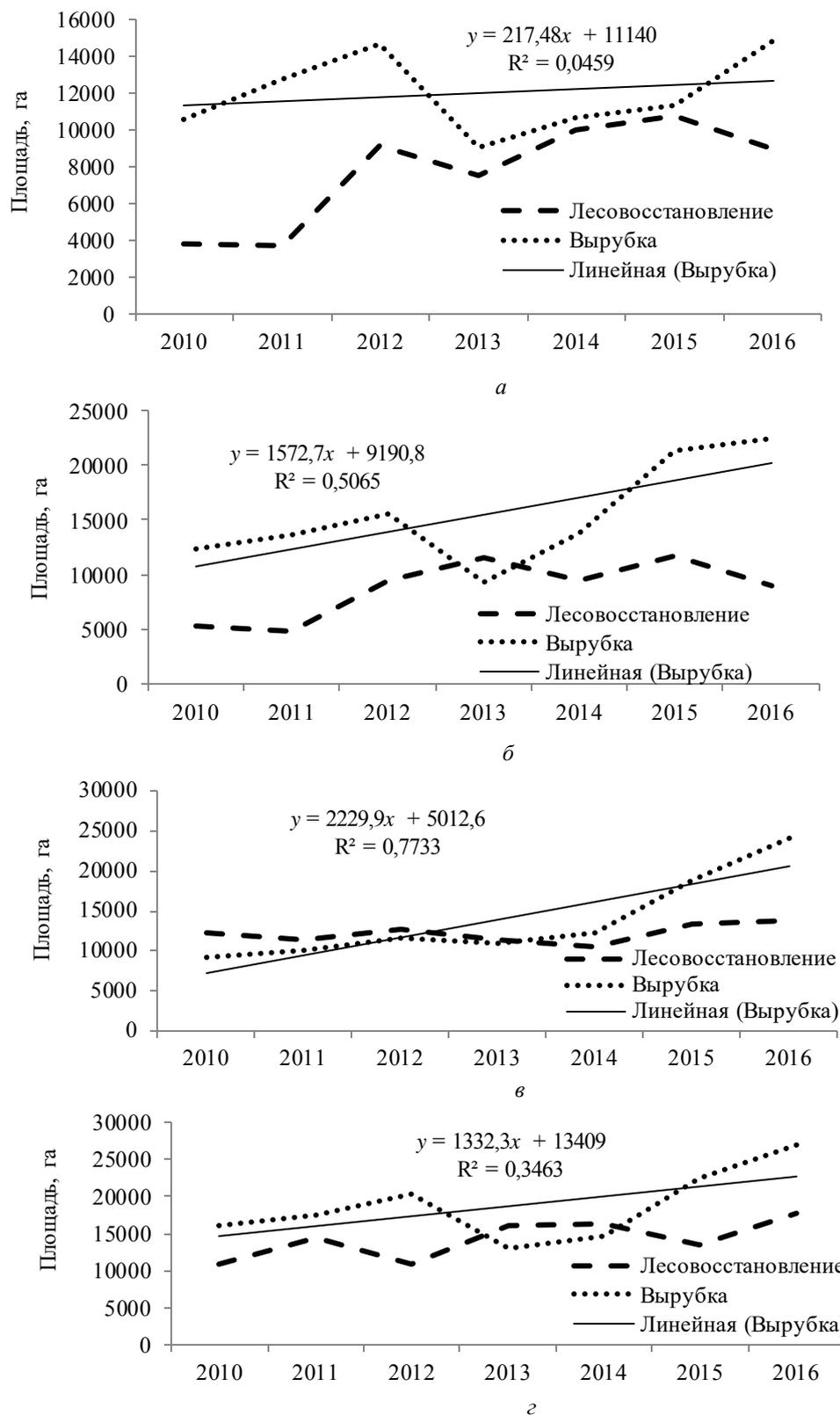


Рис. 5. Динамика лесовосстановления и вырубки в Братском (а), Падунском (б), Илимском (в) и Чунском (г) лесничествах (2010–2016 гг.)

Сформулируем используемые Рослесхозом подходы к определению требуемых площадей лесовосстановления.

Требуемая площадь лесовосстановления определяется по площади вырубки. Эти потери (площади вырубки) считаются в методике производительными (объективными), т. е. в плановом периоде площадь лесовосстановления должна быть равна площади вырубок в предыдущем периоде. На практике, как свидетельствуют данные о состоянии лесных ресурсов Иркутской области, кроме площадей вырубок к убывающим площадям (обезлесивание) относятся площади, пройденные пожарами, незаконными рубками, имеющие биологические нарушения, и они не учитываются при определении площадей лесовосстановления. Вероятно, они считаются непроизводительными потерями, хотя их доля в площади выбытия по годам составляет от 30 до 80 % (см. табл. 1). Это следует принять во внимание при планировании площадей лесовосстановления, иначе дисбаланс между выбытием и восстановлением лесных пространств будет нарастать.

Для сохранения баланса между выбытием и восстановлением лесов следует использовать зависимость

$$F_{лвt} = F_{вт-1} + (0,5...0,6) F_{пт-1};$$

где $F_{лвt}$ – планируемая площадь лесовосстановления в год t ;

$F_{вт-1}$ – фактическая площадь вырубки в отчетном периоде;

$F_{пт-1}$ – фактическая площадь, пройденная пожарами в отчетном периоде.

В случае Иркутской области для 2017 г. имеем:

$$F_{лвт} = 209,13 + 0,5 \cdot 569,10 = 493,83 \text{ тыс. га.}$$

Фактически запланированный Рослесхозом объем лесовосстановления в лесах Иркутской области составляет всего 100 тыс. га, т. е. план ориентирован на деградацию лесов – увеличение площадей, не занятых лесными насаждениями, и ухудшение породного состава.

Выводы

1. В лесах Иркутской области наблюдается нарушение баланса между выбытием и восстановлением лесов, с каждым годом площади обезлесивания увеличиваются.

2. Основными факторами, влияющими на величину площадей обезлесивания, являются лесные пожары и вырубки.

3. В лесничествах Иркутской области основным способом лесовосстановления остается естественный (84 %), который не гарантирует качественного лесовосстановления. Поэтому необходимо увеличить долю искусственного лесовосстановления, что позволит сократить лесовосстановительный период до минимума для рационального и неистощительного пользования древесными ресурсами.

4. Для сохранения баланса между выбытием и восстановлением лесов нами предложена формула расчета планируемой площади лесовосстановления в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вацук Л.Н. В Иркутской области необходимо инвентаризировать леса, усилить их охрану и масштабнее заниматься лесовосстановлением // ИА «Телеинформ». 21 мая 2015 г. Режим доступа: <http://i38.ru/kommentariy-ekonomika/tkspt-v-irkutskoy-oblasti-neobchodimo-invetarizirovat-lesa-usilit-ich-ochranu-ot-pozharov-narastit-obemilesovostanovleniya-i-uchoda-za-molodnyakom> (дата обращения: 29.03.2018).

2. Вацук Л.Н., Швиденко А.З. Динамика лесных пространств Иркутской области. Иркутск: Иркут. обл. тип. № 1. 2006. 392 с.

3. Глобальная оценка лесных ресурсов (2015): настольный справ. // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Режим доступа: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/ru/> (дата обращения: 29.03.2018).

4. Государственный лесной реестр Министерства лесного комплекса Иркутской области 2016 г. Режим доступа: <http://irkobl.ru/sites/alh/about/position> (дата обращения: 29.03.18).

5. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Блок мониторинга пожарной опасности. Режим доступа: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 29.03.2018).

6. Коптев А.М., Леонтьев Д.Ф. Лесопользование и лесовосстановление Правобережного Приангарья (Иркутская область) // Молодеж. науч. форум «Естественные и медицинские науки»: электр. сб. ст. по материалам XXX студенч. междунар. заоч. науч.-практ. конф., янв. 2016 г. М.: МЦНО, 2016. № 1(29). С. 16–19.

7. Лесной комплекс Иркутской области: стат. сб. / Территор. орган Федер. службы гос. статистики Иркутской области (Иркутскстат). Иркутск, 2016. 92 с.

8. Лесной план // Министерство лесного комплекса Иркутской области: офиц. сайт. Режим доступа: <http://irkobl.ru/sites/alh/documents/lesplan/> (дата обращения: 29.03.2018).

9. Лесохозяйственные регламенты лесничеств // Министерство лесного комплекса Иркутской области: офиц. сайт. Режим доступа: <http://irkobl.ru/sites/alh/documents/reglament/> (дата обращения: 29.03.2018).

10. Отчет агентства лесного хозяйства Иркутской области о проделанной работе за 2015 год. Режим доступа: <http://www.irkobl.ru> (дата обращения: 29.03.2018).

11. Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года. Рим: Продовольств. и с.-х. орг. Объедин. Наций, 2012. 86 с.

12. Чернов Н.Н. К соотношению естественного и искусственного лесовосстановления на Урале // Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2001. Вып. 21. С. 210–219. Режим доступа: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5102> (дата обращения: 29.03.2018).

13. Черных Л.В. Методика обоснования способа лесовосстановления на лесном участке (на примере хвойно-широколиственных лесов Среднего Поволжья): дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола, 2016. 224 с.

14. Щепетнева В.Я. Лесовосстановление в Иркутской области. Основные проблемы и перспективы развития // Областной лесной форум, г. Иркутск, 25 авг. 2016 г. Режим доступа: <https://documents.tips/engineering/-58eef7901a28ab1b608b45db.html> (дата обращения: 18.12.2017).

15. Ярошенко А. Леса России: есть ли баланс между выбытием и восстановлением? // ЛесПромИнформ. 2015. № 3(109). С. 94–95.

16. China's Forest Recovery Shows Hope for Mitigating Global Climate Change. Michigan State University, 2016. Available at: <https://phys.org/news/2016-03-china-forest-recovery-mitigating-global.html> (дата обращения: 18.12.2017).

17. Leinonen T., Turtiainen M., Siekkinen A. Лесовосстановление на Северо-Западе России и сравнение с Финляндией. Комментарии финских специалистов [Reforestation in the North-West of Russia and Comparison with Finland. Comments of Finnish Specialists]. Yoensuu, Finnish Forest Research Institute Publ., 2009. 36 p. (In Russ.)

18. Rametsteiner E., Nilsson S., Böttcher H., Havlik P., Kraxner F., Leduc S., Obersteiner M., Rydzak F., Schneider U., Schwab D., Willmore L. Study of the Effects of Globalization on the Economic Viability of EU Forestry. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis Publ., 2006. 198 p. Available at: <https://ec.europa.eu>

/agriculture/sites/agriculture/files/external-studies/2007/viability-forestry/full_text.pdf (дата обращения: 18.04.2018).

19. The State of Canada's Forests. Annual Report 2016. Available at: <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/37265.pdf> (дата обращения: 18.04.2018).

Поступила 03.02.18

UDC 630*571.53

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.65

Forests of the Irkutsk Region: is there a Balance between Disposal and Recovery?

G.V. Davydova, Doctor of Economic Sciences, Professor

I.V. Laskin, Master

Baikal State University, ul. Lenina, 11, Irkutsk, 664003, Russian Federation;
e-mail: kafles@bgu.ru, liv.69@rambler.ru

The main goal of the forest policy is the conservation of forest resources, their rational use and sustainable management. One of the directions is to maintain a balance between disposal and recovery of forest areas. This balance is considered by the example of the Irkutsk region in the period from 1946 to 2016. Its features are revealed; the most significant factors affecting the conservation of areas occupied by forest stands are analyzed; a balance between disposal and recovery of forests is calculated. The fact of reduction of areas occupied by forest stands is established. The forecast of the average annual areas of logging and reforestation is obtained, which makes it possible to apply reasonably management decisions to determine the required volume of reforestation for the planned period. The ratio of the fund and the areas of reforestation is calculated, which clarifies the balance between them. In the Irkutsk region we observe not only deforestation but also forest degradation, deterioration of the species composition, decrease in the growing stock and in biological productivity, death of the undergrowth, reduction of the species diversity of forest ecosystems and simplification of their structure. In the region, as in Russia as a whole, the traditional management policy is maintained, when the state actively stimulates investments in agriculture, industry, thereby destroying forest areas. Accumulated areas of deforestation require a radical change in attitude towards the problem of recovery. In order to maintain a balance between the disposal and recovery of forests, the paper proposes to plan reforestation for the next period based on the size of areas of felling and passed by fires in the reporting period, taking into account the time lag. The data obtained allow us to conclude about the need to increase the amount of artificial reforestation in the Irkutsk region in order to improve the quality of forests and balance between disposal and recovery of forest areas.

Keywords: disposal, felling, reforestation, forest land, balance, deforestation, forest fire.

REFERENCES

1. Vashchuk L.N. V Irkutskoy oblasti neobkhodimo inventarizirovat' lesa, usilit' ikh okhranu i masshtabnee zanimat'sya lesovosstanovleniem [It is Necessary to Inventory Forests, Strengthen Their Protection and Scale up Reforestation in the Irkutsk Region]. *IA «Teleinform»*.

For citation: Davydova G.V., Laskin I.V. Forests of the Irkutsk Region: is there a Balance between Disposal and Recovery? *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 65–76. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.65

21 мая 2015 г. [Teleinform, 21 May 2015]. Available at: <http://i38.ru/kommentariy-ekonomika/tkspert-v-irkutskoy-oblasti-neobchodimo-invetarizirovat-lesa-usilit-ich-ochranu-ot-pozharov-narastit-obemi-lesovosstanovleniya-i-uchoda-za-molodnyakom> (accessed 29.03.2018).

2. Vashchuk L.N., Shvidenko A.Z. *Dinamika lesnykh prostranstv Irkutskoy oblasti* [Dynamics of Forest Areas of the Irkutsk Region]. Irkutsk, 2006. 392 p. (In Russ.)

3. Global'naya otsenka lesnykh resursov (2015): nast. sprav. [Global Forest Resources Assessment (2015)]. *Prodovol'stvennaya i sel'skokhozyaystvennaya organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy* [The Food and Agriculture Organization of the United Nations]. Available at: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/ru> (accessed 29.03.2018).

4. *Gosudarstvennyy lesnoy reestr Ministerstva lesnogo kompleksa Irkutskoy oblasti 2016 g.* [State Forest Register of the Ministry of Forestry of the Irkutsk Region in 2016]. Available at: <http://irkobl.ru/sites/alh/about/position> (accessed 29.03.2018).

5. *Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva. Blok monitoringa pozharnoy opasnosti* [Information System of Remote Monitoring of the Federal Forestry Agency. The Fire Hazard Monitoring Unit]. Available at: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml (accessed 29.03.2018).

6. Koptev A.M., Leont'ev D.F. Lesopol'zovanie i lesovosstanovlenie Pravoberezhnogo Priangar'ya (Irkutskaya oblast') [Forest Use and Reforestation of the Right-Bank Angara Region (Irkutsk Region)]. *Molodezh. nauch. forum «Estestvennye i meditsinskie nauki»: elektr. sb. st. po materialam XXX studenich. mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf., yanv. 2016 g.* [Youth Sci. Forum “Natural and Medical Sciences”: Proc. 30th Student Intern. Virtual Sci. and Practical Conf., January 2016]. Moscow, Moscow Center for Continuous Mathematical Education Publ., 2016, no. 1(29), pp. 16–19.

7. Lesnoy kompleks Irkutskoy oblasti: stat. sb. [Forest Complex of the Irkutsk Region]. *Territorial'nyy organ Federal'noy sluzhby gos. statistiki Irkutskoy oblasti (Irkutskstat)* [Territorial Organ of the Federal State Service. Statistics of the Irkutsk Region (Irkutskstat)]. Irkutsk, 2016. 92 p. (In Russ.)

8. Lesnoy plan [Forest Plan]. *Ministerstvo lesnogo kompleksa Irkutskoy oblasti: ofits. sayt* [Ministry of Forestry of the Irkutsk Region: Official Site]. Available at: <http://irkobl.ru/sites/alh/documents/lesplan> (accessed 29.03.2018).

9. Lesokhozyaystvennyye reglamenty lesnichestv [Forest Management Regulations of Forestry]. *Ministerstvo lesnogo kompleksa Irkutskoy oblasti: of its. sayt* [Ministry of Forestry of the Irkutsk Region: Official Site]. Available at: <http://irkobl.ru/sites/alh/documents/reglament> (accessed 29.03.2018).

10. *Otchet agentstva lesnogo khozyaystva Irkutskoy oblasti o prodelannoy rabote za 2015 god* [End of Assignment Report of the Forestry Agency of the Irkutsk Region for 2015]. Available at: <http://www.irkobl.ru> (accessed 29.03.2018).

11. *Prognoz razvitiya lesnogo sektora Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [The Projected Growth of the Forest Sector of the Russian Federation until 2030]. Rome, the Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. 86 p. (In Russ.)

12. Chernov N.N. K sootnosheniyu estestvennogo i iskusstvennogo lesovosstanovleniya na Urale [To the Ratio of Natural and Artificial Reforestation in the Urals]. *Lesy Urala i khozyaystvo v nikh*, 2001, no. 21, pp. 210–219. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5102> (accessed 29.03.2018).

13. Chernykh L.V. *Metodika obosnovaniya sposoba lesovosstanovleniya na lesnom uchastke (na primere khvoynno-shirokolistvennykh lesov Srednego Povolzh'ya): dis. ... kand. s.-kh. nauk* [The Substantiation of the Reforestation Method in the Forest Area (the Case of Coniferous-Deciduous Forests of the Middle Volga Region): Cand. Agric. Sci. Diss.]. Yoshkar-Ola, 2016. 224 p.

14. Shchepetneva V.Ya. Lesovosstanovlenie v Irkutskoy oblasti. Osnovnyye problemy i perspektivy razvitiya [Reforestation in the Irkutsk Region. Main Problems and Development

Prospects]. *Oblastnoy lesnoy forum, g. Irkutsk, 25 avg. 2016 g.* [Regional Forest Forum, Irkutsk, 25 August 2016]. Available at: <https://documents.tips/engineering/-58eef7901a28ab1b608b45db.html> (accessed 18.12.2017).

15. Yaroshenko A. Lesa Rossii: est' li balans mezhdru vybytiem i vosstanovleniem? [Forests of Russia: Is There a Balance between Disposal and Recovery?]. *Lesprominform* [Russian Forestry Review], 2015, no. 3(109), pp. 94–95.

16. *China's Forest Recovery Shows Hope for Mitigating Global Climate Change*. Michigan State University, 2016. Available at: <https://phys.org/news/2016-03-china-forest-recovery-mitigating-global.html> (accessed 18.04.2018).

17. Leinonen T., Turtiainen M., Siekkinen A. *Reforestation in the North-West of Russia and Comparison with Finland. Comments of Finnish Specialists*. Yoensuu, Finnish Forest Research Institute Publ., 2009. 36 p. (In Russ.)

18. Rametsteiner E., Nilsson S., Böttcher H., Havlik P., Kraxner F., Leduc S., Obersteiner M., Rydzak F., Schneider U., Schwab D., Willmore L. Study of the Effects of Globalization on the Economic Viability of EU Forestry. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis Publ., 2006. 198 p. Available at: https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/external-studies/2007/viability-forestry/full_text.pdf (accessed 18.04.2018).

19. *The State of Canada's Forests. Annual Report 2016*. Available at: <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/37265.pdf> (accessed 18.04.2018).

Received on February 03, 2018

УДК 630*232.311.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.77

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ КЕДРОВЫХ ЛЕСОВ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

А.П. Ковалев, д-р с.-х. наук, директор

М.А. Шешуков, д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр.

В.В. Позднякова, ст. науч. сотр.

Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Волочановская, д. 71, г. Хабаровск, Россия, 680020; e-mail: dvniih@gmail.com

Большие объемы лесозаготовок в 50–80-е гг. прошлого века на Дальнем Востоке привели к истощению лесных ресурсов, особенно уникальных и ценных кедровников. Поэтому восстановление утраченных позиций кедра в коренном ареале его местопрорастания – одна из наиболее важных и актуальных задач, стоящих перед лесным хозяйством и нашим обществом. Предложен эффективный метод активного восстановления кедровых лесов путем создания реконструктивно-семенных посадок мелкоконтурными участками (био группами), который отличается следующими достоинствами: максимальное использование высокой способности естественных сил природы к самовосстановлению лесных экосистем; обеспечение надежного восстановления кедровых лесов на больших площадях при минимальных затратах ресурсов; незначительное нарушение естественной лесной среды за счет более низкой вероятности гибели куртин-био групп от лесных пожаров и энтомовредителей по сравнению с широко применяемыми плантационными лесными культурами. Производственная апробация предложенного метода восстановления кедровых лесов проведена в лесничествах Хабаровского края. Крупномерные саженцы (4–5-летние) кедра корейского росли и развивались вполне успешно. Сохранность посадок в био группах на момент учета – свыше 80 %, среднегодовой прирост в высоту – более 25 см. Посадки не требовали лесоводственного ухода, к возрасту плодоношения (через 30 лет) био группы должны обеспечить обсеменение прилегающих территорий.

Ключевые слова: кедровые леса, био группы, промышленные рубки, естественное лесовосстановление, саженцы кедра, лесные пожары, минимальные затраты.

Введение

В решении Томской конференции (сентябрь 2014 г.), посвященной проблемам и перспективам комплексного рационального использования, охраны, защиты и восстановления кедровых лесов Сибири и Дальнего Востока, изложены причины, определяющие необходимость изменения правил заготовки, охраны и восстановления таких лесов с учетом лесоводственно-экономической специфики регионов [6].

В 50–80-е гг. прошлого века на Дальнем Востоке большие объемы промышленных лесозаготовок привели к истощению лесных ресурсов, особенно дальневосточных кедровников, уникальных по своей комплексной продуктивности и ценности. В Приморье и южной части Хабаровского края значительные территории (сотни тысяч гектаров), ранее занятые высокопродуктивными кедрово-широколиственными лесами, в результате интенсивных

Для цитирования: Ковалев А.П., Шешуков М.А., Позднякова В.В. Метод восстановления кедровых лесов на Дальнем Востоке // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 77–83. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.77

промышленных рубок и периодически повторяющихся пожаров в настоящее время превратились в гари, редины и производные малоценные березняки, осинники и древесно-кустарниковые заросли. На многих из этих площадей семенники кедр корейского вообще отсутствуют, а стены леса с его участием находятся на таком большом расстоянии, что без активного вмешательства человека восстановление кедровников на них естественным путем невозможно или растянется на столетия. Поэтому возрождение утраченных позиций кедр в коренном ареале его местопроизрастания – одна из наиболее важных и актуальных задач, стоящих перед лесным хозяйством и нашим обществом [9].

В настоящее время эту задачу пытаются решить путем создания реконструктивных культур кедр корейского по производным малоценным листовым насаждениям, что сопряжено с большими затратами средств на прокладку технологических коридоров, подготовку почвы, посадку, уход за саженцами и т. д. [5]. Эти методы отличаются не только большой трудоемкостью, но и рядом существенных негативных лесоводственно-экологических и пирологических последствий. В частности, вследствие сильного нарушения естественной лесной среды, особенно при создании бульдозерами коридоров шириной 4...5 м, происходит их быстрое зарастание травостоем и кустарниками, что сильно снижает приживаемость, последующий рост и развитие лесных культур, а также повышает пожарную опасность лесных участков и часто приводит к их уничтожению пожарами. Все это предопределяет сложность и низкую эффективность подобных методов создания лесных культур.

Все чаще в последние годы ставится вопрос о необходимости внедрения в лесокультурное производство интенсивных технологий с переводом их на широкую промышленную основу. Считается, что создание плантационных культур в виде крупных компактных массивов (площадь 5...10 га и более) позволит эффективнее использовать систему лесохозяйственных машин и орудий, что повысит агротехнику выращивания [1, 11]. Однако многолетний производственный опыт однозначно свидетельствует о том, что для условий Дальнего Востока такой путь развития лесокультурного дела по восстановлению кедровых лесов на данном этапе зачастую неприемлем, главным образом, вследствие гибели лесных культур при пожарах и сильного нарушения лесной экологической среды, а также высокой себестоимости плантационных культур.

В лесопожарном отношении для всех типов лесных культур в Дальневосточном регионе характерно обилие чрезвычайно огнеопасных горючих материалов (быстро высыхающий и легко воспламеняющийся травяной опад – ветошь) и высококалорийного древесно-кустарникового опада (хвоя, листва). В сочетании с периодически повторяющимися засушливыми сезонами это приводит к тому, что не менее половины культур, как правило, погибает от лесных пожаров в течение первых двух десятилетий.

Для успешного восстановления кедровников прежде всего необходимо максимально использовать естественные силы природы. Кардинальное значение имеет выбор наиболее оптимальных способов, которые должны обеспечивать надежное восстановление кедр на больших площадях при минимальных затратах ресурсов и средств (трудовых, материальных, финансовых) и нарушениях естественной лесной среды [10].

Применительно к биоэкологическим естественным процессам развития куртинное расположение кедровников по площади – наиболее эффективный путь их восстановления, что предопределяет создание крупномерным посадочным материалом (4–5-летними саженцами) реконструктивно-семенных посадок кедр мелко-контурными участками (био группами – куртинами) на гарях, вырубках, пустырях, редианах и локальных безлесных участках (прогалинах) в производных березово-осиновых насаждениях, а также в малоценных древостоях вдоль лесовозных и лесохозяйственных дорог. Оптимальный размер семенных кедровых куртин – 0,02...0,04 га (15×15 м или 20×20 м). В каждой из них рекомендуется высаживать по 15...20 крупномерных саженцев с закрытой корневой системой. Биогруппы рационально размещать в шахматном порядке по квартальным просекам (визирам). В зависимости от наличия и пространственного размещения локальных безлесных прогалин расстояние между ними может быть 0,2...1,0 км, что позволит в последующем обеспечивать надежное естественное обсеменение прилегающих площадей. Для снижения пожарной опасности биогруппы необходимо очищать от захламленности и вырубать кустарники.

Активному восстановлению кедровых лесов будет способствовать кедровка, которая является основным биотическим фактором в распространении семян корейского и сибирского кедров и кедрового стланика. Она способна переносить орехи на расстояние 3...5 км [8] и равномерно откладывать их в подстилку (предпочитая подстилку в сомкнутых мертвопокровных листовенничниках и разнотравных типах леса в производных березово-осиновых насаждениях).

Созданные этим способом на обширных территориях искусственные семенные куртины кедр через 30–40 лет начнут активно обсеменять прилегающие к ним участки и служить долговременным (в течение 400–500 лет) надежным естественным ядром восстановления кедровых лесов.

Цель нашего исследования – совершенствование и внедрение современных методов восстановления кедровых лесов Дальнего Востока.

Объекты и методы исследования

В целях производственной апробации предложенного метода восстановления кедровых лесов в Мухенском лесничестве Хабаровского края (в радиусе 2...3 км вокруг Пучинского месторождения минеральных вод) на площади около 2 тыс. га в 1991 г. сотрудниками ДальНИИЛХ были созданы реконструктивные семенные посадки кедр мелко-контурными участками (био группами) на локальных безлесных прогалинах в производных низкополотных березово-осиновых насаждениях, сформировавшихся на гари после интенсивного пожара осенью 1976 г. Кроме того, в 1989 г. в Хехцирском лесничестве лесопаркового лесничества крупномерными саженцами были созданы куртины – био группы кедр в разреженных участках (прогалинах) березово-осиновых насаждений.

Биогруппы в Мухенском лесничестве (49 площадок) расположены неравномерно по площади (150...350 м друг от друга). Перед посадкой площадки тщательно очищались от кустарников и поросли отдельных деревьев. Посадочные места размещались по площадке в шахматном порядке, на один саженец приходилось 15...20 м². Такой подход обеспечивал солнечное освещение уже на начальном этапе создания посадок [3, 13]. Уход за посадками проводился только на 3-й год после их создания, вырубалась поросль осины и кустарников.

Приживаемость саженцев на 2-й год составляла 96 %. На момент учета на площадках появились деревца осины, в основном порослевые, реже клены. Травянистая растительность и поросль лиственных пород практически не оказывали негативного влияния на рост кедров, высота которых была на уровне с появившейся порослью лиственных пород и варьировала от 4 до 6 м.

В дальнейшем на участке необходимо проводить рубки ухода, вырубая мешающие росту лиственные породы [12, 14]. Кедровые посадки, имея высокую сохранность и хорошие показатели роста, уже через 20–25 лет вполне могут войти в верхний полог древостоя и начнут плодоносить.

В Хехцирском лесничестве биогруппы (37 площадок) располагались как в послепожарных березово-осиновых молодняках, так и в спелых осиновых древостоях, пройденных интенсивной рубкой в 1985 г. На вырубке сохранились отдельные куртины крупномерных деревьев осины и густой полог кустарников (лещина, жимолость, спирея), которые удалялись при подготовке площадок. Посадки создавались более равномерно по специальным визирам на расстоянии 250 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Обследование биогрупп, проведенное в 2016 г., показало, что существенных отличий хода роста кедра корейского в малоценных молодняках Хехцирского и Мухенского лесничеств не наблюдалось. Среднегодовой прирост по высоте составил около 25 см (см. таблицу).

Характеристика роста кедра корейского в биогруппах

Лесничество	Количество учтенных биогрупп, шт.	Сохранность саженцев на 2-3-й год, %	Средняя высота, м	Среднегодовой прирост в высоту, см			
				общий	в том числе по периодам		
					2000–2005 гг.	2006–2010 гг.	2011–2016 гг.
Хехцирское	37	95,6	5,2	25,5	17,2	22,6	36,7
Мухенское	49	96,2	4,6	24,1	16,4	20,8	35,2

Из данных таблицы видно, что сохранность посадок в биогруппах на 2-3-й год составляла более 95 %. Уже на 3-й год у саженцев отмечен активный рост в высоту, который к моменту учета достигал 20...35 см/год. Они успешно противостояли заглушению травянистой растительностью и не требовали последующего агротехнического ухода. Для снижения пожарной опасности участки очищали от захламленности. Средняя высота деревьев к 2016 г. – 4,6...5,2 м.

Кедр корейский в силу своих биологических особенностей произрастает в сравнительно узкой экологической нише, это наглядно видно по средней высоте из таблиц хода роста естественных насаждений [4, 7]. При благоприятных условиях произрастания плодоношение (обсеменение) прилегающих к биогруппам площадей зоохорным способом может начинаться в 50–70 лет, что вполне будет обеспечивать естественное возобновление одной из самых ценных пород Дальнего Востока без существенных затрат на ее воспроизводство [2, 12].

Оптимальным транспортным средством, способствующим качеству выполняемых работ и повышению производительности труда при создании биогрупп могут быть квадроциклы (мотовездеходы), оборудованные для перевозки саженцев, минеральных и органических удобрений, воды и ручных инструментов.

Бригада из 2-3 чел. за один сезон (посадку саженцами с закрытой корневой системой можно производить в течение весны, лета и осени) может создать биогруппы кедр на площади более 10 тыс. га. В этом мероприятии активное участие могут принимать школьные лесничества. По предварительным расчетам себестоимость восстановления кедровых лесов предложенным методом на несколько порядков ниже по сравнению с плантационными культурами.

Заключение

К очевидным достоинствам восстановления кедровых лесов предложенным методом содействия естественному их возобновлению за счет создания реконструктивно-семенных посадок мелко-контурными участками (биогруппами) следует отнести максимальное использование высокой способности естественных сил природы к самовосстановлению лесных экосистем; обеспечение восстановления кедровых лесов на больших площадях при незначительных затратах; минимальное нарушение естественной лесной среды и более низкая вероятность гибели биогрупп от лесных пожаров и энтомофитов по сравнению с плантационными культурами.

Столь значимые достоинства позволяют рекомендовать этот метод для широкого использования при восстановлении кедровых лесов не только на Дальнем Востоке, но и в других регионах Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуль Л.П., Никитенко Е.А. Создание лесных культур // Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2009. С. 361–366.
2. Козин Е.К. Рекомендации по ускоренному формированию орехоносных кедровых насаждений из лесных культур. Владивосток: Дальнаука, 2000. 22 с.
3. Корякин В.Н., Романова Н.В., Дидиченко Ю.В. Шкала минимальной и оптимальной обеспеченности светом кедр корейского в лесных культурах // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопользования: материалы Всерос. конф. с междунар. участием, Хабаровск, 10–11 окт. 2013 г. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 168–174.
4. Кудинов А.И. Широколиственно-кедровые леса Южного Приморья и их динамика. Владивосток: Дальнаука, 2004. 369 с.
5. Пулинец М.П., Полетаев В.И. Рекомендации по реконструкции малоценных лиственных насаждений в горных кедровниках средней подзоны зоны хвойно-широколиственных лесов Приморского края. Хабаровск, 1987. 37 с.
6. Создание промышленных подрайонов позволит прийти к интенсивному лесовосстановлению // Технодрев. Дек. (82). 2014. С. 43–46.
7. Справочник для учета лесных ресурсов Дальнего Востока / отв. сост. и науч. ред. В.Н. Корякин. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2010. 525 с.
8. Тихомиров Б.А. Кедровый стланик, его биология и использование. М.: Изд-во Моск. о-ва испытателей природы, 1949. 106 с.

9. Шешуков М.А., Коломыцев В.М., Кожурин А.К., Щелозаев Г.Д. О восстановлении кедровников путем создания пожароустойчивых долговременных семенных биогрупп // Лесн. хоз-во. 1991. № 1. С. 35–36.

10. Ярошенко А.Ю. Как вырастить лес: метод. пособие. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Гринпис России, Сиб. экол. центр, Всемир. лес. вахта, 2006. 48 с.

11. Choi D., Voon H., Bae S., Hwang J. Effects of Thinning on Growth and Carbon Storage in Korean Pine Plantation. Korea University, 2009.

12. Sang-Urk Han, Tae-Heum Shim, Jae-Seon Yi. The Status of Early Development for *Pinus koraiensis* Underplanting in the Oak Forest. The Society of Korean White Pine, 2007. Pp. 63–71.

13. Vestlund K. Assessing Rules and Ideas for Stem Selection in Cleaning // Baltic Forestry. 2004. Vol. 10, no. 2. Pp. 61–71.

14. Zeide B. Optimal Stand Density: a Solution // Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34, no. 4. Pp. 846–854.

Поступила 23.01.18

UDC 630*232.311.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.77

Regeneration Method of Cedar Forests in the Far East

A.P. Kovalev, Doctor of Agricultural Sciences

M.A. Sheshukov, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Research Officer

V.V. Pozdnyakova, Senior Research Officer

Far East Forestry Research Institute, ul. Volochaevskaya, 71, Khabarovsk, 680020, Russian Federation; e-mail: dvniihl@gmail.com

Large volumes of logging in the 50–80-ies of the last century in the Far East led to depletion of forest resources, especially of unique and valuable cedar forests. The restoration of cedar in the indigenous area of its habitat is one of the most important and urgent tasks facing the forestry and our society. The paper presents an effective method of active regeneration of cedar forests by reconstructive-seed plantings in shallow-contour plots (biogroups). This method has the following advantages: the maximum use of nature forces in the forest ecosystems self-regeneration; ensuring reliable restoration of cedar forests on large areas with minimal resource costs; insignificant violation of the natural forest environment due to a lower probability of mortality of biogroups because of forest fires and harmful insects in comparison with widely used plantation forest crops. The productive evaluation of the proposed method of cedar forest restoration was carried out in the forest districts of the Khabarovsk Territory. Large-sized seedlings (4–5-year-old) of Korean pine developed quite successfully. Preservation of plantings in biogroups at the registration time was over 80 %, the average annual height growth was more than 25 cm. The plantings did not require silvicultural attention; and by the age of fruiting (in 30 years), the biogroups should ensure the seeding of the adjacent territories.

Keywords: cedar forest, biogroup, industrial harvesting, natural reforestation, cedar plant, forest fire, minimum costs.

For citation: Kovalev A.P., Sheshukov M.A., Pozdnyakova V.V. Regeneration Method of Cedar Forests in the Far East. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 77–83. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.77

REFERENCES

1. Gul' L.P., Nikitenko E.A. Sozdanie lesnykh kul'tur [The Creation of Forest Cultures]. *Sovremennoe sostoyanie lesov rossiyskogo Dal'nego Vostoka i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [The Current State of Forests of the Russian Far East and the Prospects for Their Use]. Khabarovsk, FEFRI Publ., 2009, pp. 361–366. (In Russ.)
2. Kozin E.K. *Rekomendatsii po uskorennomu formirovaniyu orekhonosnykh kedrovyykh nasazhdeniy iz lesnykh kul'tur* [Recommendations on the Accelerated Formation of Nut-Bearing Cedar Plantations from Forest Cultures]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000. 22 p. (In Russ.)
3. Koryakin V.N., Romanova N.V., Didichenko Yu.V. Shkala minimal'noy i optimal'noy obespechennosti svetom kedra koreyskogo v lesnykh kul'turakh [Scale of Minimum and Optimal Light Supply of Korean Pine in Forest Cultures]. *Sostoyanie lesov i aktual'nye problemy lesoupravleniya: materialy Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem, Khabarovsk, 10–11 okt. 2013 g.* [State of Forests and Contemporary Issues of Forest Management: Proc. All-Russ. Conf. with Intern. Participation, Khabarovsk, October 10–11, 2013]. Khabarovsk, FEFRI Publ., 2013, pp. 168–174. (In Russ.)
4. Kudinov A.I. *Shirokolistvenno-kedrovye lesa Yuzhnogo Primor'ya i ikh dinamika* [Broadleaved-Cedar Forests of Southern Primorye and their Dynamics]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2004. 369 p. (In Russ.)
5. Pulinets M.P., Poletaev V.I. *Rekomendatsii po rekonstruktsii malotsennykh listvennykh nasazhdeniy v gornyykh kedrovnikakh sredney podzony zony khvoynno-shirokolistvennykh lesov Primorskogo kraya* [Recommendations for the Subsidiary Hardwoods Conversion in Mountain Cedar Forests of the Middle Subzone of the Mixed Coniferous-Broad Leaved Forest Zone of Primorsky Krai]. Khabarovsk, 1987. 37 p. (In Russ.)
6. Sozdanie promyshlennykh podrayonov pozvolit priyti k intensivnomu lesovosstanovleniyu [The Creation of Industrial Subareas will allow Coming to Intensive Reforestation]. *Tekhnodrev*, 2014, no. 82, pp. 43–46.
7. *Spravochnik dlya ucheta lesnykh resursov Dal'nego Vostoka* [Handbook for Accounting Forest Resources in the Far East]. Ed. by V.N. Koryakin. Khabarovsk, FEFRI Publ., 2010. 525 p. (In Russ.)
8. Tikhomirov B.A. *Kedrovyy stlanik, ego biologiya i ispol'zovanie* [Cedar Elfin Wood, Its Biology and Use]. Moscow, Moscow Society of Naturalists Publ., 1949. 106 p. (In Russ.)
9. Sheshukov M.A., Kolomytsev V.M., Kozhurin A.K., Shchelogaev G.D. O voss-tanovlenii kedrovnikov putem sozdaniya pozharoustoychivyykh dolgovremennykh semen-nykh biogrupp [On the Restoration of Cedar Forests by Creating Fire-Resistant Long-Term Seed Biogroups]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1991, no. 1, pp. 35–36.
10. Yaroshenko A.Yu. *Kak vyrastit' les* [How to Grow a Forest]. Moscow, Greenpeace Russia, Siberian Ecological Center, Global Forest Watch, 2006. 48 p. (In Russ.)
11. Choi D., Voon H., Bae S., Hwang J. *Effects of Thinning on Growth and Carbon Storage in Korean Pine Plantation*. Korea University, 2009.
12. Sang-Urk Han, Tae-Heum Shim, Jae-Seon Yi. *The Status of Early Development for Pinus koraiensis Underplanting in the Oak Forest*. The Society of Korean White Pine, 2007, pp. 63–71.
13. Vestlund K. Assessing Rules and Ideas for Stem Selection in Cleaning. *Baltic Forestry*, 2004, vol. 10, no. 2, pp. 61–71.
14. Zeide B. Optimal Stand Density: a Solution. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 846–854.

Received on January 23, 2018

УДК 630*631.53.01

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.84

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ ПО УРОЖАЙНОСТИ ШИШЕК В УСЛОВИЯХ ИНТРОДУКЦИИ

Р.С. Хамитов¹, д-р с.-х. наук, доц.

М.А. Андропова², канд. техн. наук, доц.

А.М. Антонов³, канд. с.-х. наук, доц.

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия

им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, 160555;

e-mail: r.s.khamitov@mail.ru

²Вологодский институт права и экономики ФСИН России, ул. Щетинина, д. 2А,
г. Вологда, Россия, 160026; e-mail: mary1969@yandex.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Се-
верной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: a.antonov@narfu.ru

Формирование урожая семян сосны кедровой сибирской (имеющих и пищевую ценность) предопределяет целесообразность ее интродукции. Изменчивость семенной продуктивности сосны кедровой сибирской выражена на географическом и индивидуальном уровнях, а также обусловлена внешними факторами (например, неоднородностью погодных условий по годам генерации урожая). Исследования проведены в целях выявления индивидуальной изменчивости сосны кедровой сибирской по урожайности шишек в условиях интродукции. Наблюдения за семеношением осуществлены в Чагринской кедровой роще, расположенной в Грязовецком районе Вологодской области. Для оценки урожая шишек на объекте исследований у модельных деревьев (отобранных пропорционально представленности по ступеням толщины их стволов) при помощи бинокля подсчитывалось количество шишек в кроне дерева. Семносящие деревья сосны кедровой сибирской на этом объекте в среднем ежегодно продуцируют от 131 до 214 шишек. Исследования показали наличие существенного ($F_{\phi} = 7,09 > F_{05} = 1,94$) влияния индивидуальной изменчивости деревьев на урожай шишек, который на 63 % зависит от этого параметра. В значительно меньшей степени выражена вариабельность урожайности шишек по годам наблюдений ($\eta^2 = 0,10$), обусловленная погодными условиями в период формирования, роста и созревания макростробил ($F_{\phi} = 5,18 > F_{05} = 2,83$). Отдельные биотипы сосны кедровой сибирской отличаются высоким и стабильным по годам урожаем шишек. Количество образующихся шишек в наибольшей степени ($r = -0,75 \pm 0,11$) зависит от коэффициента формы кроны деревьев (отношения ее ширины к длине). При проведении селекционной работы по отбору высокоурожайных биотипов рекомендуется учитывать этот показатель в качестве коррелятивного признака.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, интродукция, изменчивость, селекция, шишки.

Введение

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), или кедр сибирский, занимающая обширный естественный ареал на северо-востоке европейской части России, на Урале и в Сибири, образует леса важного экосистемного значения [4].

Для цитирования: Хамитов Р.С., Андропова М.А., Антонов А.М. Изменчивость сосны кедровой сибирской по урожайности шишек в условиях интродукции // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 84–91. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.84

Выведение этой породы за пределы перечисленных территорий с учетом ее декоративности и орехоносного значения увеличивает биоразнообразие экосистем и существенно расширяет список лесных пользований [9]. Важным показателем успешности интродукции является способность производить в новых экологических условиях жизнеспособное потомство [6]. Формирование урожая семян сосны кедровой сибирской (которые имеют и пищевую ценность) предопределяет и целесообразность ее интродукции [9].

Под урожайностью лесных древесных пород понимают свойство формировать определенное количество семян или плодов на единице площади. Ввиду того, что это свойство характеризуется как биологическими, так и экологическими особенностями, в практике лесной селекции для выявления лучших биотипов исследуется урожайность отдельных деревьев. Для этого учитывают количество семян, плодов или шишек отдельно по деревьям (или их клонам) для последующего сравнения. Количество образуемых репродуктивных органов обусловлено полноценным развитием и ростом почек, побегов, на которых они формируются, а также размерами самого растения [9, 10].

Имеются сведения о существовании изменчивости семенной продуктивности сосны кедровой сибирской на географическом и индивидуальном уровнях, а также обусловленной внешними факторами (например, неоднородностью погодных условий по годам генерации урожая) [1, 3, 5, 7, 9, 10]. Такая изменчивость отмечена и у других представителей рода сосна [12, 13]. Лесокультурный процесс в настоящее время должен осуществляться на генетико-селекционной основе [11]. Значение селекции по семенной продуктивности особенно велико в том случае, если не существует противоречия между урожайностью и самими селекционируемыми параметрами. Особенность кедра сибирского – в том, что обилие семеношения само по себе является признаком, на который направлен отбор [9]. Признано, что использование селекционных приемов способствует созданию высокоурожайных кедровников [2].

Цель исследований – выявление индивидуальной изменчивости сосны кедровой сибирской по урожайности шишек в условиях интродукции.

В задачи исследований входило осуществление сравнительного анализа изменчивости урожайности шишек отдельных семеносящих деревьев по годам наблюдений с установлением влияния индивидуальной изменчивости и коррелятивных признаков, позволяющих упростить отбор высокоурожайных особей.

Объекты и методы исследования

Наблюдения за семеношением кедра сибирского проведены на территории Чагринской кедровой рощи, расположенной в Грязовецком районе Вологодской области. Площадь насаждения – 3,7 га. Это одна из старейших рощ на Европейском Севере, посаженная помещиком Н.А. Петровым в 1900–1904 г. близ дер. Шипяково. Она заложена 5–10-летними деревьями кедра, привезенными в корзинах с комом земли. Дички высаживались на расстоянии 5×5 сажен, т. е. приблизительно 10×10 м. Изначально роща носила исключительно декоративный характер. Кроме кедра в роще высажены пихты, лиственницы, дубы, а по периметру – липа. Начиная с возраста 20 лет, роща начала семеносить. В 1949 г. с 220 деревьев кедра было заготовлено более 800 кг орехов. К настоящему времени в ней прослеживается 28 рядов старых посадок. Наиболее мощные деревья сосредоточены на невысоком холме в центральной части насаждения. Сохранилось 133 кедра с мощными стволами, средний диаметр которых на высоте 1,3 м составляет 62,1 см, средняя высота – 19,5 м.

Все деревья кедр для учета промаркированы масляной краской с указанием их порядкового номера. Почва на участке – дерново-подзолистая, по механическому составу – тяжелосуглинистая. Напочвенный покров изобилует лесными, луговыми и сорными травами [9].

Для оценки объема урожая шишек на объектах исследований у модельных деревьев, отобранных пропорционально представленности по ступеням толщины их стволов, при помощи бинокля подсчитывалось количество шишек в кроне дерева с одной стороны (в отдельных случаях с двух противоположных сторон). Полученный результат удваивался. В соответствии с Указаниями по лесному семеноводству (2000 г.), к модельным деревьям не относили особи без шишек или с единичными шишками (до 10 шт.) [8]. Кроме того, в качестве моделей не отбирали деревья на опушке.

Наблюдения производили в начале июля, когда в кроне хорошо различимы созревающие макростробилы, и до момента опадения шишек.

Результаты исследования и их обсуждение

На исследуемом объекте семеносящие деревья сосны кедровой сибирской ежегодно продуцируют в среднем от 131 до 214 шт. шишек (табл. 1). Наибольшее их количество в кронах деревьев отмечено в 2013 г., наименьшее – в 2016 г. Выражена флуктуация урожайности между отдельными деревьями одной генерации урожая.

Таблица 1

Индивидуальная изменчивость сосны кедровой сибирской по урожайности шишек

Номер дерева	Количество шишек, шт., на дереве по годам наблюдений			
	2013	2014	2016	2017
62	296	176	292	174
66	322	184	116	140
68	64	64	44	98
77	378	320	174	484
85	314	296	228	422
106	229	48	82	94
110	120	112	116	180
111	146	80	162	268
112	146	248	172	306
113	250	72	168	302
115	400	208	142	194
118	30	24	22	42
119	180	30	110	52
165	105	56	48	32
170	226	128	86	38
Среднее	214	136	131	188

В условиях интродукции многие биотипы отличаются высоким урожаем шишек. Нетрудно заметить, что отдельные растения, имеющие лучшие показатели по количеству сформированных шишек, отличаются и относительной стабильностью рангового положения по годам наблюдений. Так, в кроне модельного дерева № 77 ежегодно в среднем образуется 339 шишек.

Максимальное количество шишек (484 шт.) отмечено в 2017 г. Среди модельных деревьев по урожаю шишек это растение лидировало в 2014 и 2017 гг. Кроме этого, достаточно высокие урожаи отмечены у деревьев № 85 (228...422 шт.) и № 115 (142...400 шт.). Количество шишек, образуемое деревьями кедра, в большинстве случаев коррелирует по годам наблюдений. Достоверная взаимосвязь отмечается на уровне 0,64–0,78. Максимальное сопряжение между урожаем шишек в 2014 и 2017 гг. составило $0,78 \pm 0,10$. Не выявлено достоверной корреляции между объемом урожая в 2013 и 2016 гг., а также в 2013 и 2017 гг.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа подтвердили существенное влияние индивидуальной изменчивости деревьев на урожай шишек ($F_{\phi} = 7,09 > F_{05} = 1,94$). Кроме того, выражена и вариабельность урожайности шишек по годам наблюдений, обусловленная погодными условиями в период формирования, роста и созревания макростробил ($F_{\phi} = 5,18 > F_{05} = 2,83$) (табл. 2).

Таблица 2

Влияние индивидуальной изменчивости деревьев и погодных условий на урожай шишек

Источник вариации	Дисперсия SS	Степень свободы df	Варианса MS	Критерий Фишера		Сила влияния η^2
				F_{ϕ}	F_{05}	
Изменчивость:						
индивидуальная	467 900,8	14	33 421,5	7,09	1,94	0,63
по годам наблюдений	73 324,8	3	24 441,6	5,18	2,83	0,10
Погрешность	198 025,7	42	4 714,9	–	–	–
<i>Итого</i>	739 251,3	59	–	–	–	–

Индивидуальной изменчивостью семеносящих деревьев урожай шишек обусловлен на 63 % ($\eta^2 = 0,63$). Корреляционное отношение ($\eta = 0,80 \pm 0,05$) указывает на высокую зависимость количества шишек от индивидуальных особенностей биотипов. Репродуктивная способность в значительно меньшей степени связана с погодными условиями ($\eta^2 = 0,10$).

Между тем отбор высокоурожайных особей по прямому признаку затруднен длительностью наблюдений, необходимых для выявления особей, характеризующихся стабильно высоким количеством шишек. В связи с этим полезно выявление дополнительных коррелятивных признаков. Исследование биометрических особенностей кроны модельных деревьев показало, что отдельные ее параметры влияют на количество продуцируемых шишек (табл. 3).

В наибольшей степени урожай шишек связан с коэффициентом формы кроны (отношение ее ширины к длине): $r = -0,75 \pm 0,11$. Значение коэффициента корреляции указывает на высокую зависимость урожая шишек от этого показателя. Наибольшее количество шишек образуется у растений с относительно узкой, но протяженной кроной. При этом, если сама протяженность кроны также сопряжена с урожайностью шишек ($r = -0,62 \pm 0,16$), то ее диаметр не оказывает влияния на количество продуцируемых шишек. Это объясняется тем,

Таблица 3

Биометрические параметры кроны и средний урожай шишек модельных деревьев

Номер дерева	Биометрические параметры кроны			Средний урожай шишек, шт.
	диаметр, м	протяженность, м	коэффициент формы	
62	10,3	15,1	0,68	235
66	9,8	10,1	0,97	191
68	7,5	5,8	1,29	68
77	9,5	13,3	0,71	339
85	9,3	17,3	0,54	315
106	10,5	9,9	1,06	113
110	14,8	19,5	0,76	132
111	11,5	9,7	1,19	164
112	11,1	16,8	0,66	218
113	11,7	15,8	0,74	198
115	9,6	14,8	0,65	236
118	8,1	7,2	1,13	30
119	9,6	8,6	1,12	93
165	10,2	7,4	1,38	60
170	10,2	15,9	0,64	120
Среднее	10,2	12,5	0,90	167

что многие деревья с широкой, но высокоподнятой кроной не способны продуцировать большое количество шишек, поскольку генеративный ярус расположен также и в нижней части кроны сосны кедровой сибирской.

Заключение

Таким образом, в условиях интродукции отдельные биотипы сосны кедровой сибирской отличаются высоким и стабильным по годам урожаем шишек, что обусловлено индивидуальной изменчивостью. При этом значительно большее количество шишек продуцируют деревья с относительно узкой, но протяженной кроной. При проведении селекционной работы по отбору высокоурожайных биотипов целесообразно учитывать подобную закономерность, используя коэффициент формы кроны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьев С.П., Попов П.П. Прогноз и оценка урожая семян в кедровниках Западной Сибири // Лесн. хоз-во. 1996. № 6. С. 33–35.
2. Дроздов И.И. Программа интродукции кедра сибирского в европейскую часть СССР. М.: МЛТИ, 1991. 56 с.
3. Матвеева, Р.Н., Буторова О.Ф. Генетика, селекция, семеноводство кедра сибирского. Красноярск: СибГТУ, 2000. 243 с.
4. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Братилова Н.П. Полезные свойства и методы размножения кедра сибирского. Красноярск: СибГТУ, 2003. 154 с.
5. Савельев С.С. Репродуктивный потенциал клонов сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) на юге Красноярского края: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2011. 20 с.

6. Сарсекова Д.Н. Способность к естественному возобновлению хвойных интродуцентов на юго-востоке Казахстана // Лесн. журн. 2010. № 5. С. 57–63. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Титов Е.В. Методика отбора плюсовых деревьев и насаждений кедр сибирского на урожайность в Горном Алтае. Воронеж: ЦНИИЛГиС, 1984. 20 с.
8. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. 198 с.
9. Хамитов Р.С., Бабич Н.А., Дроздов И.И. Интродукция сосны кедровой сибирской на селекционной основе в таежную зону Восточно-Европейской равнины. Вологда–Молочное: Вологодская ГМХА, 2016. 236 с.
10. Храмова О.Ю. Репродуктивная способность и перспективы хозяйственного использования сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) при интродукции в Поволжье (на примере Нижегородской области): дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2009. 164 с.
11. Danell O. Survey of Past, Current and Future Swedish Forest Tree Breeding // *Silva Fennica*. 1991. Vol. 25, no. 4. Pp. 241–247.
12. Kurm M., Kaur U., Maaten T., Kiviste A. Pärilikkuse mõjust hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) kasvuomadustele järglaskatsetes [About the Heritability Influence to the Growth Performance in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Progeny Trials] // *Metsanduslikud Uurimused* [Forestry Studies]. 2008. Vol. 48. Pp. 79–87.
13. Sivacioglu A., Ayan S. Evaluation of Seed Production of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Clonal Seed Orchard with Cone Analysis Method // *African Journal of Biotechnology*. 2008. Vol. 7(24). Pp. 4393–4399.

Поступила 21.12.17

UDC 630*631.53.01

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.84

Variability of Siberian Stone Pine Cone Production under Conditions of Introduction

R.S. Khamitov¹, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor

M.A. Andronova², Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

A.M. Antonov³, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

¹Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation;

e-mail: r.s.khamitov@mail.ru

²Vologda Institute of Law and Economics of the Federal Penitentiary Service of Russia, ul. Shchetinina, 2A, Vologda, 160026, Russian Federation;

e-mail: mary1969@yandex.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: a.antonov@narfu.ru

The formation of cone crops of Siberian stone pine (having nutritional value) predetermines the expediency of its introduction. The variability of the seed productivity of Siberian stone

For citation: Khamitov R.S., Andronova M.A., Antonov A.M. Variability of Siberian Stone Pine Cone Production under Conditions of Introduction. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 84–91. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.84

pine is expressed at the geographical and individual levels, as well as due to external factors, such as the heterogeneity of weather conditions over the years of crop generation. The goal of research was to reveal the individual variability of Siberian stone pinecone production under the conditions of introduction. The observations of seeding were carried out in the Chagrinskaya cedar grove located in the Gryazovets district of the Vologda region. To estimate the cone crop of model trees (selected proportionally to the diameter class of their trunks) the authors counted the number of cones in the tree crown using the binoculars. Seed-bearing trees of Siberian stone pine annually produce on the studied object at the average from 131 to 214 cones. The studies have shown the significant impact ($F_{\phi} = 7.09 > F_{05} = 1.94$) of individual variability of trees on the cone crop, which depends on this parameter by 63 %. The variability of cone crop by the years of observations ($\eta^2 = 0.10$) caused by weather conditions during the period of formation, growth and maturation of macro cones ($F_{\phi} = 5.18 > F_{05} = 2.83$) is much less expressed. Separate biotypes of Siberian stone pine are distinguished by high and stable yield of cones over the years. The number of cones is mostly affected ($r = -0.75 \pm 0.11$) by the crown form coefficient (the ratio of its width to the length). The authors recommend considering this index as a correlative feature for carrying out a breeding work on the selection of high-yielding biotypes.

Keywords: Siberian stone pine, introduction, variability, selection, cone.

REFERENCES

1. Aref'ev S.P., Popov P.P. Prognoz i otsenka urozhaya semyan v kedrovnikakh Zapadnoy Sibiri [Forecast and Evaluation of the Seed Yield in the Cedar Forests of Western Siberia]. *Lesnoe khozyaystvo*, 1996, no. 6, pp. 33–35.
2. Drozdov I.I. *Programma introduksii kedra sibirskogo v evropeyskuyu chast' SSSR* [The Program for the Introduction of Siberian Stone Pine into the European Part of the USSR]. Moscow, MFEI Publ., 1991. 56 p. (In Russ.)
3. Matveeva R.N., Butorova O.F. *Genetika, selektsiya, semenovodstvo kedra sibirskogo* [Genetics, Selection, Seed Growing of Siberian Stone Pine]. Krasnoyarsk, SSUST Publ., 2000. 243 p. (In Russ.)
4. Matveeva R.N., Butorova O.F., Bratilova N.P. *Poleznye svoystva i metody raznozheniya kedra sibirskogo* [Useful Properties and Methods of Reproduction of Siberian Cedar]. Krasnoyarsk, SSUST Publ., 2003. 154 p. (In Russ.)
5. Savelev S.S. *Reproduktivnyy potentsial klonov sosny sibirskoy (Pinus sibirica Du Tour) na yuge Krasnoyarskogo kraya: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Breeding Potential of Clones of Siberian Cedar (*Pinus Sibirica* Du Tour) in the South of the Krasnoyarsk Territory: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Krasnoyarsk, 2011. 20 p.
6. Sarsekova D.N. Sposobnost' k estestvennomu vozobnovleniyu khvoynykh introducentov na yugo-vostoke Kazakhstana [Natural Reforestation Ability of Coniferous Introducements in the Southeast of Kazakhstan]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2010, no. 5, pp. 57–63.
7. Titov E.V. *Metodika otbora plyusovykh derev'ev i nasazhdeniy kedra sibirskogo na urozhaynost' v Gornom Altae* [Method of Selection of Elite Trees and Plantations of Siberian Stone Pine for Productivity in the Gorny Altai]. Voronezh, CRIFGS Publ., 1984. 20 p. (In Russ.)
8. *Ukazaniya po lesnomu semenovodstvu v Rossiyskoy Federatsii* [Guidelines for Forest Seed Production in the Russian Federation]. Moscow, All-Russ. Sci. For. Resources Inform. Center Publ., 2000. 198 p. (In Russ.)

9. Khamitov R.S., Babich N.A., Drozdov I.I. *Introduktsiya sosny kedrovoy sibirskoy na selektsionnoy osnove v taezhnyuyu zonu Vostochno-Evropeyskoy ravniny* [The Introduction of Siberian Stone Pine on a Breeding Basis into the Taiga Zone of the East European Plain]. Vologda – Molochnoe, VSDFA Publ., 2016. 236 p. (In Russ.)

10. Khramova O.Yu. *Reproduktivnaya sposobnost' i perspektivy khozyaystvennogo ispol'zovaniya sosny kedrovoy sibirskoy (Pinus sibirica Du Tour) pri introduktsii v Povolzh'e (na primere Nizhegorodskoy oblasti): dis. ... kand. s.-kh. nauk* [Reproductive Capacity and Prospects of Economic Use of Siberian Stone Pine (*Pinus Sibirica* Du Tour) when the Introduction in the Volga Region (the Case of the Nizhny Novgorod Region): Cand. Agric. Sci. Diss.]. Moscow, 2009. 164 p.

11. Danell O. Survey of Past, Current and Future Swedish Forest Tree Breeding. *Silva Fennica*, 1991, vol. 25, no. 4, pp. 241–247.

12. Kurm M., Kaur U., Maaten T., Kiviste A. Pärilikkuse mõjust hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) kasvuomadustele järglaskatsetes [About the Heritability Influence to the Growth Performance in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Progeny Trials]. *Metsanduslikud Uurimused* [Forestry Studies], 2008, vol. 48, pp. 79–87.

13. Sivacioglu A., Ayan S. Evaluation of Seed Production of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Clonal Seed Orchard with Cone Analysis Method. *African Journal of Biotechnology*, 2008, vol. 7(24), pp. 4393–4399.

Received on December 21, 2017



УДК 630*232.427

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.92

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДКОРНЕВОГО ПОЛИВА САЖЕНЦЕВ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ПОЛОС

С.Н. Орловский, канд. техн. наук, доц.

Красноярский государственный аграрный университет, просп. Мира, д. 90,
г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

Существующие технологии посадки и полива саженцев лесных культур во влагодефицитных районах Российской Федерации не обеспечивают их удовлетворительной приживаемости. Полив лесных культур в лесополосах производится, как правило, под корень посредством шланга от емкости с водой или автомобиля-водовоза. Расход воды составляет 20...30 л на одно растение, при этом до 90 % воды бесполезно рассеивается в почве или испаряется. Цель исследования – обоснование низкоэнергоемкой технологии подкорневого полива саженцев лесных культур при создании полезащитных лесных полос на опустыненных территориях в условиях трудности доставки поливочной воды с применением возобновляемых экологически безопасных источников энергии для ее подачи к корневым системам и разработка соответствующего оборудования. Метод исследования – расчеты производительности машин и оборудования для доставки воды и подкорневого полива, гидравлические расчеты системы полива и оборудования для его выполнения. Результаты исследований – конкретные данные по технологии полива, сменной и сезонной производительности машин, их количеству, параметрам прицепа-водовоза и его оборудования для подачи воды в гидравлические коммуникации, сечениям гидравлических коммуникаций, затратам мощности на подачу воды к корневым системам саженцев и энергетической эффективности гелиобатарей для питания компрессора. На основании полученных результатов возможно обосновать технологию подкорневого полива саженцев лесных культур в первые пять-шесть лет их роста при посадке полезащитных полос на опустыненных территориях в условиях дефицита воды и компоновку прицепа-водовоза с подачей воды за счет использования гелиоэнергии, определить конструктивные и геометрические параметры поливочной системы, рассчитать затраты мощности на выполнение технологического процесса, что позволит увеличить производительность труда, снизить нарушение почвенного покрова и сократить затраты на посадку полос.

Ключевые слова: подкорневой полив, саженцы, полезащитная полоса, технология полива, гелиобатарея, компрессор, производительность оборудования.

Для цитирования: Орловский С.Н. Технология подкорневого полива саженцев лесных культур полезащитных полос // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 92–102. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.92

Введение

Полезитные лесные полосы создаются для задержания и равномерного распределения снега на полях, уменьшения испарения влаги и повышения влажности почв, предотвращения развеивания их ветром, защиты сельскохозяйственных культур от суховея, улучшения микроклимата и, в конечном итоге, повышения урожайности. Наиболее подходящим лесопосадочным материалом в условиях засушливых районов являются одно- и двухлетние сеянцы стандартных размеров [1, 4, 5].

Основные или продольные лесные полосы закладываются перпендикулярно направлению господствующих иссушающих ветров, они соединяются между собой поперечными лесными полосами под прямым углом [6]. При посадке лесных полос на опустыненных территориях возникают проблемы полива саженцев, так как при дефиците влаги лесные культуры плохо приживаются [7, 12].

Полив лесных культур в лесополосах производится, как правило, под корень посредством шланга от емкости с водой или автомобиля-водовоза. При этом большая часть воды рассеивается в почве или испаряется.

Успех лесоразведения на песках зависит от форм и конструкций создаваемых насаждений, их пространственного расположения, правильного смешения древесно-кустарниковых пород, подготовки почвы, техники посадки и последующего ухода. Уход за культурами (полив и подкормка) трудновыполним ввиду необходимости доставлять воду на большие расстояния [4, 8, 14, 16].

Орошение, являясь одним из видов мелиорации, подразделяется на внутрпочвенное и поверхностное. У внутрпочвенного орошения множество достоинств: во-первых, оно насыщает почву воздухом, что способствует лучшему питанию корневой системы растений и повышению урожайности; во-вторых, верхний слой почвы остается сухим, что не дает семенам сорных растений прорасти; в-третьих, сухой верхний слой снижает влажность приземного слоя воздуха, что является профилактикой грибных болезней лесных культур, а также позволяет сократить применение химических препаратов; в-четвертых, внутрпочвенное орошение дает возможность проводить необходимые виды работ на участке во время полива, так как верхний слой почвы не увлажнен [1, 4, 15].

Цель исследования – разработка технологии подкорневого полива саженцев лесных культур при посадке лесных полос на опустыненных территориях в условиях трудности доставки поливочной воды и создание оборудования для механизации работ по поливу саженцев с применением возобновляемых экологически безопасных источников энергии для подачи воды к корневым системам растений.

Объекты и методы исследования

Для обеспечения полива предлагается технологическая схема с минимизацией затрат на движение транспортных средств при доставке воды к местам ее закачки в проложенные на дне посадочных щелей перфорированные шланги. Также необходимо решить вопросы с затратами энергии на подачу воды в подземные коммуникации, определить оптимальное время ее подачи и сроки доставки в зависимости от расстояний до источников воды.

Для полива и подкормки саженцев лесных культур предложен прицепной резервуар с системой подачи воды или растворов удобрений в поливочные шланги за счет создания в нем давления воздуха посредством компрессора при использовании энергии от расположенных на резервуаре гелиобатарей. При этом технология полива исключает резервуары и дополнительное оборудование для импульсной подачи воды в систему, устанавливаемые на вышках.

Экспериментальные исследования были выполнены при использовании созданной автором машины с дискофрезерной навесной (МДН-3) на посадке лесных полос возле пос. Кирба Бейского района республики Хакасия [11]. Система подкорневого полива представлена стационарным резервуаром (емкость около 6 м³), расположенным на высоте около 5 м для достижения требуемого давления в системе. Так как подача воды при постоянном расходе приводит к ее поступлению к тем отверстиям, которые имеют меньшее гидравлическое сопротивление, а это, в свою очередь, вызывает недополив около 70 % растений и их усыхание, на резервуаре был смонтирован сбросный бак, заполняемый из резервуара и сбрасывающий поливную воду под давлением. Для заливки воды в бак использовался насос с приводом от двигателя базового автомобиля-водовоза [9]. Все это при высокой цене горючего создает ряд проблем, одним из путей их преодоления является использование солнечной энергии.

Результаты исследования и их обсуждение

Применяемые способы полива при уходах за лесными полосами можно оценить по затратам на доставку воды и ее количеству для получения устойчивого роста культур до достижения их корнями водоносных слоев почвы. При дефиците воды и возможности ее доставки только автотранспортом, зачастую на весьма удаленные расстояния, все рассмотренные способы полива, кроме капельного и подкорневого, экономически нецелесообразны.

Капельный полив требует прокладки большого количества тонких трубопроводов и установки регулирующей аппаратуры. Он реально применим на садовых и овощных культурах, выращиваемых, например, в Израиле.

Подкорневой полив предполагает прокладку магистральных и поливных трубопроводов, а также установку стационарных резервуаров, но при больших площадях количество резервуаров становится неоправданно велико [16]. Преимущество подкорневого полива перед другими способами заключается в значительной экономии воды за счет подачи ее непосредственно в корневую зону каждого растения. Например, на один саженец используется 1,25...1,75 л воды, что в 20–30 раз меньше, чем при прямом поливе [1, 4].

По предлагаемой технологии для полива и подкормки лесных культур предлагается использовать прицеп-резервуар (емкость 6 м³) модели 8638-0000012-01 к автомобилю (с цистерной и насосом) марки ЗиЛ-433362АЦ-5.0 (рис. 1).

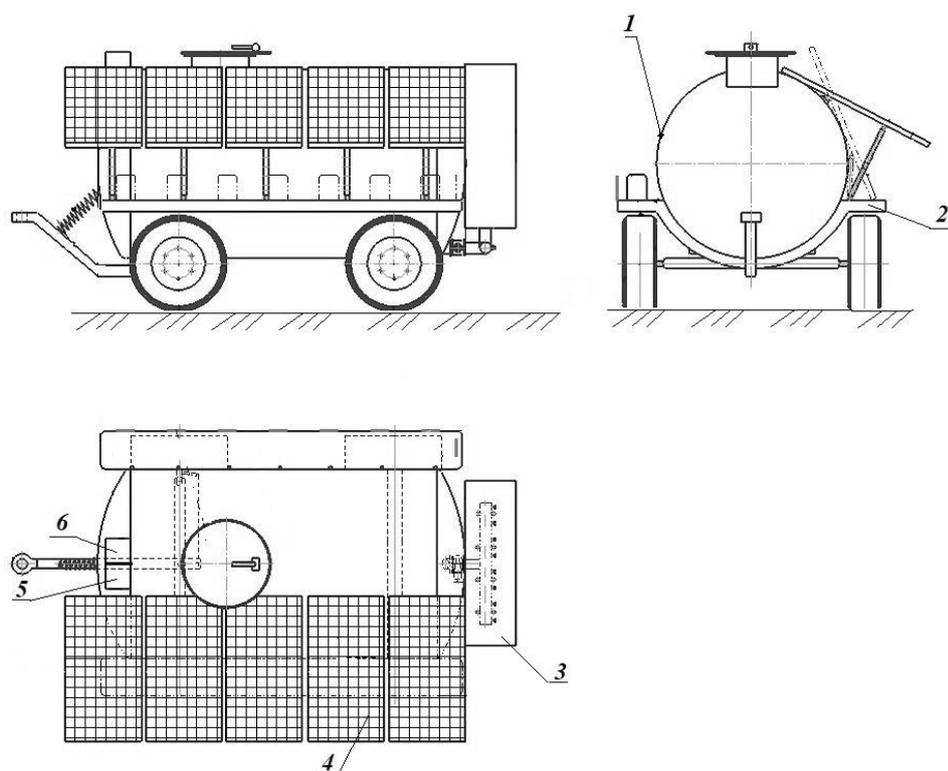


Рис. 1. Резервуар для подкорневого полива лесных культур: 1 – прицеп-резервуар; 2 – рама прицепа с ходовой частью; 3 – блок управления раздаточными кранами; 4 – гелиобатареи; 5 – аккумулятор; 6 – компрессор

Технические характеристики предлагаемого прицепа-резервуара 8638-000012-01 представлены ниже.

Объем.....	6 м ³
Количество раздаточных рукавов.....	12 шт.
Габаритные размеры с поднятыми батареями (длина×высота×ширина), не более.....	5700 × 2350 × 2650 мм
Время заполнения.....	10 мин
Рабочее давление.....	300 кПа
Мощность компрессора.....	600 Вт
Питание электромотора компрессора от аккумулятора.....	12 Вт, 60 А·ч
Зарядка аккумулятора 6СТ60 от гелиобатарей площадью.....	4 м ²
Тип гелиобатарей.....	ФЭ модуль MSW120/60-12
Количество гелиобатарей.....	5 шт.
Транспортная скорость, не более.....	70 км/ч
Масса конструктивная.....	1,5 т
Масса эксплуатационная.....	7,5 т
Обслуживающий персонал.....	1 чел.

Для решения поставленной задачи на базовый прицеп-резервуар устанавливается дополнительное оборудование: компрессор, 5 гелиомодулей, ресиверы и аккумуляторная батарея. Принцип работы предлагаемой конструкции поливочного резервуара состоит в следующем. Подача жидкости в поливочные шланги осуществляется путем создания в нем давления воздуха от компрессора, приводимого во вращение электромотором с питанием от аккумулятора, получающего энергию от расположенных на резервуаре гелиобатарей. В результате чего вода под давлением 300 кПа поступает в поливочные шланги и далее к корням посаженных культур.

Перевозка резервуара по участку и его заправка осуществляются автомашиной ЗиЛ-433362 или ее аналогом. Схема полива представлена на рис. 2.

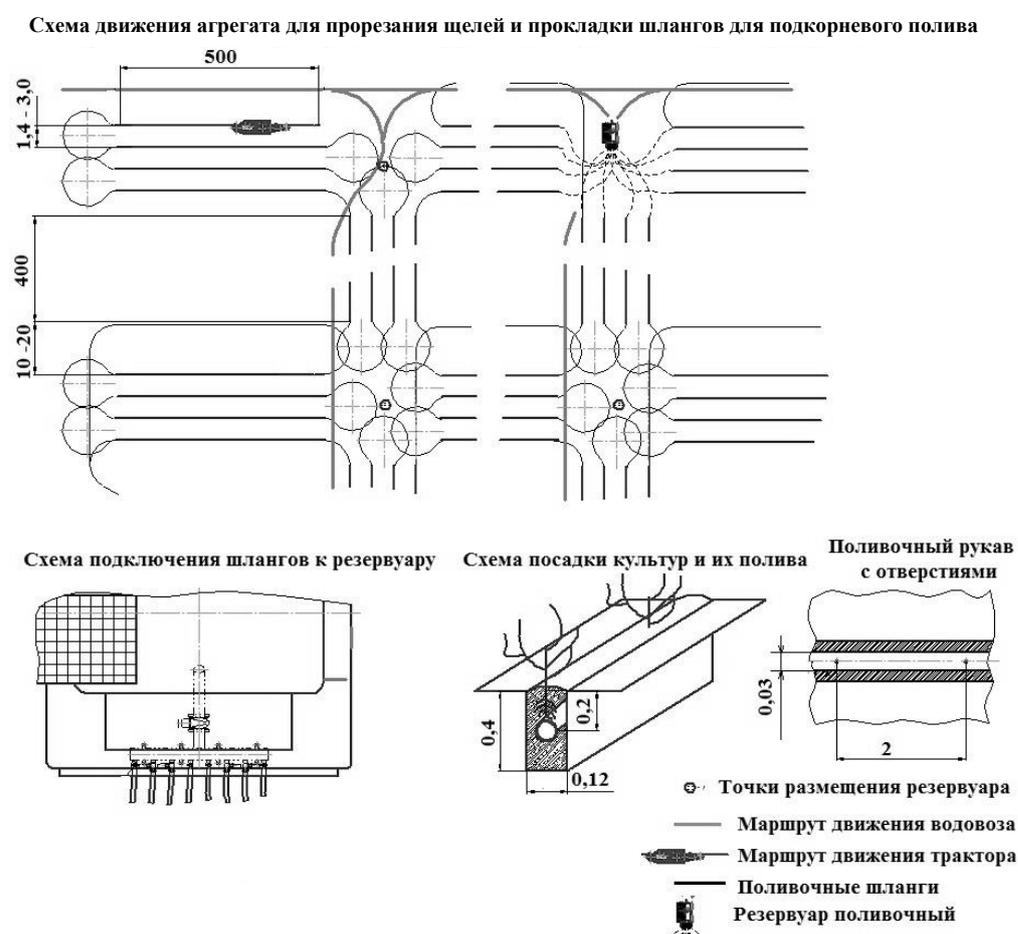


Рис. 2. Организация полива саженцев в лесных полосах (все размеры даны в метрах)

Сокращение расхода воды при поливе достигается за счет того, что увлажняется не поверхность почвы, а только корнеобитаемая зона, где испарение влаги минимально.

Перебазирование резервуара позволяет обеспечивать полив нескольких десятков участков посаженных лесных полос. При выполнении полива по-

требления электроэнергии от источников не происходит, отсутствуют вредные выбросы в атмосферу.

Расчет объема работ производится в следующем порядке [2].

Находится сменная производительность агрегата ($W_{см}$, м³):

$$W_{см} = \frac{(T_{см} - t_{пз}) Q_{пол}}{\frac{60l}{V_{гр}} + \frac{60l}{V_{пор}} + \Sigma t_{скл}}, \quad (1)$$

где $T_{см}$ – продолжительность смены, 480 мин;

$t_{пз}$ – подготовительно-заключительное время, $t_{пз} \approx 30$ мин;

$Q_{пол}$ – масса перевозимого груза (воды объемом 6 м³), т;

60 – переводной коэффициент времени;

l – расстояние доставки воды, принимается в среднем $l = 20$ км;

$V_{гр}$ – скорость движения водовоза в груженом состоянии, $V_{гр} = 30$ км/ч;

$V_{пор}$ – скорость движения водовоза в порожнем состоянии, $V_{пор} = 40$ км/ч;

$\Sigma t_{скл}$ – время простоев на погрузке и разгрузке, мин.

Продолжительность рейса – 80 мин, сменная производительность – 18 м³. Автомобиль-водовоз за смену заправляет 3 резервуара, которые поливают две полосы протяженностью 500 м и одну – 400 м при посадке культур в 4 линии (рис. 2).

Определяется расход воды (Q , дм³) при норме полива 1,75 дм³ на одно растение и шаге посадки 2 м:

$$Q = \frac{(L_{пр.п} n_{пр.п} + L_{п.п} n_{п.п}) N_{л}}{t_{пос} q_{раст}}, \quad (2)$$

где $L_{пр.п}$ – протяженность продольной полосы, м;

$n_{пр.п}$ – число продольных полос, поливаемых с одной установки, шт.;

$L_{п.п}$ – протяженность поперечной полосы, м;

$n_{п.п}$ – число поперечных полос, поливаемых с одной установки, шт.;

$N_{л}$ – число линий посадки культур в лесополосе, шт.;

$t_{пос}$ – шаг посадки саженцев лесных культур, м;

$q_{раст}$ – расход воды на одно растение при поливе, дм³.

Для израсходования воды из одного резервуара объемом 6 м³ при обслуживании 20 точек раздачи воды потребуется 7 дн. (продолжительность смены 8 ч.). Учитывая протяженность светового дня в летнее время, воду можно подвозить в две смены, полив будет производиться 1 раз в 3-4 дн., что соответствует агролесотехническим требованиям на выращивание лесных полос на опустыненных территориях. При двухсменной работе на площади 800 га сезонная загрузка водовоза составит 1740 ч.

Потери напора рассчитываются по [3], исходя из агротехнических требований по нормам полива (1,25...1,75 дм³ на одно растение) [4]. Принимается 1,25 дм³ за 10 мин.

При расстоянии между деревьями в полосе 2 м и количестве деревьев 250 шт. расход воды через один шланг – 521 см³/с. С учетом площади поперечного сечения поливочного шланга (7,06 см²) скорость движения воды – 0,737 м/с. Потери напора по всей длине поливочного шланга – 13,3 мм вод. ст., или примерно 100 кПа.

При площади отверстия в шланге $0,8 \text{ мм}^2$ расход воды через него составит $0,67 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Равенство расхода воды по длине шланга обеспечивается увеличением диаметров отверстий по мере удаления от резервуара.

Определяются затраты мощности (N , Вт) на подкачку воздуха в резервуар [10]:

$$N = \frac{LV_n}{136\eta}, \quad (3)$$

где L – работа, затрачиваемая компрессором на сжатие 1 м^3 воздуха, Дж/м³,

$$L = 10\,000 \frac{k}{k-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]; \quad (4)$$

k – показатель политропы сжатия воздуха в насосе, для адиабатического процесса $k = 1,41$;

p_1 и p_2 – давление всасывания и нагнетания, кПа;

V_n – производительность компрессора по атмосферному воздуху, м³/с;

η – коэффициент полезного действия насоса, $\eta = 0,7$.

Примем $p_1 = 100 \text{ кПа}$; $p_2 = 300$ и 800 кПа и подставим принятые значения в (4):

$$L_{300 \text{ кПа}} = 1\,294\,449 \text{ Дж/м}^3; L_{800 \text{ кПа}} = 2\,846\,353 \text{ Дж/м}^3.$$

Производительность компрессора (V_n , м³/с) по атмосферному воздуху

$$V_n = (\pi r^2 l_n) z n, \quad (5)$$

где r – радиус цилиндра компрессора, м;

l_n – ход поршня, м;

z – число цилиндров компрессора;

n – частота рабочего хода поршня, с⁻¹.

Примем $r = 0,03 \text{ м}$; $l_n = 0,1 \text{ м}$; $z = 2 \text{ шт.}$, $n = 20 \text{ с}^{-1}$; тогда $V_n = 0,011304 \text{ м}^3/\text{с}$. Мощность одной солнечной панели ФЭ модуля MSW120/60-12 при двухстороннем освещении составляет 180 Вт , 5 панелей обеспечивают мощность 900 Вт . Зарядное устройство ограничивает зарядный ток 6 А . За 10 ч аккумулятор 6СТ60 зарядится полностью. Работа по закачке воздуха в резервуар для создания давления 300 кПа занимает 22 мин . При этом мощности 900 Вт за вычетом мощности на зарядку аккумулятора (72 Вт) хватает на привод компрессора (600 Вт), закачивающего воздух в баллоны ресивера под давлением 800 кПа по пути следования за водой, заправки и проезда к месту полива. При недостатке солнечной энергии питание компрессора происходит от аккумуляторной батареи. Чистое время работы компрессора от аккумулятора без подзарядки – $2,14 \text{ ч}$. Солнечные батареи устанавливаются на резервуар с возможностью изменения угла наклона перпендикулярно солнечным лучам в горизонтальной плоскости [13].

В несолнечную погоду запасенная в аккумуляторе энергия покрывает потребности пользователя. Если пасмурная погода будет долгой, можно подключать компрессор к аккумулятору буксирующего автомобиля, подзаряжае-

тому в движении от его генератора. После израсходования воды автомобиль-водовоз перевозит резервуар на следующую позицию, заправляет его водой и уезжает заливать воду, за это время резервуар производит полив следующего участка.

Таким образом, по выражению (3) для давлений 800 и 300 кПа имеем затраты мощности соответственно 339 и 154 Вт. Следовательно, запас мощности достаточен для непрерывной работы даже при максимальном давлении (закачке воздуха в ресиверы).

Технология использования передвижного резервуара после прибытия на место полива:

установить резервуар так, чтобы солнечные батареи находились с солнечной стороны;

подложить под колеса стопорные башмаки;

установить угол наклона солнечной батареи перпендикулярно лучам солнца;

соединить рукавами поливочные шланги с выходными отверстиями резервуара;

создать давление в резервуаре от ресиверов, заряженных сжатым воздухом за время следования к месту полива;

после достижения давления открыть кран для доступа воды в поливочные шланги и начать полив;

при падении давления в резервуаре ниже 300 кПа полив прервать до достижения требуемого давления;

после слива воды переключить компрессор на закачку воздуха в ресивер, отсоединить рукава, сбросить давление воздуха в резервуаре, рукава уложить на транспортировочные полки и закрепить;

по прибытии автомобиля-водовоза перевезти резервуар на новую позицию;

после перевозки соединить резервуар шлангом с насосом автомобиля-водовоза, включить насос и заполнить резервуар водой;

отцепить автомобиль-водовоз и отправить его за водой, цикл полива повторить в том же порядке.

Экономические расчеты показывают, что применение предлагаемой технологии по сравнению с базовой (прокладка поливочных шлангов в щели, прорезанные траншейным экскаватором на тракторе МТЗ-82, установка стационарных баков для воды) обеспечит экономию текущих затрат на содержание и эксплуатацию оборудования в размере 806 тыс. р. и сокращение численности рабочих от 7 до 4 чел. Срок окупаемости оборудования – 1,6 года.

Заключение

Применение оборудования для подкорневого полива саженцев из мобильного прицепа-резервуара при создании полезащитных лесных полос улучшает приживаемость растений за счет непосредственной подачи удобрений к корням деревьев; исключает затраты энергии на выполнение процесса полива; обеспечивает одновременный полив 4 линий посадок в 3 стороны; позволяет производить полив на удаленных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодров В.А. Лесная мелиорация. М.; Л.: Гослесбумиздат. 1952. 270 с.
2. Герасимов М.И., Кухар И.В. Машины и оборудование природообустройства и защиты окружающей среды: метод. указания по курсовому проектированию. Красноярск: СГТУ, 1999. 48 с.
3. Долгачев Ф.М., Лейко В.С. Основы гидравлики и гидропривод. М.: Стройиздат, 1981. 183 с.
4. Каргов В.А. Лесные полосы и увлажнение полей. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 120 с.
5. Колесниченко М.В. Лесомелиорация с основами лесоводства. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1981. 335 с.
6. Костяков А.Н. Основы мелиораций. 6-е изд. М.: Сельхозгиз, 1960. 341 с.
7. Маштаков Д.А., Карпушкин А.В., Сысоев С.И. Взаимовлияние лесных полос и орошения в условиях темно-каштановых почв Заволжья и обыкновенных черноземов низкой Донской равнины // Оптимизация ландшафтов зональных и нарушенных земель. Воронеж, 2005. С. 30–34.
8. Мелехов И.С. Лесоводство. М.: Агропромиздат, 1989. 302 с.
9. Орловский С.Н. Оборудование для подкорневого полива саженцев лесных культур полезащитных полос // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф., 27–28 нояб. 2013 г. Красноярск: СибГГТУ, 2013. С. 206–209.
10. Орловский С.Н. Проектирование машин и оборудования для садово-паркового и ландшафтного строительства. Красноярск: СибГГТУ, 2004. 108 с.
11. Савостьянов В.К. Агроресомелиоративные мероприятия для сохранения плодородия почв юга Сибири и их рационального использования // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 4. С. 7–9.
12. Тимерьянов А.Ш., Хайретдинов А.Ф., Гафиятов Р.Х. Воспроизводство защитных лесных насаждений // Лесн. хоз-во. 2011. № 3. С. 28–29.
13. Усаковский В.М. Возобновляющиеся источники энергии. М: Россельхозиздат, 1986. 126 с.
14. Evans R.G. Irrigation Technologies Comparisons. Factors Affecting the Choice of an Irrigation System. Sidney, 2016. Pp. 34–50.
15. Hosseini S.M., Dohenbusch A., Skoupy A., Armoon R., Macku J. The Study of Deficit Irrigation for Forest Plantation in Semiarid Areas // Environment and Ecology Research. 2016. Vol. 4, no. 3. Pp. 119–127. DOI: 10.13189/eer.2016.040303
16. Shock C.C., Shock B.M., Welch T. Strategies for Efficient Irrigation Water Use // Sustainable Agriculture Techniques. 2013. EM 8783: 1–6.

Поступила 23.12.17

UDC 630*232.427

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.92

Technology of Deep Root Irrigation of Forest Seedlings in Shelterbelts

S.N. Orlovskiy, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Krasnoyarsk State Agrarian University, pr. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

For citation: Orlovskiy S.N. Technology of Deep Root Irrigation of Forest Seedlings in Shelterbelts. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 92–102. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.92

The existing technologies of planting and irrigation of forest seedlings in water deficiency zones of the Russian Federation do not ensure their sufficient establishment. As a rule, deep root irrigation of forest plantations is usually carried out by means of a hose connected with a tank with water or a water tank truck. The water consumption is 20...30 liters per plant; while up to 90 % of water ineffectively dissipates in the soil or evaporates. The goal of research is to substantiate an energy-saving technology of deep root irrigation of forest plant seedlings when creating shelterbelts in desertified areas in close conditions of irrigation water delivering with the use of renewable environmentally safe energy sources to feed it to root systems and developing equipment. The research method is the calculation of machine capacity for water delivery and deep root irrigation, hydraulic calculations of the irrigation system and equipment for its implementation. The research results are specific data on irrigation technology, shift and seasonal productivity of machines, their number, parameters of a water tank truck and its equipment for supplying water to hydraulic utilities and their sections, power costs for supplying water to root systems of seedlings and energy efficiency of irrigation system solar batteries supplying compressor with energy. On the basis of the results obtained, we can justify the technology of deep root irrigation of forest seedlings during the first five to six years of their growth when planting shelterbelts on desertified territories in water deficiency zones and arrangement of a water tank truck with water supply using solar energy. We can determine design and geometrical parameters of the irrigation system; calculate the power loss for the technological process, which will increase the labor productivity, reduce soil disturbance and costs for shelterbelt planting.

Keywords: deep root irrigation, seedling, shelterbelt, irrigation technology, solar battery, compressor, machine capacity.

REFERENCES

1. Bodrov V.A. *Lesnaya melioratsiya* [Forest Reclamation]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 270 p. (In Russ.)
2. Gerasimov M.I., Kukhar I.V. *Mashiny i oborudovanie prirodoobustroystva i zashchity okruzhayushchey sredy: metod. ukazaniya po kursovomu proektirovaniyu* [Machinery and Equipment for Environmental Management and Protection]. Krasnoyarsk, SibSEU Publ., 1999. 48 p. (In Russ.)
3. Dolgachev F.M., Leyko V.S. *Osnovy gidravliki i gidroprivod* [Fundamentals of Hydraulics and Hydraulic Drive]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 183 p. (In Russ.)
4. Kargov V.A. *Lesnye polosy i uvlazhnenie poley* [Forest Strips and Fields Moistening]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 120 p. (In Russ.)
5. Kolesnichenko M.V. *Lesomelioratsiya s osnovami lesovodstva* [Forest Improvement with the Basics of Forestry]. Moscow, Kolos Publ., 1981. 335 p. (In Russ.)
6. Kostyakov A.N. *Osnovy melioratsiy* [Fundamentals of Land Reclamation]. Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1960. 341 p. (In Russ.)
7. Mashtakov D.A., Karpushkin A.V., Sysoev S.I. Vzaimovliyanie lesnykh polos i orosheniya v usloviyakh temno-kashtanovykh pochv Zavolzh'ya i obyknovennykh chernozemov nizkoy Donskoy ravniny [Interaction of Forest Belts and Irrigation in Conditions of Dark Chestnut Soils of the Trans-Volga Region and Ordinary Chernozems of the Low Don Plain]. *Optimizatsiya landshaftov zonal'nykh i narushennykh zemel': materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Proc. All-Russ. Sci. Practical Conf. "Optimization of Landscapes of Zonal and Disturbed Lands"]. Voronezh, 2005, pp. 30–34. (In Russ.)
8. Melekhov I.S. *Lesovodstvo* [Forestry]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 302 p. (In Russ.)
9. Orlovskiy S.N. *Oborudovanie dlya podkorneвого полива sazhentsev lesnykh kul'tur polezashchitnykh polos* [Equipment for Deep Root Irrigation of Seedlings of Forest Cultures in Shelterbelts]. *Tekhnologii i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo*

stroitel'stva: sb. st. Vseros. nauch.-prakt. konf., 27–28 noyab. 2013 g. [Technologies and Equipment for Landscape Gardening and Landscape Construction: Proc. All-Russ. Sci. Practical Conf., 27–28 November 2013]. Krasnoyarsk, SibSEU Publ., 2013, pp. 206–209. (In Russ.)

10. Orlovskiy S.N. *Proektirovaniye mashin i oborudovaniya dlya sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva* [Designing of Machines and Equipment for Landscape Gardening and Landscape Construction]. Krasnoyarsk, SibSEU Publ., 2004. 108 p. (In Russ.)

11. Savost'yanov V.K. *Agrolesomeliorativnyye meropriyatiya dlya sokhraneniya plodorodiya pochv yuga Sibiri i ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Agroforestral Actions for Preservation of Fertility Soil the South of Average Siberia and Their Rational Use]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AIC], 2011, no. 4, pp. 7–8.

12. Timer'yanov A.Sh., Khayretdinov A.F., Gafiyatov R.Kh. *Vosproizvodstvo zashchitnykh lesnykh nasazhdeniy* [Reproduction of Protective Forest Stands]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2011, no. 3, pp. 28–29.

13. Usakovskiy V.M. *Vozobnovlyayushchiesya istochniki energii* [Renewable Energy Sources]. Moscow, Rossel'khozizdat Publ., 1986. 126 p. (In Russ.)

14. Evans R.G. *Irrigation Technologies Comparisons. Factors Affecting the Choice of an Irrigation System*. Sidney, 2016, pp. 34–50.

15. Hosseini S.M., Dohenbusch A., Skoupy A., Armoon R., Macku J. The Study of Deficit Irrigation for Forest Plantation in Semiarid Areas. *Environment and Ecology Research*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 119–127. doi: 10.13189/eer.2016.040303

16. Shock C.C., Shock B.M., Welch T. Strategies for Efficient Irrigation Water Use. *Sustainable Agriculture Techniques*, 2013, EM 8783: 1-6.

Received on December 23, 2017

УДК 621.81+674

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОЛЕБАНИЙ ГРУЗОВОЙ ПОДВЕСКИ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ АЭРОСТАТНО-КАНАТНОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.

П.Б. Рябухин, д-р техн. наук, проф.

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136,

г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, PRyabukhin@mail.khstu.ru

Одним из основных факторов, сдерживающих в Дальневосточном федеральном округе увеличение объемов лесозаготовок, проводимых в горной местности, является сложность технологического процесса первичной транспортировки древесины от точки заготовки до места складирования и погрузки. Около 30 % лесных площадей, на которых произрастает качественный и спелый древостой, находятся именно на склонах с крутизной свыше 20°, где традиционная техника либо не в состоянии вести заготовку древесины, либо выполняет ее с большими затратами и явными экологическими нарушениями. Опыт применения аэростатных систем транспортировки древесины доказал их технологическую и лесоводственную эффективность. Однако способ выборочного изъятия отдельно растущих деревьев требует дополнительного и разностороннего исследования, так как связан с конструктивными и технологическими особенностями аэростатных систем, в первую очередь с функционированием грузовой подвески и захватного механизма. Проведены практические и теоретические исследования процесса колебаний, возникающих в грузовой подвеске трехлинейной аэростатно-канатной системы, предназначенной для вертикального изъятия деревьев с их последующей транспортировкой. Разработана математическая модель, описывающая равновесие точки стыковки канатов аэростатно-канатной системы и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок. С помощью полученной зависимости можно определять параметры колебаний трех взаимосвязанных точек грузовой подвески системы в различных условиях эксплуатации и в любое время ее функционирования. Установление расчетных значений параметров колебательного процесса грузовой подвески и, соответственно, отклонений грузозахватного механизма от точки захвата дерева позволяет выполнять проектирование технических параметров грузо-захватных и лебедочных механизмов, предназначенных для процесса воздушной транспортировки (трелевки) древесины, с достаточно высокой степенью точности. На основании полученных результатов можно при выборочной заготовке леса более эффективно использовать технологические и конструктивные особенности аэро-статно-канатных систем.

Ключевые слова: воздушная трелевка, аэростатно-канатная система, колебание и натяжение грузового каната, моделирование процесса колебаний.

Для цитирования: Абузов А.В., Рябухин П.Б. Исследование процесса колебаний грузовой подвески лесотранспортной аэростатно-канатной системы // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 103–116. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

Введение

В настоящее время лесозаготовительные операции планомерно смещаются с наиболее доступных лесных территорий на лесосеки с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости, с наличием рек, озер и болот, как правило, окруженных горными склонами с резким перепадом высот. Поэтому характер технологических процессов, связанных с заготовкой древесины на крутых склонах, требует внедрения новых прогрессивных технологий, обеспечивающих не только минимальное экологическое воздействие, но и оперативный режим транспортировки древесины в зоне сильно пересеченного рельефа с наличием водных препятствий.

Анализ современных исследований в области лесопользования показал, что к технологическим системам лесозаготовительного процесса, способным без серьезных экологических последствий совмещать возможность выборочного изъятия деревьев и эффективную работу на крутых склонах с преодолением водных преград, могут относиться канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических конструкций [1, 2, 15].

В результате натурных испытаний (2002 г., Хабаровский край) конструкции аэростатно-канатной системы (АКС) МТА-500, предназначенной для воздушной трелевки древесины на труднодоступных лесных участках, установлено несколько ключевых эксплуатационных закономерностей, влияющих на эффективность функционирования системы. Это привело к необходимости проведения дополнительного объема практических и теоретических исследований, связанных с более детальным изучением процесса колебаний грузовой подвески аэростата [4].

Цель исследования – разработка математической модели для определения параметров колебательного процесса, возникающего в трех рабочих точках грузовой подвески АКС, с учетом их взаимного влияния друг на друга, что позволяет обеспечивать высокую степень точности наведения грузовой подвески на предмет труда.

Объекты и методы исследования

Как показали результаты натурных испытаний, напряжения удерживающих канатов, а следовательно, и их влияние на поведение в пространстве точки подвеса груза могут меняться в течение не только смены, но и одного рабочего цикла (например, в процессе движения аэростата вверх или вниз над склоном). Подобная ситуация приводит к тому, что грузовая подвеска АКС начинает совершать колебания одновременно в различных плоскостях, в связи с чем грузозахватный механизм (ГЗМ) отклоняется от точки местонахождения груза на значительное расстояние.

Из ранее проведенных исследований [3, 4, 6, 8] известно, что процесс колебаний подвески зависит от ряда факторов, которые могут изменяться как независимо, так и в полном взаимодействии и дополнении друг друга:

- подъемная сила аэростата F_a , Н;
- температура окружающей среды T , °С;
- высота подъема аэростата над уровнем моря H , м;
- рейсовая нагрузка аэростата Q_p , кг;
- скорость ветра v_b , м/с;

направление ветра (угол ветровой атаки) φ , ... °;
 направление движения аэростата ψ ;
 траектория перемещения аэростата;
 скорости перемещения аэростата при различных режимах (холостой–
 рабочий) $v_{\text{хол}}$, $v_{\text{раб}}$, м/с;
 скоростной напор q_0 , Н/м²;
 результирующая нагрузка R , Н;
 вертикальная нагрузка, действующая на аэростат, Q_y , Н;
 горизонтальная нагрузка, действующая на аэростат, Q_x (зависит от
 скоростного напора и воздушного потока), Н;
 скорость выбирания аэростата лебедкой $v_{\text{выб}}$, м/с;
 скорость опускания грузозахватного механизма $v_{\text{ог}}$, м/с;
 скорость подъема груза (дерева) $v_{\text{п.г.}}$, м/с;
 сила лобового сопротивления кроны дерева F_k , Н/м².

Особенность колебательных процессов, возникающих в грузовой подвеске АКС, заключается во взаимно-системном влиянии трех нагруженных точек A , F , L (точек приложения силы) друг на друга. Структурная схема исследуемой трелевочной системы АКС-5, учитывающая трехмерное расположение исследуемых точек, представлена на рис. 1.

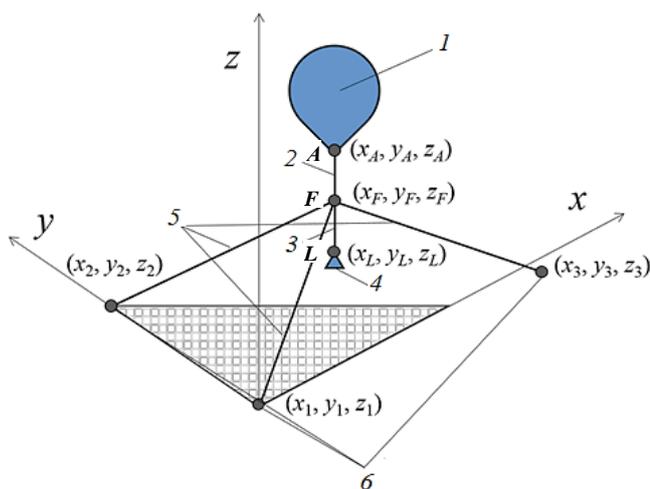


Рис. 1. Структурная схема аэростатно-канатной системы: 1 – аэростат; 2 – канат верхней подвески; 3 – канат грузовой подвески; 4 – грузозахватный механизм; 5 – тягово-возвратные канаты; 6 – направляющие концевые блоки для канатов

Установлено, что каждая отдельная точка может оказывать периодическое влияние на соседнюю точку не зависимо от третьей, что приводит к повторяющемуся изменению положения точек A , F , L относительно координат x , y , z . При этом все три точки за счет периодически изменяющихся параметров системы могут иметь несколько степеней свободы не только относительно друг друга, но и относительно вертикально стоящего дерева.

В процессе перемещения аэростата за счет сдавания и выбирания канатов, соединяющихся в т. F , данная точка будет являться ведущей. Тогда за

счет кинетической энергии и приложения внешней нагрузки (при лобовом сопротивлении аэростата) через гибкие нити FA и FL будет оказываться влияние на верхнюю и нижнюю точки системы (A и L), которые в данный момент являются ведомыми с наличием углов отклонения.

При состоянии неподвижности системы или ее технологической остановке (после перемещения и приложения внешней силы) роли точек в системе меняются. Точка A становится ведущей, а т. F – ведомой, что имеет принципиальное значение для точности наведения ГЗМ, который с учетом кинематики процесса ассоциируется с нижней т. L .

Отклонение аэростата от намеченной траектории при действии постоянного ветрового потока можно компенсировать сдаванием и выбором канатов наземных лебедок. Но на процесс выполнения управляющих воздействий на АКС могут оказывать негативное влияние возникающие кратковременные резкие порывы ветра (особенно вертикальные нисходящие). При этом происходит не только увеличение прогибов удерживающих канатов (и, соответственно, смещение т. F), но и возникают вибрационные процессы в системе, приводящие к колебаниям нижней части подвески FL с захватным механизмом.

Высокая степень сложности процесса колебаний, возникающего в подвеске АКС, потребовала разработки специального алгоритма, в котором должны быть отражены все частные случаи взаимодействия элементов АКС с внешними действующими факторами.

Результаты исследования и их обсуждение

Для конкретного исследуемого случая рассмотрим элементы каната в подвеске АКС как упруго-вязкие элементы с жесткостью k и коэффициентом демпфирования b . За счет этого можно одновременно учитывать как растяжение канатов, так и влияние на развитие колебаний системы возникающего явления диссипации энергии [11–13]. Для расчета коэффициента b , находящегося под действием вертикальной нагрузки, с учетом деформации в вертикальной плоскости от воздействия процесса растяжение–сжатие, предложена следующая зависимость:

$$b = 2\zeta m \omega_n, \quad (1)$$

где ζ – коэффициент, определяемый в соответствии с логарифмическим декрементом колебаний по пиковым значениям натяжения каната;

m – масса каната;

ω_n – собственная частота колебаний каната.

Для построения аппроксимирующей зависимости влияния ветровой нагрузки на аэростат (в виде функции второго порядка) было рассмотрено три угла ветровой атаки АКС:

0° – ветер обдувает аэростат сверху;

90° – ветер действует в плоскости, параллельной горизонту;

180° – ветер направлен снизу.

Соответственно, площадь наветренной части аэростата, влияющая на лобовое сопротивление и нагрузку в целом, также будет различной.

Тогда зависимость площади наветренной поверхности аэростата от угла ветровой атаки φ представим в виде линейной функции:

$$S_n(\varphi) = 2,4607\varphi + 508,87. \quad (2)$$

Для исследования поведения отдельного каната, нагруженного произвольной распределенной нагрузкой, используем уравнение, описывающее равновесие гибкой нити:

$$\frac{d^2 Z(X)}{dX^2} = \frac{q(X)}{H}, \quad (3)$$

где H – распор, кН.

При необходимости учета нагрузок (например, ветровой или любой другой внешней нагрузки, в том числе от веса снега либо капель дождя), носящих переменный характер по длине каната, воспользуемся следующими зависимостями:

$$q(X) = aX + b; \quad (4)$$

$$q(X) = a \exp(bX), \quad (5)$$

где a, b – числовые коэффициенты, значения которых зависят от интенсивности нагрузки.

С учетом погонной массы каната и ветровой нагрузки, зависящей от скорости ветра, имеем:

$$\bar{q}(X) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \rho C_d d_\tau X f_\varphi v^2(X) + \frac{pgX}{100};$$

$$v(X) = 0,0333X; \quad q(X) = \frac{d\bar{q}(X)}{dX}, \quad (6)$$

где C_d – коэффициент лобового сопротивления аэростата, для аэростатов луковичного типа $C_d = 0,5$;

d_τ – диаметр троса (каната), мм;

f_φ и v – коэффициент учета угла атаки ветра и его скорость, м/с.

После ряда дополнительных преобразований получим трансцендентное уравнение, задающее длину каната в деформированном состоянии в зависимости от величины распора и внешней нагрузки:

$$\left\{ \begin{aligned} L &= \frac{(-b^4 H^2 l^2 - a^2 e^{2bl} + 2a^2 e^{bl}) \ln A_4 - \{a(e^{bl} - 1) \ln A_5 + Hb^2 l(A_2 - A_3)\} b^2 l A_1 H}{b^5 H^2 A_1 l^2}; \\ L &= \frac{H}{kb} \left(f_1 - f_2 - \operatorname{arctanh} \frac{1}{f_1} + \operatorname{arctanh} \frac{1}{f_2} \right) + l; \\ A_1 &= \frac{\sqrt{b^4 H^2 l^2 + e^{2bl} a^2 - 2e^{bl} a^2 + a^2}}{b^2 H l}; \\ A_2 &= \frac{\sqrt{e^{2bl} a^2 - 2e^{bl} a^2 (bl + 1) + a^2 (bl + 1)^2 + b^4 H^2 l^2}}{b^2 H l}; \\ A_3 &= \frac{\sqrt{e^{2bl} a^2 (bl - 1)^2 - 2e^{bl} a^2 (bl - 1) + a^2 + b^4 H^2 l^2}}{b^2 H l}; \\ A_4 &= \frac{-a^2 (bl - 1) e^{2bl} + a^2 (bl - 2) e^{bl} + a^2 + b^4 H^2 l^2 (A_1 A_3 + 1)}{\{a^2 e^{2bl} - a^2 (bl + 2) e^{bl} + a^2 (bl + 1) + b^4 H^2 l^2 (A_1 A_2 + 1)\} e^{bl}}; \\ A_5 &= \frac{a(bl - 1) e^{bl} + A_3 b^2 l H + a}{A_2 b^2 l H + a bl - a e^{bl} + a}; \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$f_1 = \sqrt{1 + \{a \exp(bl)/H\}^2};$$

$$f_2 = \sqrt{1 + \{a/H\}^2}. \quad (7)$$

При составлении математической модели для исследования колебательных процессов в АКС необходимо учитывать, что нагрузка на элементы системы (аэростат, грузозахватный механизм, тягово-возвратные канаты, канаты подвески) может быть различной как по величине, так и по направлению.

Реакции V_A , V_B определим из условия равновесия гибкой нити [9, 10] (рис. 2).

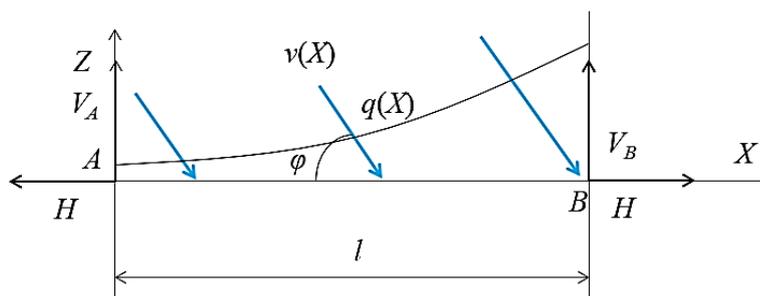


Рис. 2. Расчетная схема гибкой нити

Тогда:

$$V_B = \frac{1}{l} \int_0^l X q(X) dX = \frac{a(e^{bl} bl - e^{bl} + 1)}{b^2 l}; \quad (8)$$

$$V_A = \int_0^l q(X) dX - \frac{1}{l} \int_0^l X q(X) dX = \frac{a}{b}(e^{bl} - 1) - \frac{a}{b^2 l}(e^{bl} bl - e^{bl} + 1). \quad (9)$$

Рассчитаем проекции силы H на оси z , x , y :

$$H_{iz} = H_i \sin \gamma_{iz}; \quad (10)$$

$$H_{ix} = H_i \cos \gamma_{iz} \cos \gamma_{ix}; \quad (11)$$

$$H_{iy} = H_i \cos \gamma_{iz} \sin \gamma_{ix}. \quad (12)$$

Угол γ в уравнениях зависит от положения точки соединения канатов АКС и является переменной величиной, зависящей от прикладываемой нагрузки.

Дополнительно определим усилия, возникающие в канатах за счет смещения точки их соединения в случае деформирования канатов под действием подъемной силы аэростата либо за счет внешнего усилия, действующего на аэростат и передающегося через верхнюю подвеску.

Определим проекции длины канатов на их собственные направления в недеформированном состоянии:

$$l_{1F} = \sqrt{(x_F - x_1)^2 + (y_F - y_1)^2 + (z_F - z_1)^2}; \quad (13)$$

$$l_{2F} = \sqrt{(x_F - x_2)^2 + (y_F - y_2)^2 + (z_F - z_2)^2}; \quad (14)$$

$$l_{3F} = \sqrt{(x_F - x_3)^2 + (y_F - y_3)^2 + (z_F - z_3)^2}, \quad (15)$$

где x_F, y_F, z_F – координаты точки соединения тягово-возвратных канатов в неподвижной системе координат (переменные величины, подлежащие определению);

x_i, y_i, z_i – координаты точек соединения канатов с контурными шкивами у поверхности земли.

В связи с тем, что усилия растяжения пропорциональны удлинениям, запишем:

$$N_1 = \frac{l_{1F} - l_{10}}{l_{10}} k_1; \quad (16)$$

$$N_2 = \frac{l_{2F} - l_{20}}{l_{20}} k_2; \quad (17)$$

$$N_3 = \frac{l_{3F} - l_{30}}{l_{30}} k_3, \quad (18)$$

где l_{i0} – длина канатов в недеформированном состоянии;

k_i – жесткость канатов.

Смоделируем процесс колебаний грузовой подвески аэростата. Введем дополнительные обозначения:

$$F_x = V_{1Bx} + V_{2Bx} + V_{3Bx} + H_{1Bx} + H_{2Bx} + H_{3Bx} + S_x; \quad (19)$$

$$F_y = V_{1By} + V_{2By} + V_{3By} + H_{1By} + H_{2By} + H_{3By} + S_y; \quad (20)$$

$$F_z = V_{1Bz} + V_{2Bz} + V_{3Bz} + H_{1Bz} + H_{2Bz} + H_{3Bz} + S_z. \quad (21)$$

Здесь S_x, S_y, S_z – компоненты дополнительных внешних нагрузок (подъемная сила аэростата F_a ; ветровое воздействие на аэростат, передаваемое верхней подвеской, F_v ; вес перемещаемого груза и вес грузоподъемного устройства; сопротивление среды при перемещении аэростата и т. д.) задаются в качестве исходных данных по осям x, y, z неподвижной системы координат x_{uz} .

Таким образом, все внешние нагрузки на АКС приводятся к ортогональным проекциям на оси неподвижной системы координат x_{uz} , приложенным к точке стыковки тросов.

Систему уравнений, описывающих равновесие точки стыковки канатов аэростата, равно как и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок, представим в виде уравнений равновесия:

$$\begin{cases} \cos \gamma_{1x} N_1 \text{He}(N_1) + \cos \gamma_{2x} N_2 \text{He}(N_2) + \cos \gamma_{3x} N_3 \text{He}(N_3) = F_x; \\ \cos \gamma_{1y} N_1 \text{He}(N_1) + \cos \gamma_{2y} N_2 \text{He}(N_2) + \cos \gamma_{3y} N_3 \text{He}(N_3) = F_y; \\ \cos \gamma_{1z} N_1 \text{He}(N_1) + \cos \gamma_{2z} N_2 \text{He}(N_2) + \cos \gamma_{3z} N_3 \text{He}(N_3) = F_z. \end{cases} \quad (22)$$

В систему (22) введены единичные функции Хевисайда ($\text{He}(\xi) = 0$ при $\xi < 0$; $\text{He}(\xi) = 1$ при $\xi \geq 0$), таким образом можно предположить, что канаты не сопротивляются осевому сжатию.

С помощью системы уравнений (22) можно получить решение и обратной задачи по определению значений напряжений N_1, N_2, N_3 при варьировании перемещений точек x_F, y_F, z_F с учетом действующих внешних факторов, задающихся в виде исходных данных.

Полученные по результатам решения системы математические модели для определения ортогональных перемещений точки соединения канатов в зависимости от направлений и интенсивностей воздействия могут быть использованы при расчете колебаний грузовой подвески АКС.

Схема для расчета колебаний представлена на рис. 3.

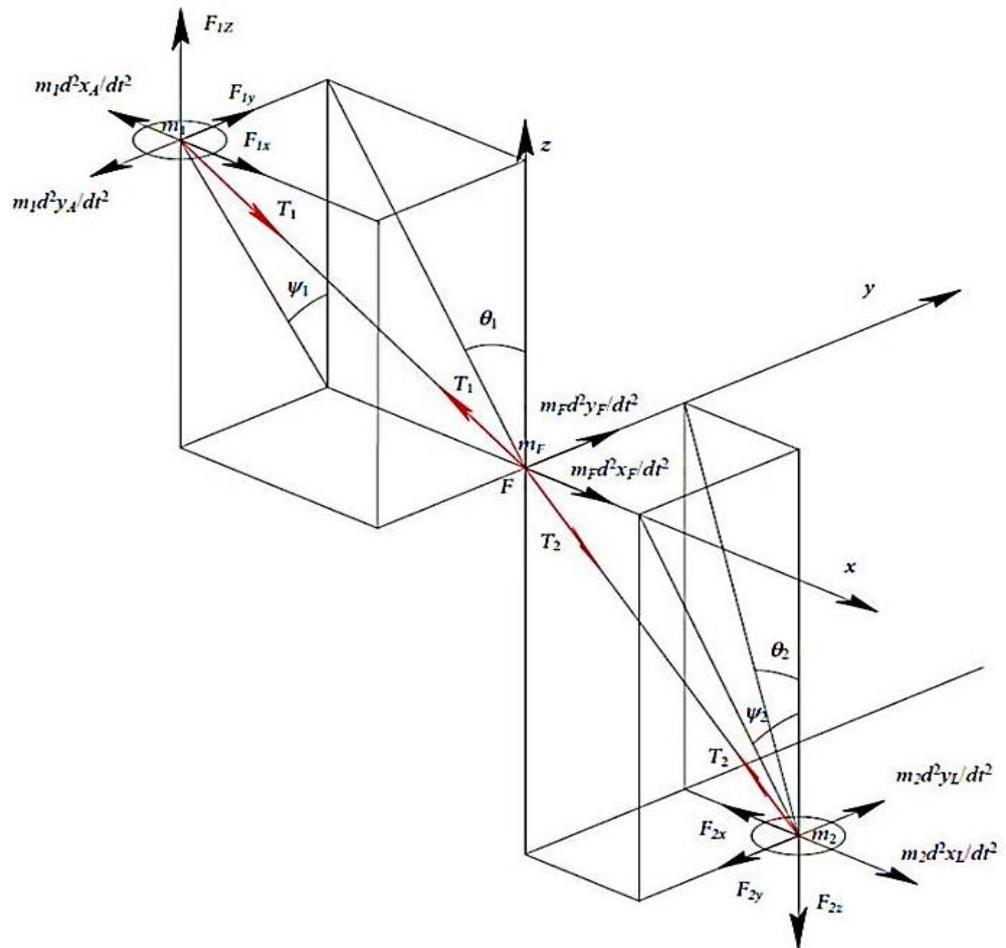


Рис. 3. Рабочая схема для расчета колебаний грузовой подвески АКС

Для расчета параметров колебаний грузовой подвески АКС составлена и решена система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$m_1 \frac{d^2 x_A}{dt^2} + n_1 \frac{dx_A}{dt} + T_1 \sin \theta_1 = F_{1x};$$

$$m_F \frac{d^2 x_F}{dt^2} + n_F \frac{dx_F}{dt} + k_x x_F - T_1 \sin \theta_1 - T_2 \sin \theta_2 = F_x;$$

$$\begin{aligned}
m_2 \frac{d^2 x_L}{dt^2} + n_2 \frac{dx_L}{dt} + T_2 \sin \theta_2 &= F_{2x}; \\
m_1 \frac{d^2 y_A}{dt^2} + n_1 \frac{dy_A}{dt} + T_1 \sin \psi_1 &= F_{1y}; \\
m_F \frac{d^2 y_F}{dt^2} + n_F \frac{dy_F}{dt} + k_y y_F - T_1 \sin \psi_1 - T_2 \sin \psi_2 &= F_y; \\
m_2 \frac{d^2 y_L}{dt^2} + n_2 \frac{dy_L}{dt} + T_2 \sin \psi_2 &= F_{2y}; \\
T_1 = \frac{F_{1z}}{\cos \theta_1} = \frac{F_{1z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}}; \quad T_2 = \frac{F_{2z}}{\cos \theta_2} = \frac{F_{2z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}}; \\
\sin \theta_1 = \frac{x_A - x_F}{l_1}; \quad \sin \theta_2 = \frac{x_L - x_F}{l_2}; \\
\sin \psi_1 = \frac{y_A - y_F}{l_1}; \quad \sin \psi_2 = \frac{y_L - y_F}{l_2}.
\end{aligned} \tag{23}$$

Здесь m_1 – масса аэростата;
 m_2 – масса грузозахватного механизма;
 m_F – масса бортовой лебедки, размещенной в точке подвеса (при отсутствии бортовой лебедки m_F принимается равной нулю);
 n_1, n_2 – коэффициенты демпфирования канатов верхней и нижней подвесок соответственно;
 n_F – коэффициент демпфирования тягово-возвратных канатов;
 l_1 – длина верхней подвески;
 l_2 – длина нижней подвески;
 F_{1x}, F_{1y}, F_{1z} – внешние нагрузки на аэростат (исходные данные);
 F_{2x}, F_{2y}, F_{2z} – внешние нагрузки на грузозахватный механизм (исходные данные);
 T_1, T_2 – натяжения каната (внутренние усилия) в верхней и нижней подвесках соответственно;
 $\psi_1, \psi_2, \theta_1, \theta_2$ – углы, характеризующие отклонения аэростата и грузозахватного механизма от положения точки подвеса.

Пример решения системы уравнений (23) был реализован в программном комплексе Maple [7, 14] и представлен в виде графиков (рис. 4), отражающих процесс изменения амплитуды колебаний грузовой подвески АКС при заданных условиях эксплуатации: масса ГЗМ – 500 кг; длина верхней подвески – 1 м; длина нижней подвески – 150 м; высота нахождения аэростата – 200 м; ветер восходящий порывистый по оси x , угол направления ветра – 30° к траектории движения аэростата; время действия порыва – 20 с; скорость ветра на уровне аэростата – 10 м/с, на уровне ГЗМ – 6 м/с; уклон обрабатываемой лесной площадки – 30° .

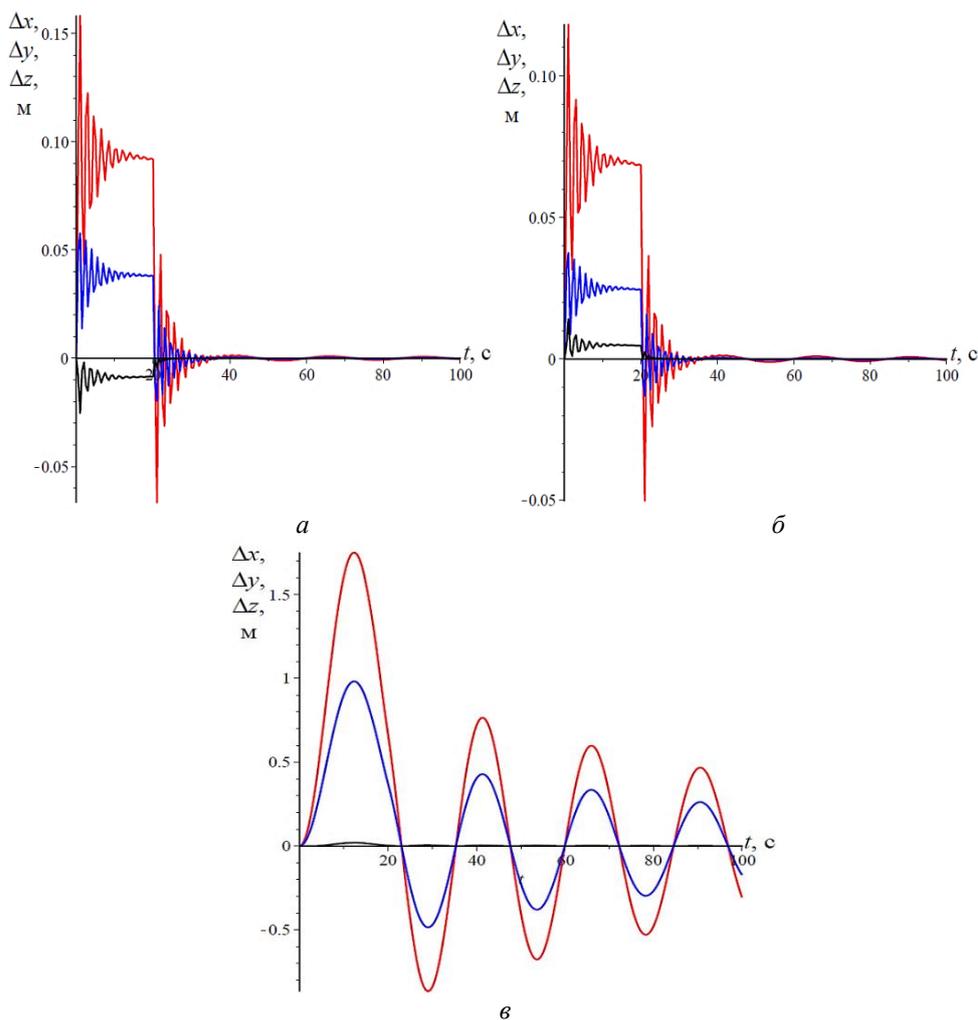


Рис. 4. Амплитуда колебаний системы при воздействии ветра в момент остановки над точкой загрузки: *а* – колебания аэростата; *б* – колебания точки стыковки канатов; *в* – колебания ГЗМ (черный цвет – колебания по оси *z*; синий – по оси *y*; красный – по оси *x*)

Выводы

1. Разработанная методика определения параметров колебаний трех взаимосвязанных точек грузовой подвески АКС позволяет описывать равновесие точки стыковки канатов АКС и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок в различных условиях эксплуатации и в любое заданное время.

2. Уменьшение длины верхней части грузовой подвески не приводит к снижению амплитуды колебаний ее нижней составляющей с ГЗМ, при этом повышается их частота в точке крепления аэростата и подвеса (точка стыковки тягово-возвратных канатов).

3. Оптимальная длина нижней подвески для транспортной системы АКС-5 в пределах 100...150 м повышает устойчивость системы, снижает ам-

плитуду колебаний, но приводит к росту усилий в тягово-возвратных канатах системы, не достигая при этом их критических значений.

4. Уменьшение амплитуды и продолжительности колебаний в пределах 25...40 % происходит при использовании подвижной нижней подвески, на которой спуск и подъем ГЗМ осуществляются бортовой лебедкой, находящейся под оболочкой аэростата, что позволяет обеспечивать более точное и оперативное наведение (по сравнению с ГЗМ со свободной нижней подвеской, управляемой наземными лебедками и тягово-возвратными канатами).

5. Максимальная амплитуда колебаний свободной нижней подвески с ГЗМ массой 500 кг при критических условиях эксплуатации (порывы ветра от 14 до 18 м/с) находится в диапазоне от 1 до 6 м в течение 50...70 с; при благоприятных условиях (порывы ветра от 3 до 5 м/с) амплитуда колебаний находится в диапазоне от 0,3 до 1,2 м в течение 20...30 с.

6. При вертикальном изъятии дерева с использованием свободной нижней подвески длиной 100...150 м и скорости ветра не более 10 м/с максимальный диапазон отклонений ГЗМ составляет 1,2...1,8 м; при использовании подвижной нижней подвески с бортовой лебедкой, имеющей скорость опускания ГЗМ 1 м/с, максимальный диапазон отклонений (при тех же условиях эксплуатации) составляет 0,2...0,8 м.

7. Амплитуду и время колебаний ГЗМ можно снизить на 15...20 % за счет увеличения скорости опускания ГЗМ с помощью бортовой лебедки до 2 м/с, что повысит эффективность работы срезающего механизма в процессе удаления ветвей и сучьев со стоящего дерева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абузов А.В.* Агроэкология: формирование лесозаготовительных операций с учетом экологических требований // Инж. экология. № 1(103). 2012. С. 24–30.
2. *Абузов А.В.* Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2013. № 1(93). С. 5–9.
3. *Абузов А.В.* Математическое моделирование основных параметров аэростатно-канатной системы для трелевки древесины АКС-5 // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2(22). С. 136–140.
4. *Абузов А.В.* Методика определения усилий, возникающих в канатах трехлинейной аэростатно-канатной транспортной системы // Лесотехн. журн. 2014. Т. 4, № 3(15). С. 140–153.
5. *Абузов А.В., Бернотас Р.В.* Особенности лесозаготовительного процесса при вертикальном изъятии и транспортировке деревьев воздушным способом // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. междунар. экол. семинара, Хабаровск, 6–8 мая 2015 г. / под ред. П.Б. Рябухина. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. С. 67–70.
6. *Абузов А.В., Рябухин П.Б.* Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока: моногр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 199 с.
7. *Голоскоков Д.П.* Уравнения математической физики. Решение задач в системе Maple. СПб.: Питер, 2004. 539 с.
8. *Козловский В.Б., Паршенцев С.А., Ефимов В.В.* Вертолет с грузом на внешней подвеске / под ред. В.Б. Козловского. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2008. 304 с.

9. *Светлицкий В.А.* Механика абсолютно гибких стержней. М.: Изд-во МАИ, 2001. 432 с.
10. *Смирнов В.А.* Висячие мосты больших пролетов. М.: Высш. шк., 1970. 408 с.
11. *Aglietti G.S.* Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System // Journal of Aircraft. 2009. Vol. 46, no. 6. Pp. 2032–2041.
12. *Lambert C.* Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System. Monreal, Canada, 2006. 184 p. Available at: http://digitool.Library.McGill.CA:80/R/-?func=dbin-jump-full&object_id=1029_94&silos_library=GEN01 (дата обращения: 10.04.18).
13. *Lambert C., Nahon M.* An Aerostat Positioning System with Cable Control // Proc. 17th World Congress of the Intern. Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6–11, 2008. Seoul, Korea, 2008. 6 p.
14. *Monagan M.B., Geddes K.O., Heal K.M., Labahn G., Vorkoetter S.M., McCarron J., DeMarco P.* Maple Introductory Programming Guide. Canada: Maplesoft, 2007. 387 p.
15. *Wiley J.A.* Systems and Methods for Aerial Cabled Transportation. Patent US8205835B2. 2012.

Поступила 12.03.18

UDC 621.81+674

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

Investigation of Cargo Suspension Oscillations of the Timber-Hauling Aerial Logging System

A.V. Abuzov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

P.B. Ryabukhin, Doctor of Engineering Sciences, Professor

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, PRyabukhin@mail.khstu.ru

One of the main factors constraining the increase in logging volumes in the Far Eastern Federal District in the steep terrain is the complexity of the technological process for primary wood transportation from the point of harvesting to the place of storage and loading. About 30 % of forest areas with a high quality and mature forest stand are located on slopes with the ratio over 20°, where traditional technology is either unable to harvest timber, or performs it with high costs and with clear ecological disturbance. The experience of the use of balloon systems of timber transportation has proved their technological and silvicultural efficiency. However, the method of selective removal of separately growing trees requires additional and comprehensive research, since it is associated with the structural and technological features of balloon systems, primarily with the functioning of a cargo suspension with a gripping mechanism. The paper presents the results of practical and theoretical studies of the oscillation process occurring in the cargo suspension of a trilinear aerial skidding system designed for vertical harvesting of trees with their subsequent transportation. A mathematical model describing the equilibrium of the point of joining of the aerial skidding system and its movement under arbitrary loads is developed. The dependence obtained allows determining the vibration parameters of three interconnected points of the system cargo suspension under various operating conditions and at any given

For citation: Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Investigation of Cargo Suspension Oscillations of the Timber-Hauling Aerial Logging System. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 103–116. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

time. The calculated values of parameters of the oscillating process of the cargo suspension and the deviations of the load gripping mechanism from the point of tree getting, allow undertaking the design of technical parameters of load gripping and winch mechanisms intended for the air transportation of timber very accurately. On the basis of the obtained results, technological and constructive features of aerial skidding systems can be used in selective logging more efficiently.

Keywords: aerial logging, aerial skidding system, hauling cable oscillation and tension, oscillation process simulation.

REFERENCES

1. Abuzov A.V. Agroekologiya: formirovanie lesozagotovitel'nykh operatsiy s uchetom ekologicheskikh trebovaniy [Agroecology: the Formation of Ecologically Based Timber-Harvesting Operations]. *Inzhenernaya ekologiya* [Engineering Ecology], 2012, no. 1(103), pp. 24–30.
2. Abuzov A.V. Tekhnicheskie i konstruktivnye osobennosti sovremennoy aerostatno-kanatnoy sistemy dlya trelevki drevesiny [Technical and Design Features of the Modern Aero Stately Rope System of Delivery of Wood]. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 1(93), pp. 5–9.
3. Abuzov A.V. Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh parametrov aerostatno-kanatnoy sistemy dlya trelevki drevesiny AKS-5 [Mathematical Modelling of the Key Parameters of Aerial Skidding System AKS-5]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 2(22), pp. 136–140.
4. Abuzov A.V. Metodika opredeleniya usilii, vznikayushchikh v kanatakh trekhlineynoy aerostatno-kanatnoy transportnoy sistemy [Method of Determining the Forces Arising in the Ropes of Trilinear Balloon-Cable Transport System]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 3(15), pp. 140–153.
5. Abuzov A.V., Bernotas R.V. Osobennosti lesozagotovitel'nogo protsessa pri vertikal'nom iz'yatii i transportirovke dere'vev vozdushnym sposobom [Features of the Logging Process with Vertical Extraction and Transportation of Trees by Air]. *Filosofiya sovremennoy prirodoopol'zovaniya v bassejne reki Amur: sb. dokl. mezhdunar. ekol. seminara, Khabarovsk, 6–8 maya 2015 g.* [Philosophy of Modern Nature Management in the Amur River Basin: Proc. Intern. Ecological Workshop, Khabarovsk, May 6–8, 2015]. Ed. by P.B. Ryabukhin. Khabarovsk, PNU Publ., 2015, pp. 67–70. (In Russ.)
6. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Aerostatnyy transport dlya gornykh lesozagotovok v usloviyakh Dal'nego Vostoka: monogr.* [Aerostat Transport for Mountain Logging in the Far East]. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p. (In Russ.)
7. Goloskokov D.P. *Uravneniya matematicheskoy fiziki. Reshenie zadach v sisteme Maple* [Equations of Mathematical Physics. Problem-Solving in the Maple System]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004. 539 p. (In Russ.)
8. Kozlovskiy V.B., Parshentsev S.A., Efimov V.V. *Vertolet s gruzom na vneshney podveske* [Helicopter with a Load on the External Suspension]. Ed. by V.B. Kozlovskiy. Moscow, Mashinostroenie / Mashinostroenie-Polet Publ., 2008. 304 p. (In Russ.)
9. Svetlitskiy V.A. *Mekhanika absolyutno gibkikh sterzhney* [Mechanics of Absolutely Slender Columns]. Moscow, MAI Publ., 2001. 432 p. (In Russ.)
10. Smirnov V.A. *Visyachie mosty bol'shikh proletov* [Cable Bridges of Large Spans]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 408 p. (In Russ.)
11. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2041.
12. Lambert C. *Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System*. Montreal, Canada, 2006. 184 p. Available at: http://digitool.Library.McGill.CA: 80/R/?func=dbin-jump-full&object_id=1029_94&silos_library=GEN01 (accessed 10.04.2018).

13. Lambert C., Nahon M. An Aerostat Positioning System with Cable Control. *Proc. 17th World Congress of the Intern. Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6–11, 2008.* Seoul, Korea, 2008. 6 p.

14. Monagan M.B., Geddes K.O., Heal K.M., Labahn G., Vorkoetter S.M., McCarron J., DeMarco P. *Maple Introductory Programming Guide.* Canada, Maplesoft, 2007. 387 p.

15. Wiley J.A. *Systems and Methods for Aerial Cabled Transportation.* Patent US8205835B2, 2012.

Received on March 12, 2018



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.09

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.117

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ВЫХОДА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСПИЛОВКЕ БРУСА ПАРАЛЛЕЛЬНО ОБРАЗУЮЩЕЙ

Е.В. Микрюкова, канд. техн. наук, доц.

А.С. Торопов, д-р техн. наук, проф.

В.М. Пекменов, магистрант

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000;

e-mail: mikryukovaev@volgatech.net

Предлагается способ раскроя пиловочных бревен при распиловке бруса параллельно образующей. После выпиливания двухкантного бруса его делят вдоль на две части и каждый из полученных трехкантных брусьев распиливают на пиломатериалы параллельно образующей. Возможны два варианта распиловки: с получением укороченных пиломатериалов из сердцевинных частей бруса; с получением клиновидных пиломатериалов. При этом увеличивается не только объемный, но и качественный выход пиломатериалов. С помощью имитационной модели для сравнения проведены экспериментальные исследования объемного выхода пиломатериалов при распиловке бруса параллельно образующей и параллельно продольной оси бревна. Получены зависимости объемного выхода пиломатериалов от диаметра, длины и среднего сбега бревна. Диапазоны варьирования: диаметры – от 28 до 36 см, длина – от 4 до 6 м, средний сбег – от 1,0 до 2,8 см/м. Построены графики зависимости объемного выхода пиломатериалов от исследуемых факторов. Установлено, что наибольшее влияние на объемный выход пиломатериалов оказывает сбег бревна. Диаметр не оказывает сильного влияния на объемный выход пиломатериалов при распиловке бруса параллельно образующей по сравнению с распиловкой параллельно оси бревна, при значениях диаметра более 32 см выход увеличивается незначительно. При распиловке бруса параллельно образующей объемный выход пиломатериалов выше на 2...6 %, чем при распиловке параллельно оси. Увеличение длины бревна снижает объемный выход пиломатериалов при распиловке бруса параллельно как образующей, так и продольной оси. Низкие значения среднего сбега пиловочного бревна (1,0...1,3 см/м) не дают преимуществ ни тому, ни другому способу распиловки. С увеличением среднего сбега до 2,8 см/м при распиловке бруса параллельно образующей объемный выход возрастает на 4...6 %. Распиловка бруса параллельно образующей с получением клиновидных пиломатериалов по сравнению с получением укороченных пиломатериалов из сердцевинных частей бруса повышает объемный выход на 1,0...1,5 %.

Для цитирования: Микрюкова Е.В., Торопов А.С., Пекменов В.М. Исследование объемного выхода пиломатериалов при распиловке бруса параллельно образующей // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 117–126. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.117

Ключевые слова: пиловочное бревно, брус, пиломатериалы, способ раскря параллельно образующей, способ раскря параллельно продольной оси, объемный выход пиломатериалов.

Введение

Древесина как конструкционный материал не утратила своей популярности и до сегодняшних дней. Из нее строят дома, изготавливают мебель, предметы интерьера. Древесные ресурсы относятся к возобновляемым, но их запасы неуклонно сокращаются. Наша задача заключается в том, чтобы как можно более рационально использовать древесину на всех этапах ее обработки.

Производство пиломатериалов является начальной стадией деревопереработки. Очень важно уже на этом этапе получать как можно больший объем пиломатериалов при сохранении их качества. От рационального раскря пиловочных бревен зависит эффективность использования древесины в дальнейшем.

В настоящее время наиболее распространенными способами раскря на лесопильных предприятиях остаются развальный и брусово-развальный способы распиловки параллельно продольной оси бревна. Предшествующими исследованиями установлено, что распиловка параллельно образующей (или по сбегу) дает более высокие и качественные, и количественные показатели выхода пиломатериалов [6–10].

На основе брусово-развального способа раскря пиловочных бревен нами предлагается способ раскря [3] с получением двухкантного бруса, делением его на две части и выпиливанием обрезных пиломатериалов из каждой части бруса параллельно образующей (рис. 1), который производится по двум вариантам:

- получение укороченных пиломатериалов;
- получение пиломатериалов переменной толщины (клиновидных).

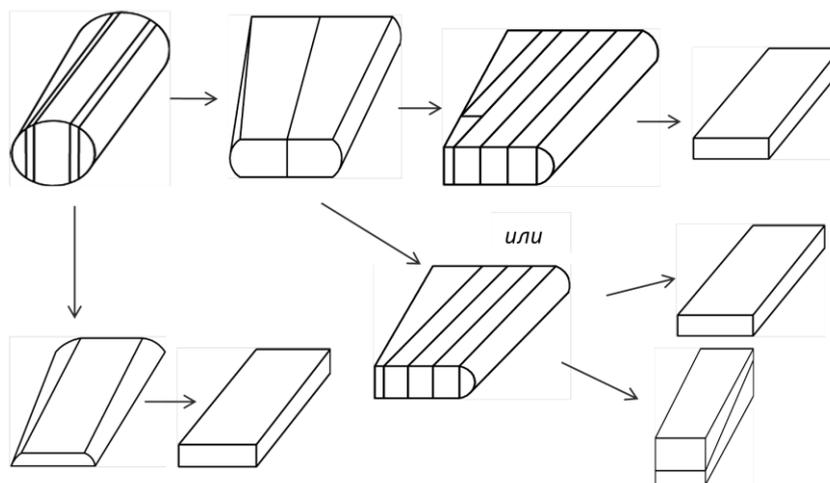


Рис. 1. Схема раскря пиловочных бревен при распиловке бруса параллельно образующей

При раскросе пиловочных бревен предлагаемым способом на первом проходе выпиливается двухкантный брус, наряду с которым попутно можно получать и необрезные пиломатериалы. На втором проходе двухкантный брус сначала распиливается вдоль по центру на две равные части, затем из каждого полученного трехкантного бруса параллельно его образующей выпиливаются обрезные пиломатериалы: либо укороченные, либо переменного прямоугольного поперечного сечения (клиновидные).

Современные тенденции в лесном бизнесе – это переход к глубокой переработке древесины. В связи с этим получение клееных материалов из клиновидных пиломатериалов весьма актуально.

Применение предлагаемого способа раскроса пиловочных бревен при распиловке брусьев параллельно образующей по сравнению с распиловкой параллельно продольной оси добавляет только одну дополнительную операцию – деление двухкантного бруса вдоль на две части, но при этом из технологического процесса исчезает операция обрезки укороченных пиломатериалов после станков второго прохода. В данном случае укороченные пиломатериалы не требуют обрезки, они получают той же ширины, что и толщина бруса.

Распиловка бруса параллельно образующей имеет преимущества перед распиловкой параллельно продольной оси бревна или бруса. Например, получение пиломатериалов с большей прочностью вследствие меньшей степени перерезания годичных слоев [7, 8]. Пиломатериалы от распиловки параллельно образующей подвержены меньшему короблению в процессе сушки, соответственно, они могут иметь меньший припуск на дальнейшую механическую обработку [9].

Одним из критериев оценки эффективности способа раскроса является объемный выход получаемых из бревна пиломатериалов. Для его нахождения нужно знать геометрические размеры всех видов пиломатериалов. Методика их определения для наиболее распространенных способов распиловки, таких как распиловка с брусковкой и в развал, известна [1]. В качестве формы пиловочного бревна принимаем усеченный параболоид вращения.

Цель нашего исследования – определение влияния основных факторов на объемный выход пиломатериалов при распиловке бруса параллельно образующей.

Объекты и методы исследования

С использованием математической модели, предназначенной для установления размеров пиломатериалов, получаемых из трехкантных брусьев при распиловке параллельно образующей [2], в среде MS Excel была разработана имитационная модель, которая позволяет определять размеры и объемный выход пиломатериалов при распиловке бруса параллельно образующей в зависимости от различных факторов.

На основании проведенных ранее исследований в качестве независимых переменных (факторов) в имитационной модели приняты диаметр, длина и средний сбеги пиловочных бревен. Случайными контролируруемыми переменными были толщины пиломатериалов. Уровни варьирования факторов представлены в таблице.

Уровни варьирования факторов

Фактор	Условное обозначение фактора	Уровень варьирования			Интервал варьирования
		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	
Диаметр бревна d , см	x_1	28	32	36	4
Длина бревна l , м	x_2	4	5	6	1
Средний сбеги бревна s , см/м	x_3	1,0	1,9	2,8	0,9

Для проведения эксперимента был выбран план второго порядка B_3 [4], позволяющий для трех факторов поставить 14 опытов. Для сравнения и определения эффективности способа распиловки пиловочных бревен при раскросе бруса параллельно образующей в качестве контрольного был взят брусоразвальный способ раскроса параллельно оси бревна.

Все расчеты производили в табличном редакторе MS Excel. Ширина пропила на первом проходе – 3,6 мм, на втором – 4,0 мм. В каждом опыте было по 6 повторений с разными поставками. Толщина пиломатериалов в поставках: 50, 40, 25 и 19 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате статистической обработки результатов эксперимента [4] были получены уравнения регрессии для определения объемного выхода пиломатериалов при распиловке бревен предлагаемым способом. Значимость коэффициентов уравнений регрессии определяли по критерию Стьюдента [4]. После отбрасывания незначимых коэффициентов уравнения в условных переменных стали выглядеть следующим образом:

распиловка бруса параллельно образующей с получением укороченных и клиновидных пиломатериалов

$$y_1 = 61,37 + 0,277x_1 - 0,354x_2 + 0,476x_3 + 1,017x_1^2 - 0,288x_1x_2 - 0,329x_2x_3 - 0,928x_1x_3;$$

$$y_2 = 63,10 + 0,524x_1 - 0,189x_2 + 0,770x_3 + 0,735x_1^2 + 0,440x_3^2 - 0,362x_1x_2 - 0,389x_2x_3 - 1,370x_1x_3;$$

распиловка бревна брусоразвальным способом

$$y_3 = 58,805 + 1,400x_1 - 1,001x_2 - 2,260x_3 + 1,063x_3^2 - 0,428x_1x_3.$$

Адекватность этих уравнений регрессии проверяли по критерию Фишера. Все уравнения оказались адекватными при уровне значимости 0,05. Из полученных уравнений видно, что наиболее значимым фактором во всех случаях является средний сбеги бревна, но если при распиловке бруса параллельно образующей его увеличение оказывает положительное влияние на объемный выход пиломатериалов, то при распиловке параллельно оси – отрицательное. Наименее значимым фактором при распиловке бруса параллельно боковой поверхности с получением укороченных пиломатериалов оказался диаметр пиловочного бревна, с получением клиновидных заготовок – его длина.

После преобразований в натуральные переменные уравнения регрессии для определения объемного выхода пиломатериалов (P) имеют следующий вид:

распиловка бруса параллельно образующей с получением укороченных и клиновидных пиломатериалов

$$P_1 = 94,33 - 3,15d + 2,64l + 10,60s + 0,064d^2 - 0,072dl - 0,366ls - 0,258ds;$$

$$P_2 = 65,56 - 1,63d + 3,53l + 13,09s + 0,046d^2 + 0,548s^2 - 0,090dl - 0,432ls - 0,380ds;$$

распиловка брусом-развальным способом

$$P_3 = 54,95 + 0,575d - 1,008l - 3,700s + 1,312s^2 - 0,119ds.$$

С использованием полученных уравнений регрессии были построены графики, отражающие влияние исследуемых факторов на объемный выход пиломатериалов (рис. 2).

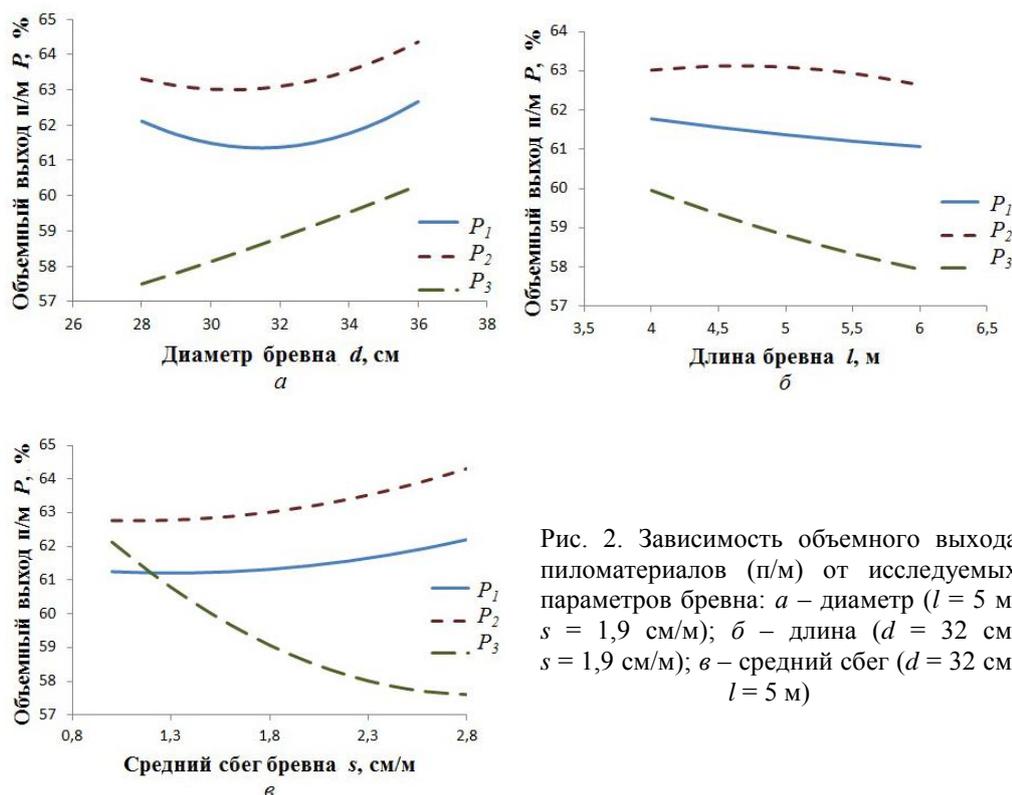


Рис. 2. Зависимость объемного выхода пиломатериалов (п/м) от исследуемых параметров бревна: *a* – диаметр ($l = 5$ м, $s = 1,9$ см/м); *б* – длина ($d = 32$ см, $s = 1,9$ см/м); *в* – средний сбег ($d = 32$ см, $l = 5$ м)

При распиловке бруса параллельно образующей при длине пиловочных бревен 5 м и среднем сбеге 1,9 см/м (рис. 2, *a*) объемный выход пиломатериалов почти не изменяется до диаметра бревна 32 см, далее наблюдается небольшой рост выхода. Причем при получении клиновидных пиломатериалов объемный выход выше примерно на 1 % по сравнению с получением укороченных пиломатериалов. Скорость изменения объемного выхода при распиловке бруса параллельно продольной оси выше, а сами значения объемного выхода пиломатериалов на 2...6 % ниже. Меньшая разница в объемном выходе соответствует большим значениям диаметра бревен.

Характер изменения объемного выхода от длины пиловочных бревен схож для всех способов (рис. 2, *б*). Происходит снижение объемного выхода пиломатериалов при увеличении длины пиловочных бревен, но скорость уменьшения несколько выше при распиловке параллельно оси.

Что касается влияния среднего сбега (рис. 2, *в*), то при малых его значениях (1,0...1,3 см/м) эффективность распиловки брусом параллельно образу-

ющей небольшая (менее 1 %) и только в случае получения клиновидных пиломатериалов. Но дальше, при увеличении сбега, объемный выход при распиловке бруса параллельно образующей начинает расти в обоих случаях, в то время как при распиловке параллельно продольной оси резко снижается.

Для наглядности совместного влияния двух наиболее значимых факторов на объемный выход пиломатериалов из пиловочных бревен были построены поверхности объемного выхода пиломатериалов (рис. 3). Третий (наименее значимый) фактор во всех случаях фиксировался на среднем уровне.

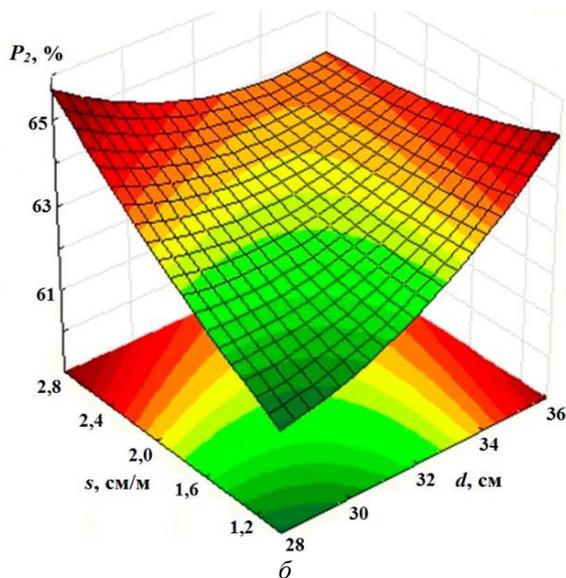
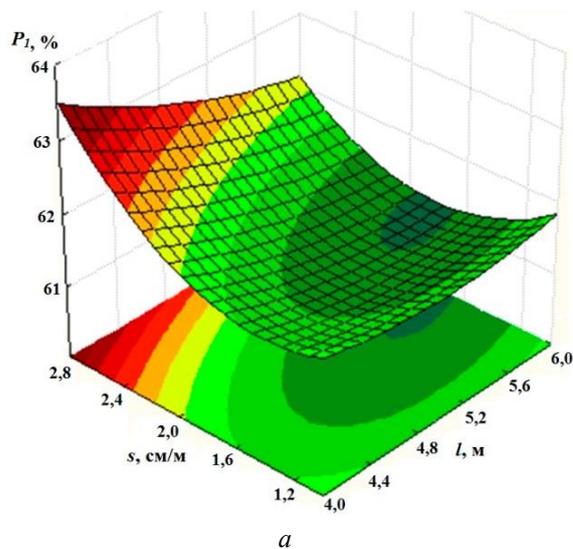


Рис. 3. Поверхности объемного выхода пиломатериалов в зависимости от наиболее значимых факторов при распиловке бруса параллельно образующей: *a* – с получением укороченных пиломатериалов; *б* – клиновидных пиломатериалов

При распиловке бруса параллельно образующей с получением укороченных пиломатериалов из центральной части бруса наибольший объемный выход пиломатериалов (P_1) достигается при минимальной длине 4 м и максимальном сбеге 2,8 см/м.

При распиловке бруса параллельно образующей с получением клиновидных заготовок наибольший объемный выход пиломатериалов (P_2) наблюдается при минимальном диаметре 28 см и максимальном сбеге 2,8 см/м или при максимальном диаметре 36 см и минимальном сбеге 1,0 см/м.

Распиловка бруса параллельно образующей эффективнее при больших значениях среднего сбega. В основном это характерно для комлевых бревен, которые в периферийной части содержат наиболее ценную (не содержащую сучков и имеющую наибольшую плотность древесины [5, 11–13]). При распиловке пиловочных бревен параллельно продольной оси эта древесина попадает либо в тонкие и укороченные пиломатериалы, либо в горбыли, которые считаются кусковыми отходами лесопильного производства.

Таким образом, применение предлагаемого способа позволит наиболее эффективно использовать ценную древесину заболонной части комлевых пиловочных бревен, которая попадает в обрезные пиломатериалы полной длины. Сердцевинная же часть бруса, которая, кроме заросших сучков, может содержать еще и гниль, будет использована для получения менее ценных укороченных или клиновидных пиломатериалов.

Выводы

1. Раскрой сильно сбежистых пиловочных бревен эффективнее при распиловке бруса параллельно образующей. Это нужно планировать еще на стадии раскряжевки хлыстов, чтобы из зон с наибольшим средним сбегом получать наиболее короткие бревна.

2. Если планируется получение клиновидных пиломатериалов, то максимального объемного выхода пиломатериалов можно достичь при минимальных значениях среднего сбega (1,0 см/м) и диаметра бревна (32 см) в рассматриваемых диапазонах факторов или при максимальном значении среднего сбega (2,8 см/м) и минимальном значении диаметра бревна (28 см).

3. Применение способа раскроя пиловочных бревен при распиловке бруса параллельно образующей позволяет повысить объемный выход пиломатериалов на 2...6 % по сравнению с распиловкой параллельно оси. Причем объемный выход при получении клиновидных пиломатериалов выше в среднем на 1,5 % по сравнению с укороченными из центральных частей бруса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов П.П. Технология пиломатериалов. М.: Гослесбумиздат, 1963. 578 с.
2. Микрюкова Е.В., Пекменов В.М. Особенности определения выхода пилопродукции при раскрое бруса параллельно образующей // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. № 2-2(7-2). С. 336–340.
3. Пат. 2529169 Российская Федерация, МПК В 27 В 1/00. Способ раскроя бревен / Микрюкова Е.В., Торопов А.С., Разумов Е.Ю., Яналова Н.А., Пекменов В.М. № 2013104479/13; заявл. 01.02.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.

4. Пижурин А.А., Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.
5. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
6. Сидоров И.И. Распиловка двухкантных брусьев параллельно образующей // Лесн. журн. 1975. № 3. С. 76–81. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Уласовец В.Г. Сравнение объемов необрезных досок при различных способах распиловки бревен // Лесн. журн. 2005. № 5. С. 69–74. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Уласовец В.Г. Сравнительный анализ двух способов распиловки бревен на необрезные пиломатериалы // Деревообаб. пром-сть. 2005. № 1. С. 5–7.
9. Храброва О.Ю. Исследование поперечного коробления пиломатериалов, получаемых при распиловке параллельно образующей и традиционным способом // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 214. С. 233–246.
10. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Швец В.Л. Анализ влияния качественных характеристик круглых лесоматериалов на выбор бревнопильного оборудования // Изв. СПбЛТА. 2014. Вып. 208. С. 63–72.
11. Heräjärvi H. Variation of Basic Density and Brinell Hardness within Mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* Stems // Wood and Fiber Science. 2004. No. 2. Pp. 216–227.
12. Grekin M., Verkasalo E. Variations in and Models for Brinell Handness of Scots Pine Wood from Finland and Sweden // Baltic Forestry. 2013. Vol. 19, no. 1. Pp. 128–136.
13. Nikulshin S., Semishkur S., Tambi A., Chubinsky A. Strength of Spruce Wood // Internationale Studierenkonferenz “SPRUNGBRETT” / Center for Development and Cooperation CDC, Berner Fachhochschule. Schweiz, Biel, 2015. Vol. 0. Pp. 133–138.

Поступила 15.12.17

UDC 674.09

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.117

Study of the Board Output from the Saws when Cant Sawing Parallel to Generatrix

E.V. Mikryukova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

A.S. Toropov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

V.M. Pekmenov, Graduate Student

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: mikryukovaev@volgatech.net

The paper proposes the method of cutting the sawlogs when cant sawing parallel to generatrix. Dull-edged timber is ripped into two parts after cutting, and each of the obtained three-side edged cants is sawn parallel to generatrix. Two methods of sawing are possible: with the production of cut sawn timber from the heart parts of a squared beam or wedge-shaped sawn timber. At the same time not only the volume, but also the quality output of sawn timber increases. With the help of the simulation model for comparison, the authors carry out experimental studies of the lumber yield when sawing parallel to generatrix and parallel to the longitudinal axis of the log. Dependences of the board output from the saws on the diameter, length and average taper are obtained. The ranges of variation of the diameter is from 28 to 36 cm, the length is from 4 to 6 m, the average taper is from 1.0 to 2.8 cm/m. The dependency graphs of the board output from the saws from the investigated factors are constructed. The greatest effect on the lumber yield is provided by

For citation: Mikryukova E.V., Toropov A.S., Pekmenov V.M. Study of the Board Output from the Saws when Cant Sawing Parallel to Generatrix. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 117–126. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.117

taper. The diameter does not exert a strong influence on the board output from the saws when cant sawing parallel to generatrix in comparison with the sawing parallel to the longitudinal axis of the log; with a diameter greater than 32 cm, the lumber yield increases insignificantly. Compared with sawing parallel to the axis, the board output from the saws when sawing parallel to generatrix is 2...6 % higher. Increasing the length of the log reduces the lumber yield when cant sawing parallel to generatrix and the longitudinal axis. Low values of the average taper (1.0...1.3 cm/m) do not give advantages to both sawing methods. With an increase in the average taper to 2.8 cm/m, the lumber yield when sawing parallel to generatrix increases by 4...6 %. Cant sawing parallel to generatrix to produce wedge-shaped sawn timber in comparison with the production of cut sawn timber from the heart parts of a squared beam increases the board output from the saws by 1.0...1.5 %.

Keywords: sawlog, squared beam, sawn timber, method of cutting parallel to generatrix, method of cutting parallel to the longitudinal axis, output of lumber.

REFERENCES

1. Aksenov P.P. *Tekhnologiya pilomaterialov* [Lumber Technology]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 578 p. (In Russ.)
2. Mikryukova E.V., Pekmenov V.M. Osobennosti opredeleniya vykhoda piloproductsii pri raskroe brusa parallel'no obrazuyushchey [Features of Determining the Output of Lumber Cutting of Squared Timber in Parallel Generatrix]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the 21st Century: Theory and Practice], 2014, no. 2-2(7-2), pp. 336–340.
3. Mikryukova E.V., Toropov A.S., Razumov E.Yu., Yanalova N.A., Pekmenov V.M. *Sposob raskroya breven* [Method of Round Timber Cutting]. Patent RF, no. 2529169, 2014.
4. Pizhurin A.A., Pizhurin A.A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Fundamentals of Scientific Research in Woodworking]. Moscow, MSFU Publ., 2005. 305 p. (In Russ.)
5. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Wood Density]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russ.)
6. Sidorov I.I. Raspilovka dvukhkantnykh brus'ev parallel'no obrazuyushchey [Cutting of Dull-Edged Timber Parallel to Generatrix]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 1975, no. 3, pp. 76–81.
7. Ulasovets V.G. Sravnenie ob'emov neobreznykh dosok pri razlichnykh sposobakh raspilovki breven [Comparison of Unedged Boards Volumes under Different Methods of Log Sawing]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2005, no. 5, pp. 69–74.
8. Ulasovets V.G. Sravnitel'nyy analiz dvukh sposobov raspilovki breven na neobreznye pilomaterialy [Comparative Analysis of Two Methods of Breaking-Down of Logs into Unedged Lumber]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking Industry], 2005, no. 1, pp. 5–7.
9. Khrabrova O.Yu. Issledovanie poperechnogo korobleniya pilomaterialov, poluchaemykh pri raspilovke parallel'no obrazuyushchey i traditsionnym sposobom [The Study of Transverse Warpage of Lumber Produced when Cutting Parallel to Taper and Traditional Way]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii (Izvestia SPbLTA)* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2016, no. 214, pp. 233–246.
10. Chubinskiy A.N., Tambi A.A., Shvets V.L. Analiz vliyaniya kachestvennykh kharakteristik kruglykh lesomaterialov na vybor brevnopil'nogo oborudovaniya [Analysis of Sawlogs Shape Influence on Sawmill Equipment Choice]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii (Izvestia SPbLTA)* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2014, no. 208, pp. 63–72.

11. Heräjärvi H. Variation of Basic Density and Brinell Hardness within Mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* Stems. *Wood and Fiber Science*, 2004, no. 2, pp. 216–227.

12. Grekin M., Verkasalo E. Variations in and Models for Brinell Handness of Scots Pine Wood from Finland and Sweden. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 128–136.

13. Nikulshin S., Semishkur S., Tambi A., Chubinsky A. *Strength of Spruce Wood*. Internationale Studierenkonferenz “SPRUNGBRETT”, Center for Development and Cooperation CDC, Berner Fachhochschule. Schweiz, Biel, 2015, vol. 0, pp. 133–138.

Received on December 15, 2017

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН В ЛИСТВЕННИЧНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛАХ ПРИ СУШКЕ

Ш.Г. Зарипов, д-р техн. наук, доц.

Филиал Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

Трещины различного вида – наиболее часто встречающиеся пороки сушки в лиственничных пиломатериалах. Многочисленными исследованиями установлено, что указанный вид порока зависит от многих факторов. Поэтому необходима систематизация этих факторов с целью установить степень значимости каждого. Исследования показали, что основные факторы, оказывающие влияние на формирование трещин в лиственничных пиломатериалах при сушке, целесообразно разделить на три группы, которые в той или иной степени зависят от структуры древесины. Первая (основная) группа факторов связана с наличием в древесине лиственницы значительного количества сердцевинных лучей. В пиломатериалах смешанной распиловки они выступают как концентраторы напряжений, что приводит к возникновению трещин при сушке. В пиломатериалах радиальной распиловки наличие сердцевинных лучей упрочняет конструкцию доски. В результате вероятность появления трещин в этой группе пиломатериалов многократно снижается. Действие второй и третьей групп факторов обусловлено распределением связанной влаги по сечению доски. Цель данной работы – проведение систематизации факторов, которая позволила бы выстраивать технологический процесс сушки лиственничных пиломатериалов таким образом, чтобы максимально снизить вероятность появления трещин.

Ключевые слова: трещина, лиственничные пиломатериалы, жесткость, сердцевинные лучи, распределение связанной влаги.

Введение

В основе изучения целостности и разрушения при сушке конструкции пиломатериалов, включая лиственничные, лежит оценка соотношения предела их прочности и действующих на них разрушающих напряжений. Для сохранения целостности конструкцию необходимо либо упрочнять, либо снижать действующие напряжения.

В настоящее время разработано достаточно большое количество феноменологических моделей, объясняющих разрушение пиломатериалов при сушке. В подавляющем большинстве моделей изучается развитие напряжений первого рода, уравниваемых в пределах больших объемов древесины, соизмеримых с объемами сортимента [4, 7, 11 и др.]. Такой подход позволяет установить влияние изменения количества связанной влаги на возникновение растягивающих напряжений в высушиваемых пиломатериалах. Однако при

Для цитирования: Зарипов Ш.Г. Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в лиственничных пиломатериалах при сушке // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 127–136. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

этом не учитываются особенности деформирования отдельных элементов древесины лиственницы в определенных температурно-временных интервалах.

Решение проблемы целостности доски при сушке усложняется переменными значениями действующих растягивающих напряжений и прочности самой древесины, которые наблюдаются на фоне деструктивных процессов. Поэтому целостность пиломатериалов при сушке может быть обеспечена при всестороннем учете факторов, оказывающих влияние на возникновение трещин.

Ранее проведенные исследования показали [6, 12], что при простом механическом воздействии на связи такого полимерного материала, как древесина, ей придается широкий набор свойств: от свойств высоковязкой жидкости до свойств, присущих хрупкому стеклу. Поэтому при изменении характера поведения имеющейся совокупности цепей в определенных температурно-временных интервалах следует ожидать протекания различных деформационных процессов.

Следовательно, при изучении процессов образования трещин необходимо учитывать физическое состояние древесины, которое зависит от ее температуры и влажности, скорости воздействия напряжений растяжения, а также дополнительное растягивающее воздействие на определенный элемент древесины, связанное с недопущением такого явления, как поперечное коробление.

Цель данной работы – систематизация факторов сушки лиственничных пиломатериалов, что позволит выстраивать технологический процесс таким образом, чтобы максимально снизить вероятность появления трещин.

Объекты и методы исследования

Нами был проведен комплекс экспериментальных исследований, который позволил установить основные стадии разрушения древесины лиственницы при конвективной сушке: от зарождения магистральной трещины в виде микротрещины до ее затухания (рис. 1).

Развитие магистральной трещины происходит за счет образования новых микротрещин, которые формируются путем разрушения сердцевинных лучей с некоторым смещением их относительно друг друга (рис. 2).

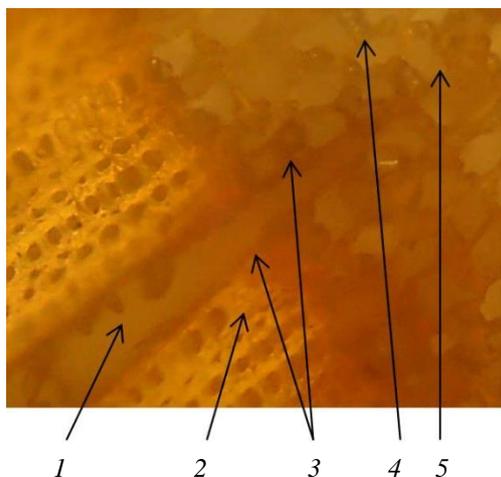


Рис. 1. Микрофотография зарождения микротрещины усушки: 1 – микротрещина; 2 – поздняя древесина годичного слоя; 3 – границы микротрещины; 4 – ранняя древесина годичного слоя; 5 – вершина микротрещины

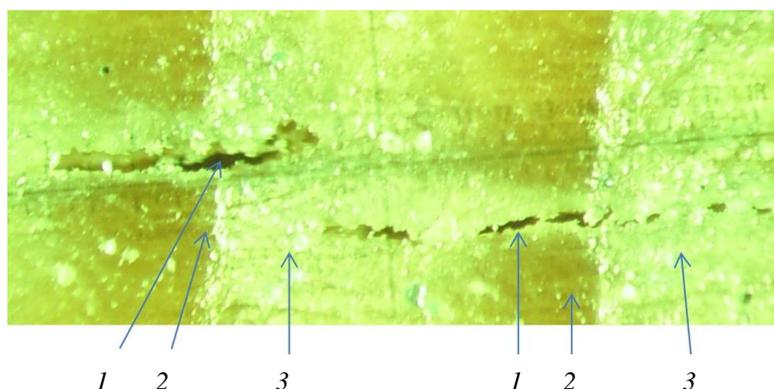


Рис. 2. Распространение микротрещин: 1 – микротрещина; 2 – поздняя древесина годичного слоя; 3 – ранняя древесина годичного слоя

В результате формируется магистральная трещина усушки, ориентированная строго по сердцевинному лучу (рис. 3).

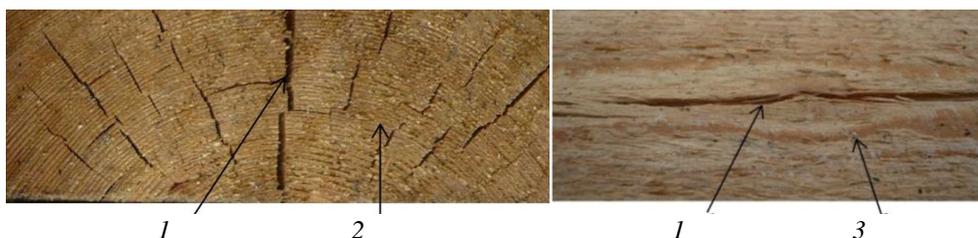


Рис. 3. Формирование магистральной трещины усушки (1) в торце (2) и на пласти (3) доски из древесины лиственницы

Были проведены механические испытания образцов лиственничных пиломатериалов на разрывной машине ИР-100. Факторы и пределы варьирования: температура нагрева древесины $t_d = 20, 50, 75$ °С; скорость нагружения $v_n = 0,1; 1,0$ кН/с; влажность древесины $W_d \approx 5; \geq 30$ %. Выходные параметры – модули упругости при растяжении в тангенциальном и радиальном направлениях.

Результаты проведенных механических испытаний позволили получить численные значения модуля упругости древесины лиственницы при растяжении в тангенциальном и радиальном направлениях (рис. 4).

Результаты исследования и их обсуждение

Для более полного представления о причинно-следственной связи между кинетикой сушки и физико-механическими свойствами древесины представим последнюю в виде некоторой полимерной композиции [10], строение которой подобно строению взаимопроникающих сеток, где углеводы образуют сетку за счет водородных связей и сил физического взаимодействия, но отличается тем, что сетки углеводов и лигнина соединены валентными связями. Тогда пространственная структура матрицы – это суперпозиция трех сеток [9], которые образуются водородными связями и силами физи-

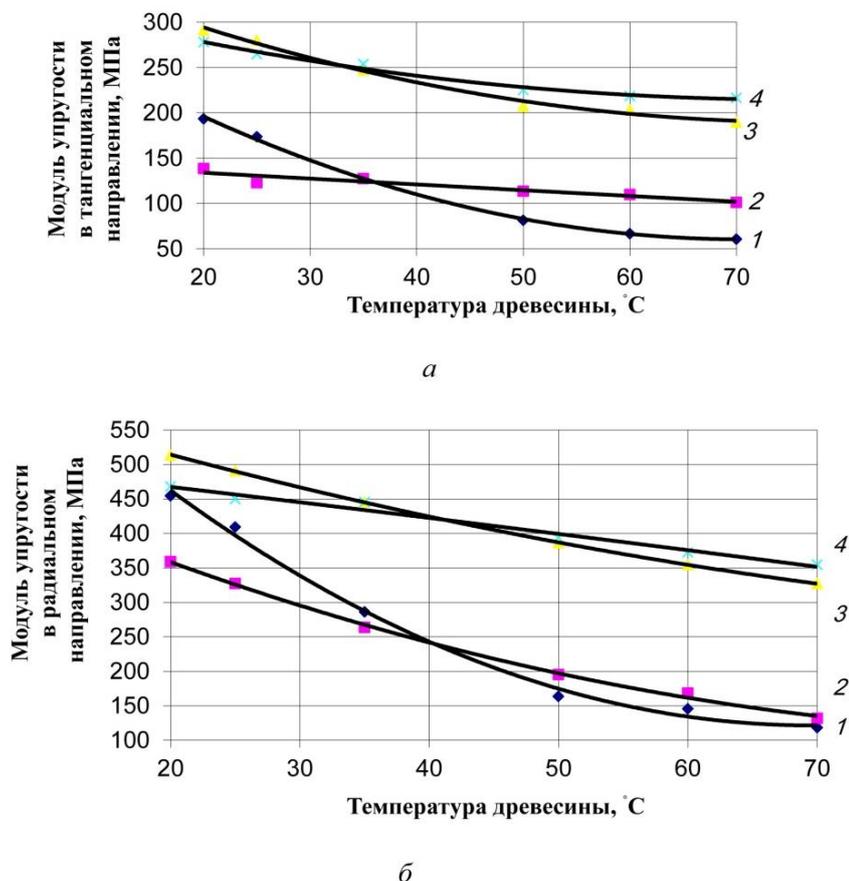


Рис. 4. Модуль упругости древесины лиственницы при растяжении в тангенциальном (а) и радиальном (б) направлениях при различной температуре нагрева древесины в зависимости от влажности древесины W_d и скорости нагружения v_d : 1 – $W_d \geq 30\%$; $v_d = 1$ кН/с; 2 – $W_d \geq 30\%$; $v_d = 0,1$ кН/с; 3 – $W_d \approx 5\%$; $v_d = 0,1$ кН/с; 4 – $W_d \approx 5\%$; $v_d = 1$ кН/с

ческого взаимодействия (Н-сетка); валентными связями между лигнином и нецеллюлозными углеводами (ЛУ-сетка); за счет структуры лигнина (Л-сетка).

Предложенная полимерная композиция позволяет объяснить цикличность разрушения древесины лиственницы при растяжении поперек волокон. Приведенные на рис. 5 графики (1, 2) «деформация–разрушение» указывают на то, что разрушение образца является многоциклическим процессом. Каждый цикл состоит из двух периодов. Цифры на графике указывают на реперные точки периодов цикла.

Вначале происходит пластическое деформирование при постоянном значении растягивающих сил (горизонтальный участок: 1–1_m; 2–2_m, ..., 13–13_m), что указывает на своеобразное «вытягивание» связей путем «разворачивания» клубка определенной группы макромолекул до некоторого предельного значения.

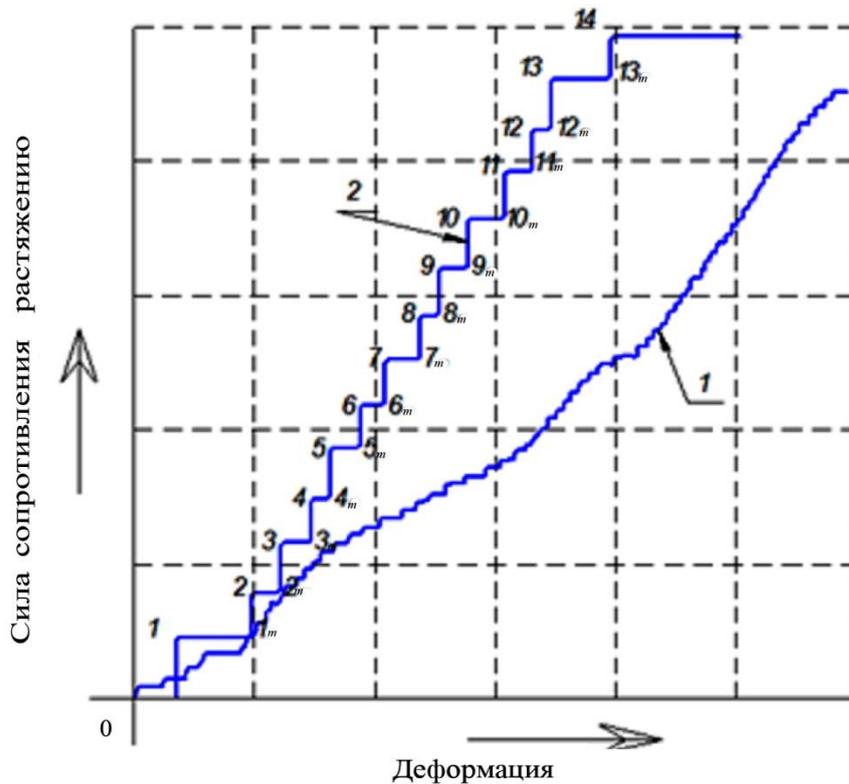


Рис. 5. Цикличность разрушения образцов древесины лиственницы при действии растягивающей силы в радиальном направлении ($W_d = 30\%$, $v_d = 0,1$ кН/с) и различной температуры нагрева древесины: 1 – 20 °С; 2 – 50 °С

По достижении предельного значения пластической деформации сетки растягивающая сила начинает воздействовать на узлы сетки (вертикальные отрезки: 1_m-2 , 2_m-3 , ..., 13_m-14), происходит натяжение связей без деформирования (упругое растяжение), что приводит к разрушению узла сетки. Следующий цикл растяжения соответствует сопротивлению более длинных по сравнению с предыдущими связями. Разрушение этих связей осуществляется по аналогичной схеме.

Суммарное относительное удлинение рабочей части испытуемого образца при растяжении как в радиальном, так и в тангенциальном направлении (независимо от температуры и влажности древесины, а также скорости нагружения) не превышает 1 %, что указывает на линейность связи между напряжениями растяжения σ_p и относительными деформациями ε . Такая зависимость характерна для упругих тел и подчиняется закону Гука [6]:

$$\sigma_p = E \varepsilon,$$

где E – модуль упругости.

Таким образом, одна из причин появления трещин в лиственничных пиломатериалах – ограниченная деформативность древесины. Поэтому необходимо изучить факторы, оказывающие влияние на образование трещин в начальный период сушки, когда древесина лиственницы при растяжении име-

ет минимальную жесткость – $E \cdot F$ (где F – площадь поперечного сечения конструкции) [1].

Для этого обратимся к результатам экспериментальных исследований (см. рис. 4). Основным вывод, который следует из анализа этого рисунка: модуль упругости древесины лиственницы при растяжении в радиальном направлении превышает аналогичный показатель в тангенциальном направлении в 1,67–2,50 раза независимо от физического состояния древесины.

Кроме того, полученные данные свидетельствуют, что прочность древесины лиственницы во многом определяется жесткостью такого элемента композиции, как сердцевинный луч. Объем сердцевинных лучей составляет порядка 10...11 % всего объема древесины [8]. Следовательно, располагаясь по радиусу ствола бревна, сердцевинные лучи обуславливают ее жесткость при растяжении поперек волокон.

Так, в досках, которые получены при реализации смешанной схемы распиловки бревен (см. рис. 3), наличие сердцевинных лучей существенно снижает прочность древесины лиственницы. Такой эффект (см. рис. 1, 2) объясняется более низкой жесткостью сердцевинных лучей в поперечном сечении тангенциальной зоны годичного слоя по сравнению с клеточными стенками поздней древесины.

В радиальных пиломатериалах сердцевинные лучи выступают в качестве армирующих элементов, повышающих жесткость древесины лиственницы при растяжении. В результате выполняется основное условие сохранения целостности доски в начальный период сушки $[\sigma] \geq \sigma_p$ (где $[\sigma]$ – предел прочности) [14].

Две следующие группы факторов также зависят от особенностей структуры древесины лиственницы. Однако их влияние проявляется на определенных стадиях сушки через такой показатель, как распределение связанной влаги по сечению доски. При этом необходимо учитывать, что удаление влаги является одним из составляющих процесса экстракции [5]. Следовательно, процесс сушки древесины лиственницы сопровождается ее деструкцией [15], интенсивность которой во многом зависит от температуры материала.

Начальная стадия сушки характеризуется неравномерной усушкой поверхностных слоев доски, что является первопричиной возникновения растягивающих напряжений из-за наличия перепада влажности ΔW_r (см. таблицу).

В течение 16...23 ч сушки $\Delta W_r = 9,0...12,1$ %, что создает наиболее благоприятные условия для возникновения трещин в поверхностном слое доски и повышает вероятность выполнения условия $[\sigma] < \sigma_p$.

При равных значениях ΔW_r удельная усушка тангенциальной зоны поверхностного слоя доски превышает аналогичный показатель в радиальном направлении в 1,84–2,2 раза [7, 8]. В результате наблюдается повышение нереализованной усушки, являющейся основным фактором формирования значительных растягивающих напряжений. Повышенное значение нереализованной усушки в тангенциальной зоне поверхностного слоя доски фиксируется на фоне минимальной жесткости ($E \cdot F \rightarrow \min$) сердцевинного луча, что является вторым фактором. Поэтому тангенциальная зона поверхностного слоя лиственничной доски – это своеобразный концентратор напряжений. Таким образом, эта зона поверхности доски отличается высокой вероятностью образования трещин в начальный период сушки.

Распределение влажности в поверхностном слое доски

Образец	Параметры сушки			
	Продолжительность, ч	Влажность <i>i</i> -го слоя древесины по толщине доски, %		Перепад влажности древесины между слоями образца ΔW_T , %
		W_1	W_2	
1	16	20,2	33,1	9,8
	40	12,0	16,6	4,6
	75	9,1	16,1	7,0
	99	5,3	8,1	2,8
2	18	14,6	23,5	8,9
	42	12,6	19,4	6,8
	66	8,3	14,3	6,0
	92	5,5	9,5	4,0
3	23	16,0	28,1	12,1
	46	19,3	31,8	10,7
	66	12,5	22,1	9,6
	92	7,4	10,1	2,7

Примечания: 1. $\Delta W_T = W_2 - W_1$. Если $W_2 > 30$ %, то W_2 принимается равной 30 %. 2. Глубина слоя 1 составляет 0...5 мм, слоя 2 – 5...10 мм.

В специальной литературе [2, 3, 6, 13 и др.] значительное внимание уделяется влиянию на образование трещин в полимере такого фактора, как скорость нагружения.

Как видно из представленных на рис. 4 графиков, скорость нагружения не изменяет структуру материала. Она устанавливает характер отклика системы на интенсивность действующих сил. Поэтому влияние скорости нагружения на жесткость древесины лиственницы следует рассматривать в совокупности с такими параметрами, как температура и влажность древесины [16].

Из полученных данных видно, что при температуре древесины 34...36 °С (тангенциальное растяжение) и 41 °С (радиальное растяжение) влияние скорости усыхания на жесткость древесины лиственницы ничтожно мало. Такая зависимость прослеживается независимо от влажности древесины. Следовательно, для предотвращения появления трещин в начальный период сушки лиственничных пиломатериалов смешанной распиловки температура первой ступени сушки должна составлять 34...36 °С, радиальной распиловки – 41 °С.

На заключительной стадии сушки наблюдается относительно равномерное распределение связанной влажности по сечению доски. В результате $\Delta W_T \rightarrow \min$ (см. таблицу). Как следствие, происходит формирование поперечного коробления. При сушке в зажатом состоянии поверхностные слои лиственничной доски испытывают дополнительные растягивающие напряжения ($\sigma_{\text{доп}}$) из-за недопущения коробления [4].

Рис. 6 иллюстрирует трещину в доске смешанной распиловки, которая сушилась в свободном состоянии, что привело к поперечному короблению. При этом $\sigma_{\text{доп}} \rightarrow 0$. В результате трещина, которая образовалась в начальный период сушки, ограничилась глубиной 10 мм. Проведенные опыты показали, что при сушке пиломатериалов в зажатом состоянии глубина трещины много выше того значения, которое указано на рис. 6, за счет действия дополнительных напряжений.



Рис. 6. Глубина распространения микротрещины в лиственничной доске при сушке в свободном состоянии

Выводы

1. Образование трещин при сушке лиственничных пиломатериалов – многофакторное явление, которое возникает в равной степени как в период повышенного перепада связанной влажности, так и в период ее выравнивания.

2. Древесина лиственницы характеризуется низкой деформативностью при растяжении поперек волокон, что позволяет относить ее к упругим телам.

3. Выделяются три группы факторов, влияющих на формирование трещин в лиственничных пиломатериалах. Основная группа связана непосредственно со структурой древесины лиственницы (с наличием концентратора напряжений в виде сердцевинных лучей), две другие связаны со структурой опосредованно и проявляются при определенном распределении связанной влаги по сечению доски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
2. Аскадский А.А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
3. Бартнев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
4. Глухих В.Н. Повышение качества сушки пиломатериалов на основе учета анизотропии древесины при составлении схем раскря бревен: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2008. 291 с.
5. Зарипов Ш.Г. Совершенствование технологии сушки лиственничных пиломатериалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. 243 с.
6. Кауш Г. Разрушение полимеров / пер. с англ.; под ред. С.Б. Ратнера. М.: Мир, 1981. 440 с.
7. Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке М.: Лесн. пром-сть, 1971. 176 с.
8. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 384 с.

9. Цините В.А., Гравитис Я.А., Эриньш П.П., Ребятникова А.Ф. Влияние удаления лигнина на набухание и механические свойства древесины // Химия древесины. 1976. № 1. С. 12–20.
10. Эриньш П.П., Цините В.А., Витоле И.М. Взаимосвязь между изменениями в химическом составе, субмикроскопической структуре и механических свойствах березовой древесины при обработке растворами щелочей и кислот в мягких условиях // РЖХим. 1972. С. 21–28.
11. Hardtke H.-J., Militzer K.-E., Fischer R., Hufenbach W. Entwicklung und Identifikation eines kontinuumsmechanischen Modells für die numerische Simulation der Trocknung von Schnittholz // Research report DFG-project Ha 2075/3-2. Dresden, 1997.
12. Milota M.R. Warp and Shrinkage of Hem-Fir Stud Lumber Dried at Conventional and High Temperatures // Forest Products Journal. 2000. No. 50(11). Pp. 79–84.
13. Mindess S., Bentur A. Crack Propagation in Notched Wood Specimens with Different Grain Orientations // Wood Science and Technology. 1986. Vol. 20, iss. 2. Pp. 145–155.
14. Niemz P. Holz. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993. 243 p.
15. Oltean L., Teischinger A., Hansmann C. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood during Wood Drying – a Review // BioResources. 2007. Vol. 2, no. 4. Pp. 789–811.
16. Stamm A.J. Thermal Degradation of Wood and Cellulose // Industrial & Engineering Chemistry. 1956. Vol. 48, iss. 3. Pp. 413–417.

Поступила 23.12.17

UDC 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying

Sh. G. Zaripov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor

Branch of Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Region, 662543, Russian Federation; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

Cracks of various types are the most common drying defects in larch lumber. Numerous studies have shown that this type of defects depends on many factors. Therefore, the systematization of these factors will allow establishing their level of significance. The studies have also demonstrated that the main factors influencing the formation of cracks in larch lumber during drying can be divided into three groups, which to some extent depend on the wood structure. The first (main) group is associated with the presence of a significant number of woodrays in larch wood. In mixed sawn timber, they act as stress concentrators, which leads to cracks appearance during drying. Woodrays strengthen the board design in radially sawn timber. As a result, the possibility of cracks in this group of lumber decreases manyfold. The effect of the second and third groups of factors is due to the distribution of bound moisture over a cross section of the board. The goal of research is to systematize the factors that will help to construct the technological process of larch lumber drying in such a way as to minimize the likelihood of cracks appearance.

Keywords: crack, larch lumber, hardness, woodray, distribution of bound moisture.

For citation: Zaripov Sh.G. Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 127–136. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

REFERENCES

1. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 560 p. (In Russ.)
2. Askadskiy A.A. *Deformatsiya polimerov* [Deformation of Polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 448 p. (In Russ.)
3. Bartenev G.M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and Mechanism of Polymer Destruction]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 280 p. (In Russ.)
4. Glukhikh V.N. *Povyshenie kachestva sushki pilomaterialov na osnove ucheta anizotropii drevesiny pri sostavlenii skhem raskroya breven: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving the Quality of Drying of Sawn Timber on the Basis of Wood Anisotropy Accounting when Drawing Log Cutting: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Saint Petersburg, 2008. 291 p.
5. Zaripov Sh.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii sushki listvennichnykh pilomaterialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving the Drying Schedule of Larch Lumber: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Arhanglsk, 2016. 243 p.
6. Kaush H.H. *Polymer Fracture*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1978. 332 p. DOI: 10.1007/978-3-642-96460-2
7. Ugolev B. N. *Deformativnost' drevesiny i napryazheniya pri sushke* [Wood Deformity and Tension when Drying]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 176 p. (In Russ.)
8. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood Science with the Basics of Forest Commodity Science]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 384 p. (In Russ.)
9. Tsinite V.A., Gravitis Ya.A., Erin'sh P.P., Rebyatnikova A.F. Vliyanie udaleniya lignina na nabukhanie i mekhanicheskie svoystva drevesiny [Influence of Lignin Removal on Swelling and Mechanical Properties of Wood]. *Khimiya drevesiny*, 1976, no. 1, pp. 12–20.
10. Erin'sh P.P., Tsinite V.A., Vitole I.M. Vzaimosvyaz' mezhdru izmeneniyami v khimicheskom sostave, submikroskopicheskoy strukture i mekhanicheskikh svoystvakh berezovoy drevesiny pri obrabotke rastvorami shchelochey i kislot v myagkikh usloviyakh [Interrelation between Changes in the Chemical Composition, Submicroscopic Structure and Mechanical Properties of Birch Wood at Alkali and Acid Solutions Treatment under Mild Conditions]. *Referativnyy zhurnal Khimiya*, 1972, pp. 21–28. (In Russ.)
11. Hardtke H.-J., Militzer K.-E., Fischer R., Hufenbach W. Entwicklung und Identifikation eines kontinuumsmechanischen Modells fur die numerische Simulation der Trocknung von Schnittholz. *Research report DFG-project Ha 2075/3-2*. Dresden, 1997.
12. Milota M.R. Warp and Shrinkage of Hem-Fir Stud Lumber Dried at Conventional and High Temperatures. *Forest Products Journal*, 2000, no. 50(11), pp. 79–84.
13. Mindess S., Bentur A. Crack Propagation in Notched Wood Specimens with Different Grain Orientations. *Wood Science and Technology*, 1986, vol. 20, iss. 2, pp. 145–155.
14. Niemi P. *Holz. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag, 1993. 243 p.
15. Oltean L., Teischinger A., Hansmann C. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood during Wood Drying – a Review. *BioResources*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 789–811.
16. Stamm A.J. Thermal Degradation of Wood and Cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1956, vol. 48, iss. 3, pp. 413–417.

Received on December 23, 2017



УДК 665.6.035.6

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.137

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФАТНОГО ЛИГНИНА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ***А.Е. Присмакова, асп.**А.Б. Дягилева, д-р хим. наук, проф.**А.И. Смирнова, канд. хим. наук*

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

e-mail: prismakova@bk.ru, abdiag@mail.ru, smirnova_nasty87@mail.ru

Повышение эффективности переработки биомассы древесины на сегодняшний день является актуальной задачей в связи с нерешенностью проблем по комплексному использованию биополимеров, входящих в ее состав, особенно такого ценного компонента, как лигнин, который обладает уникальными биохимическими свойствами. Нами предложен метод получения новых продуктов с использованием золь-гель технологии, позволяющей сформировать новые модифицированные структуры технических лигнинов с наличием в матрице дополнительных минеральных центров. Эти включения в сочетании с традиционными полифункциональными группами, характерными для лигнинов, придают специфические гибридные свойства модифицированным продуктам. С точки зрения дальнейшей технологической обработки одними из важнейших характеристик таких структурированных гибридных систем являются реологические свойства, поэтому цель исследования – получение информации о данных свойствах новых форм биополимеров. Реологические свойства изучались при помощи капиллярной вискозиметрии. Представлены результаты их исследования для новых биополимеров на основе сульфатного лигнина, модифицированного золь-гель методом и ряда минеральных компонентов, составляющих гелевую композицию. Установлено влияние условий получения новых биополимеров на их реологические свойства, которые косвенно характеризуют их структуру в условиях перераспределения основных компонентов в момент их формирования. Выявлена динамика и специфический характер изменения реологических свойств в зависимости от продолжительности созревания биополимеров. Полученная нами информация в сочетании с данными других наших исследований позволяет определять перспективные направления дальнейшего использования новых форм биополимеров на основе технических лигнинов.

Ключевые слова: лигнин, алюмокремниевые соединения, модификация лигнина, новые формы биополимеров, реологические свойства биополимеров.

Введение

Возможности лесной биотехнологии необходимо использовать для развития инновационных направлений, позволяющих на основе возобновляемых природных ресурсов получать не только экономически выгодные, но и эколого-

Для цитирования: Присмакова А.Е., Дягилева А.Б., Смирнова А.И. Реологические свойства сульфатного лигнина, модифицированного золь-гель методом // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 137–148. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.137

гически безопасные продукты [11, 31]. Одним из таких направлений является эффективное использование биомассы древесины – биорефайнинг [1]. Структура биомассы древесины представляет собой полифункциональный комплекс, состоящий из ряда биополимеров [21, 36], которые в традиционных технологиях производства применяются недостаточно. Так, лигнин, считающийся побочным продуктом [3, 20], обладает уникальными биохимическими свойствами [2, 27, 34], что позволяет на его основе получать полифункциональные биополимеры [5, 22, 24].

На базе ранее исследованных свойств лигнина [6, 7, 18] предложен способ получения новых продуктов на его основе [8]. Согласно этому способу минеральные компоненты, которые используют для модификации, изменяют соотношение функциональных групп лигнина и формируют новые кремний-содержащие минеральные центры, придающие гибридные свойства этому полимеру [18].

Принципиальная возможность сочетания органических полимеров и алюмокремниевых компонентов активно обсуждается в научной литературе [10, 25, 29, 32, 33], однако единого мнения о механизмах формирования новых структур нет, что является предметом научной дискуссии.

Для определения целевого назначения новых биополимеров и успешного продвижения их на рынке в качестве товарного продукта необходимо знать ряд физико-химических характеристик. Реологические свойства – важнейшие характеристики структурированных гибридных систем [12, 28, 30], они определяют специфику последующих технологических процессов, учитывают условия течения и деформации при различных нагрузках [26, 35].

Цель данной работы – получение данных о реологических свойствах модифицированных форм биополимеров, синтезированных на основе сульфатного лигнина (СЛ), содержащегося в черном щелоке, и ряда минеральных компонентов, составляющих гелевую композицию. Полученная информация позволит при сочетании с данными других наших исследований определить возможные способы технологического использования новых биополимеров.

Объекты и методы исследования

В работе использовали водные дисперсии новых биополимеров, полученных на основе черного щелока (ОАО «Питкяранта») и минеральной гелевой композиции природного происхождения из нефелинового концентрата (НФК), в состав которого входят следующие минеральные компоненты: Al_2O_3 , SiO_2 , CaO . Модификация биополимеров сульфатного лигнина проведена золь-гель методом [8].

Исходную концентрацию СЛ в водном растворе черного щелока определяли спектрофотометрическим методом [19], где в качестве эталона для сравнения использовали товарный СЛ, приготовленный путем растворения заданной навески в 0,1 н. растворе $NaOH$. Далее из него получали серию стандартных растворов. Концентрация лигнина в растворе черного щелока при модификации составляла 100 мг/дм^3 .

Минеральную композицию на основе НФК готовили кислотным вскрытием в 5 %-й H_2SO_4 . Концентрацию основных минеральных компонентов определяли в аккредитованной лаборатории по методике № 487-ХС [14]. В рабочем растворе концентрация ионов Al^{3+} , Si^{4+} , Ca^{2+} составляла соответственно 32,5; 35,2 и 6,68 мг/дм^3 .

Структурированные биополимеры синтезировали в водной среде при комнатной температуре с последующей индивидуальной самоорганизацией гибридного гелевого продукта в условиях регулирования значения рН в момент контакта. Из полученных систем отбирали равные объемы (5 мл) водных дисперсий продукта для оценки их реологических свойств методом капиллярной вискозиметрии [26]. В работе использовали вискозиметры Уббелоде (радиус капилляра – 0,081 см, длина капилляра – 1,25 см) и ВПЖ-1 (диаметр капилляра – 0,0116 см) [4]. Время истечения структурированных биополимеров измеряли через различные промежутки времени (24, 48 и 72 ч) от момента начала синтеза. На основе экспериментальных данных по методике [12] рассчитывали напряжение сдвига полученных модификаций биополимеров, оценивали их кинематическую и относительную вязкость.

Результаты исследования и их обсуждение

Выход новых форм продукта на основе СЛ при различных условиях синтеза зависит от рН в момент контакта основных компонентов, которые используются в процессе модификации СЛ. На рис. 1 представлено влияние рН на концентрацию водных дисперсий образующихся модифицированных биополимеров, имеющих различный выход как по массе, так и по объему выделенной структурированной органоминеральной сетки.

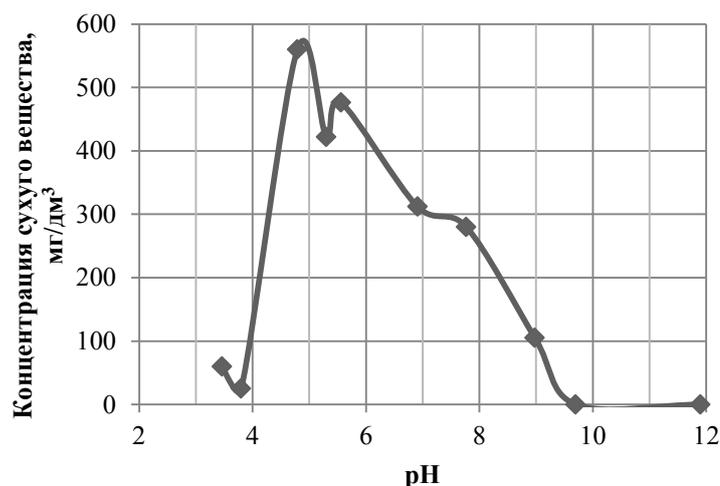


Рис. 1. Зависимость концентрации водных дисперсий биополимеров от рН синтеза (здесь и далее, на рис. 2–4, исходные концентрации компонентов при синтезе: СЛ – 100 мг/дм³; НФК в пересчете на активные компоненты: Al³⁺ – 32,5 мг/дм³, Si⁴⁺ – 35,2 мг/дм³, Ca²⁺ – 6,68 мг/дм³)

Как видно из представленной на рис. 1 зависимости, рН синтеза существенно влияет на выход модифицированных продуктов, что свидетельствует о различном механизме формирования структуры биополимеров и их индивидуальной пространственной организации в водной среде. Следует отметить, что в одинаковом объеме полученных водных дисперсий при разных значениях рН масса гибридного продукта также будет различаться. Это связано с тем, что степень участия минеральных компонентов, их гидролизованных форм [15] и органоминеральной композиции в целом [17] в момент контакта суще-

ственно варьируется в зависимости от pH синтеза. Этот факт свидетельствует также о том, что практически в каждой точке рассмотренного диапазона pH исследуется индивидуальная гибридная структура, которая может характеризоваться специфическими вязкоупругими свойствами [13].

Характеристики разбавленного раствора черного щелока (концентрация СЛ – 100 мг/дм³) находятся на границе между разбавленным и умеренно концентрированным раствором и соответствуют неупругой ньютоновской жидкости [6], подобно высокомолекулярным растворам, которые рассмотрены в работе [23]. В тоже время композиции, содержащие макромолекулы полимеров и дисперсии наночастиц кремния [25], становятся гелем, причем гидролизованые формы алюминия активно участвуют в формировании новых структур на основе лигнинов [16]. Таким образом, выбранные компоненты и условия их взаимодействия способствуют формированию структур с типичными вязкопластическими свойствами, которые и были нами определены в ходе исследования.

Согласно методике [26], для измерения реологических свойств отбирали равные объемы водных дисперсий, полученные при одинаковых исходных концентрациях основных компонентов. На основе экспериментальных данных по времени истечения в вискозиметре рассчитывали напряжение сдвига (рис. 2), относительную и кинематическую (рис. 3) вязкости в зависимости от условий синтеза исследуемых водных дисперсий модифицированных биополимеров.

Реологическое поведение водных дисперсий полученных биополимеров (рис. 2) существенно зависит от pH среды синтеза, а время созревания продукта оказывает влияние на прочностные характеристики биополимера. В отличие от поведения водной дисперсии СЛ в зависимости от pH [6], которая не проявляет упругости при этих концентрациях, формы нового биополимера имеют свойства вязко-пластичной системы с выраженным

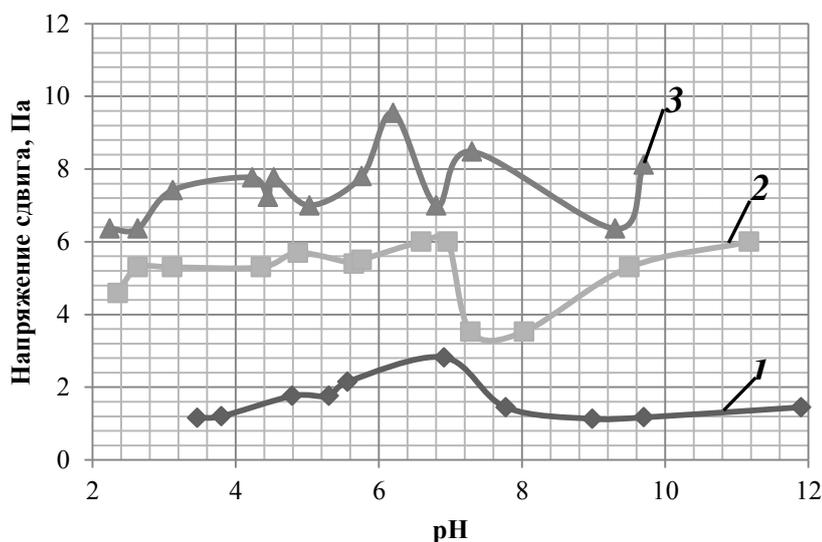


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига водных дисперсий биополимеров от pH системы через 24 (1), 48 (2) и 72 ч (3) с момента начала синтеза (исходные концентрации см. в подписи к рис. 1)

бимодальным характером. В области синтеза продуктов (рН 6–7) полученные структуры требуют больше усилия для обеспечения их сдвигового течения (рис. 2, кривая 1). Со временем, когда происходит уплотнение и созревание структуры (кривые 2 и 3), отмечается явное изменение прочностных характеристик биополимеров, которое проявляется в абсолютных значениях величин напряжения сдвига.

Следует отметить, что по мере созревания продукта выявлено косвенное изменение в структуре, которое сопровождается изменением рН дисперсионной среды во времени, что связано с изменением состояния и соотношения функциональных групп биополимеров. Наиболее заметно проявление этого эффекта в области $\text{pH} \geq 7$, где влияние элементов минеральной композиции на основе НФК определяется особенностями формирования органоминеральной матрицы модифицированного лигнина. Изменение состояния как самого лигнина, так и минеральной части композиции в зависимости от рН синтеза подчинено склонности основных компонентов к образованию водородных связей при золь-гель переходе [9]. Особенность вовлечения поверхностных кислородсодержащих групп лигнина [18] в специфическую органоминеральную матрицу и формирует новые биополимеры со значительными прочностными характеристиками. Причем участие фенольных гидроксидов лигнина в этих процессах по-видимому и приводит к более существенным эффектам подкисления полученных систем, однако это требует дополнительного исследования с оценкой функциональных групп новых форм биополимеров с помощью ИК-спектроскопии.

Наиболее часто на практике пользуются относительной вязкостью, поэтому у всех исследуемых систем, к которым необходимо приложить усилия для обеспечения сдвига, был определен этот показатель (рис. 3). Для массива полученных данных характерно постоянство и не отмечается существенного изменения как во времени, так и в зависимости от рН, при котором формировалась структура биополимеров. Это косвенно определяет реологическую модель течения биополимеров как «бингамовских» жидкостей [26].

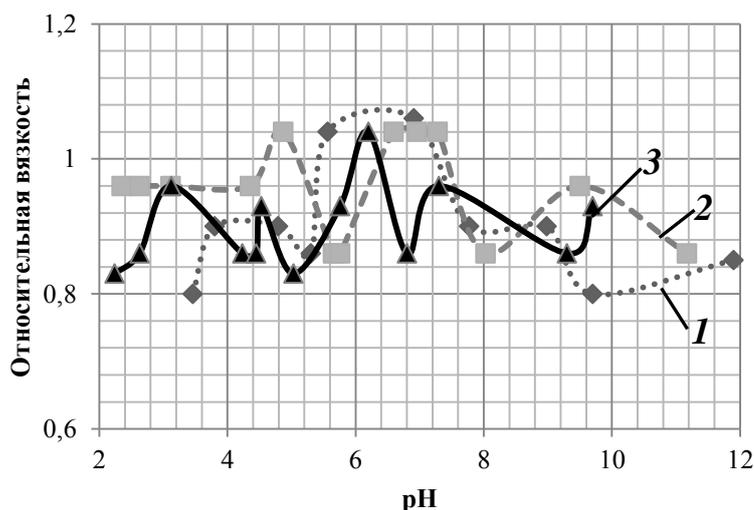


Рис. 3. Зависимость относительной вязкости водных дисперсий биополимеров от рН системы через 24 (1), 48 (2), 72 ч (3) с момента начала синтеза (исходные концентрации см. в подписи к рис. 1)

Графики зависимости кинематической вязкости от pH реакционного раствора при синтезе биополимеров (рис. 4) имеют максимумы. Время созревания биополимерного геля, как и следовало ожидать, приводит к неоднозначному изменению этой характеристики полученных продуктов.

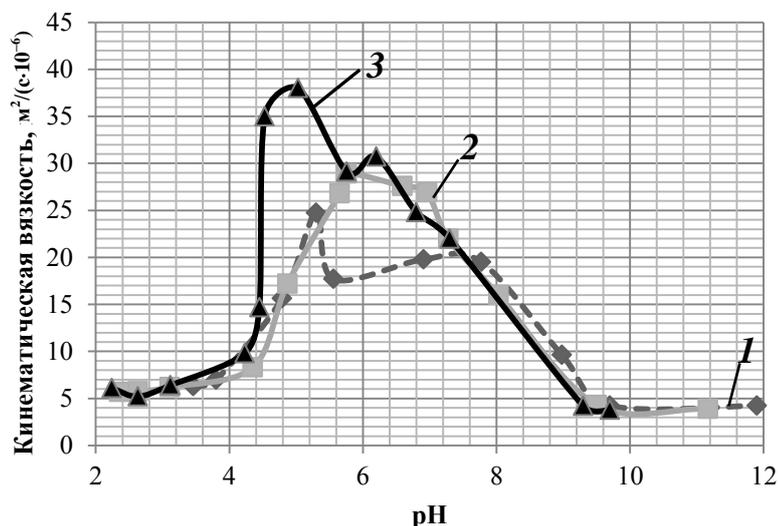


Рис. 4. Зависимость кинематической вязкости водных дисперсий биополимеров от pH системы через 24 (1), 48 (2), 72 ч (3) с момента синтеза биополимеров (исходные концентрации см. в подписи к рис. 1)

Формирование структуры модифицированных биополимеров на основе лигнина происходит под влиянием гидролиза алюминия в момент контакта компонентов, особенно в области pH 4–8, при этом алюминий вовлекает в пространственную координацию ряд функциональных групп лигнина. Это приводит к увеличению кинематической вязкости, однако относительная вязкость (см. рис. 3) остается практически постоянной. Влияние ионов кремния на формирование структуры увеличивается в щелочной области, где алюминий менее активен по отношению к лигнину [18]. Но степень участия алюминия в формировании композиционных биополимеров остается высокой (более 95 %) при $\text{pH} \geq 8$, что подтверждает оценка остаточных концентраций основных компонентов в водной среде с помощью аналитических методов контроля.

Область pH 5–7 наиболее благоприятна для формирования дисперсии новых биополимеров при выбранных условиях процесса. Динамическое напряжение сдвига и кинематическая вязкость свидетельствуют о сформированной структуре, для разрушения которой необходимо приложить максимальное усилие. Следует отметить, что в рассмотренном случае существенное влияние на формирование структуры биополимеров оказывают гидролизованые формы алюминия, которые могут являться самостоятельными реагентами для модификации лигногуминовых веществ.

Заключение

Обобщая полученные результаты исследования реологических свойств сульфатного лигнина, модифицированного золь-гель методом, можно гово-

речь о том, что, используя одни и те же исходные вещества для синтеза биополимеров и изменяя pH в момент контакта основных компонентов, можно получать биополимеры с индивидуальной самоорганизацией гибридной структуры. В период созревания гелевого продукта происходит подкисление системы, связанное с изменением связей внутри структуры биополимеров. Эти изменения имеют специфический характер при различных значениях pH, что необходимо учитывать при последующем использовании полученного продукта.

Реологическая модель течения водных дисперсий новых биополимеров в первом приближении подчиняется поведению неньютоновской жидкости Бингама в диапазоне pH 2–10. Область pH 5–7 является оптимальной с точки зрения формирования структур на основе модифицированного лигнина, требующих наибольших усилий для обеспечения сдвигового течения. Кинематическая вязкость для полученных структур имеет максимальное значение $35...37 \text{ м}^2/(\text{с} \cdot 10^{-6})$ к моменту созревания продукта (72 ч). Относительная вязкость биополимеров остается практически постоянной во всем диапазоне pH и составляет около 1. Установлено, что со временем происходит существенное изменение реологических свойств в сторону увеличения прочностных характеристик биополимеров. Это позволяет рассматривать дальнейшее технологическое назначение полученных продуктов в различных отраслях промышленности: от горнодобывающего дела до печати 3D-объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аким Э.Л., Мандре Ю.Г. Био-рефайнинг – прорывная технология переработки древесины // Оборудование и инструмент для профессионалов. Сер. «Деревообработка». 2014. № 1. Режим доступа: <http://www.informdom.com/derevoobrabotka/2014/1/bio-refaining-progryvnaya-tehnologiya-pererabotkidrevesiny.html> (дата обращения: 17.07.2017).
2. Богомолов Б.Д. Изучение химии лигнина, делигнификации древесины и использование побочных продуктов сульфатно-целлюлозного производства: докл. (автореф.) на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук по совокупности выполн. и опубли. работ. Л., 1974, 71 с.
3. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М., Соколова А.А., Филиппов Б.С., Мариев А.А., Тиранов П.П., Третьяков С.И., Новожилов Е.В., Гельфанд Е.Д., Селянина Л.И., Борисов Г.В. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с.
4. Бюро наилучших доступных технологий. Режим доступа: <http://www.burondt.ru> (дата обращения 17.07.2017).
5. ГОСТ 10028–81. Вискозиметры капиллярные стеклянные. М.: Изд-во стандартов, 2005. 13 с.
6. Дейнеко И.П. Утилизация лигнинов: достижения, проблемы и перспективы // Химия растительного сырья. 2012. № 1. С. 5–20.
7. Дягилева А.Б. Электроповерхностные свойства и агрегативная устойчивость сульфатного лигнина в растворах электролитов: дис. ... канд. хим. наук. СПб., 1992. 182 с.
8. Дягилева А.Б., Смирнова, А.И., Кузнецова Е.Д., Федотова М.Г. Модификация сульфатного лигнина золь-гель методом с получением гибридных продуктов // Химическая технология и биотехнология новых материалов и продуктов: тез. докл. VI Междунар. конф. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева, Москва, 23 окт. 2014 г. М.: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, 2014. С. 134–136.

9. Заявка № 2016108476 Российская Федерация. Способ модификации лигнина путем золь-гель синтеза с минеральными компонентами / Дягилева А.Б., Смирнова А.И., Присмакова А.Е. Заявл. 10.03.2016; опубл. 14.09.2017, Бюл. № 26. Режим доступа: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPATAP&rn=4676&DocNumber=2016108476&TypeFile=html (дата обращения 20.12.2017).
10. Ильин С.О., Аринина М.П., Малкин А.Я., Куличихин В.Г. Золь-гель переход и реологические свойства дисперсий наночастиц диоксида кремния // Коллоид. журн. 2016. Т. 78, № 5. С. 562–570.
11. Инструкция НСАМ № 487-ХС. Определение натрия, магния, алюминия, кремния, фосфора, калия, кальция, титана, марганца и железа в горных породах, объектах окружающей среды атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой. М.: ВИМС, 2010.
12. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инж. вестн. Дона. 2014. № 2. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476> (дата обращения 17.07.2017).
13. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.
14. Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. «Химия». 2011. Т. 52, № 4. С. 243–276.
15. Мякинкова Л.Л., Маклецкая А.В. Лесная биотехнология на этапе инновационного развития экономики // Инноватика и экспертиза. 2014. Вып. 1(12). С. 31–39.
16. Пилипенко А.Т., Фалендыш Н.Ф., Пархоменко Е.П. Состояние алюминия (III) в водных растворах // Химия и технология воды. 1982. Т. 4, № 2. С. 136–147.
17. Присмакова А.Е., Федотова М.Г., Дягилева А.Б. Получение лигногуминовых продуктов в процессе очистки сточных вод предприятий лесного комплекса // Современные проблемы экологии: докл. XV Междунар. науч.-техн. конф. / под общ. ред. В.М. Панарина. Тула: Инновац. технологии, 2016. С. 4–7.
18. Рудакова И.С., Молодкина Л.М., Чернобережский Ю.М., Дягилева А.Б. Исследование зависимости размеров частиц водных дисперсий сульфатного лигнина от рН методом фильтрации на трековых мембранах // Коллоид. журн. 2007. Т. 69, № 5. С. 718–720.
19. Смирнова А.И. Влияние алюмосодержащих минеральных компонентов техногенного происхождения на формирование органоминеральных структур на основе сульфатного лигнина: дис. ... канд. хим. наук. СПб., 2013. 130 с.
20. Смирнова А.И., Дягилева А.Б. Механизм формирования органоминеральных структур на основе сульфатного лигнина и алюмосодержащих компонентов // Лесн. журн. 2011. № 6. С. 112–118. (Изв. высш. учеб. заведений).
21. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции): пер. с англ. под ред. А.А. Леоновича. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 512 с.
22. Хабаров Ю.Г., Герасимова Л.В. Модификация лигнинов путем окислительного радикального сочетания. 4. Окислительное радикальное сочетание фенольных соединений в условиях одноэлектронного окисления // Лесн. журн. 2001. № 1. С. 109–114. (Изв. высш. учеб. заведений).
23. Чернобережский Ю.М., Дягилева А.Б. О возможном механизме очистки сточных вод от лигнина сульфатом алюминия // Коллоид. журн. 1993. Т. 55, № 6. С. 138–139.
24. Чудаков М.И. Промышленное использование лигнина. М.: Лесн. пром-сть, 1983, 196 с.
25. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. М.: Академкнига, 2004. 208 с.
26. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.

27. Belgacem M.N., Gandini A. Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2008. 562 p.
28. Borwankar R.P., Case S.E. Rheology of Emulsions, Foams and Gels // Current Opinion in Colloid and Interface Science. 1997. Vol. 2, iss. 6. Pp. 584–586.
29. Carson M., Walter C., Walter S. The Future of Forest Biotechnology // Forest Biotechnology in Latin America: Proc. Workshop Biotecnología Forestal. Global Biotechnology Forum, March 2–5, 2004 / Ed. by R. Kellison, S. McCord, K.M.A. Gartland. Raleigh: Institute for Forest Biotechnology, 2004. Pp. 13–40.
30. Durrani C.M., Donald A.M. Physical Characterisation of Amylopectin Gels // Polymer Gels and Networks. 1995. Vol. 3, iss. 1. Pp. 1–27.
31. Galliard T., Bowler P. Morphology and Composition of Starch // Starch: Properties and Potential / Ed. by T. Galliard. New York: John Wiley & Sons, 1987. 281 p.
32. Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications / Ed. by G. Kickelbick. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007. 516 p.
33. Kajiwara Y., Chujo Y. Microwave-enhanced Hybridizations of Biopolymers with Silica: Effective Method for Rapid Preparation and Homogeneous Dispersion // Polymer Bulletin. 2011. Vol. 66, iss. 8. Pp. 1039–1050.
34. Lignins: Occurrence, Formation, Structure, and Reactions / Ed. by K.V.Sarkanen, C.H. Ludwig. New York: John Wiley & Sons, 1971. 916 p.
35. Sjöström E. Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. New York: Gulf Professional Publ., 1993. 293 p.
36. Steffe J.F. Rheological Methods in Food Process Engineering. USA: Freeman Press, 1996. 428 p.

Поступила 22.01.18

UDC 665.6.035.6

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.137

Rheological Properties of Sulfate Lignin Modified by the Sol-Gel Method

A.E. Prismakova, Postgraduate Student

A.B. Dyagileva, Doctor of Chemical Sciences, Professor

A.I. Smirnova, Candidate of Chemical Sciences

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: prismakova@bk.ru, abdiag@mail.ru, smirnova_nasty87@mail.ru

Increasing the efficiency of wood biomass treatment is an urgent task due to the unresolved problems in the integrated use of biopolymers in its composition, especially of such a valuable component as lignin, which has unique biochemical properties. The paper proposes a method for obtaining new products using sol-gel technology to form new modified structures of technical lignins with additional mineral centers in the matrix. These inclusions, combined with the traditional polyfunctional groups, characteristic of lignins, impart specific hybrid properties to the modified products. Rheological properties are one of the most important characteristics for such structured hybrid systems. Therefore, the goal of research is to study these properties of the new forms of biopolymers. Rheological properties are studied by capillary viscometry methods. The research results for their new biopolymers, based on sulfate lignin modified by the sol-gel method, and a number of mineral compo-

For citation: Prismakova A.E., Dyagileva A.B., Smirnova A.I. Rheological Properties of Sulfate Lignin Modified by the Sol-Gel Method. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 137–148. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.137

nents constituting the gel composition are presented. The influence of conditions for obtaining new biopolymers on their rheological properties, which indirectly characterize their structure in redistribution of the main components at the period of their formation, is established. Dynamics and the specific nature of changes in rheological properties depending on the time of maturation of biopolymers are revealed. The research results in combination with data of our other studies allow us to define promising directions for the further use of new forms of biopolymer based on technical lignins.

Keywords: lignin, aluminosilicic compounds, lignin modification, new forms of biopolymers, rheological properties.

REFERENCES

1. Akim E.L., Mandre Yu.G. Bio-refayning – proryvnaya tekhnologiya pererabotki drevesiny [Bio-Refining – Breakthrough Technology of Wood Processing]. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov. Ser.: Derevoobrabotka* [Equipment and Tools for Professionals. Ser.: Woodworking], 2014, no. 1. Available at: <http://www.informdom.com/derevoobrabotka/2014/1/bio-refayning-proryvnaya-tehnologiya-pererabotkidrevesiny.html> (accessed 17.07.2017).
2. Bogomolov B.D. *Izuchenie khimii lignina, delignifikatsii drevesiny i ispol'zovanie pobochnykh produktov sul'fatno-tsellyuloznogo proizvodstva: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [The Study of Lignin Chemistry, Wood Delignification and the Use of By-Products of Sulphate and Cellulose Production: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Leningrad, 1974. 71 p.
3. Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M., Sokolova A.A., Filippov B.S., Mariev A.A., Tiranov P.P., Tret'yakov S.I., Novozhilov E.V., Gel'fand E.D., Selyanina L.I., Borisov G.V. *Pererabotka sul'fatnogo i sul'fitnogo shchelokov* [Processing of Sulfate and Sulphite Liquors]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p. (In Russ.)
4. *Byuro nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy* [Bureau of Best Available Techniques]. Available at: <http://www.burondt.ru> (accessed 17.07.2017).
5. *GOST 10028–81. Viskozimetry kapillyarnye steklyannye* [State Standard 10028–81. Glass Capillary Viscosimeters. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 13 p.
6. Deyneko I.P. Utilizatsiya ligninov: dostizheniya, problemy i perspektivy [Lignins Utilization: Achievements, Problems and Prospects]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Material], 2012, no. 1, pp. 5–20.
7. Dyagileva A.B. *Elektropoverkhnostnye svoystva i agregativnaya ustoychivost' sul'fatnogo lignina v rastvorakh elektrolitov: dis. ... kand. khim. nauk* [Electrosurface Properties and Aggregative Stability of Sulfate Lignin in Electrolyte Solutions: Cand. Chem. Sci. Diss.]. Saint Petersburg, 1992. 182 p.
8. Dyagileva A.B., Smirnova A.I., Kuznetsova E.D., Fedotova M.G. Modifikatsiya sul'fatnogo lignina zol'-gel' metodom s polucheniem gibridnykh produktov [Modification of Sulfate Lignin by Sol-Gel Method to Produce Hybrid Products]. *Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya novykh materialov i produktov: tez. dokl. VI Mezhdunar. konf. Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva, Moskva, 23 okt. 2014 g.* [Chemical Technology and Biotechnology of New Materials and Products: Proc. 6th Intern. Conf. Mendeleev Russian Chemical Society. Moscow, October 23, 2014]. Moscow, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2014, pp. 134–136. (In Russ.)
9. Dyagileva A.B., Smirnova A.I., Prismaikova A.E. *Sposob modifikatsii lignina putem zol'-gel' sinteza s mineral'nymi komponentami* [Method for Modifying Lignin by Sol-Gel Synthesis with Mineral Components]. Application for an invention RF, no. 2016108476, 2017. Available at: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPATAP&rn=4676&DocNumber=2016108476&TypeFile=html (accessed 20.12.2017).

10. Il'in S.O., Arinina M.P., Malkin A.Ya., Kulichikhin V.G. Zol'-gel' perekhod i reologicheskie svoystva dispersiy nanochastits dioksida kremniya [Sol-gel Transition and Rheological Properties of Dispersions of Silicon Dioxide Nanoparticles]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 2016, vol. 78, no. 5, pp. 562–570.

11. NSAM № 487-KhS. *Opredelenie natriya, magniya, alyuminiya, kremniya, fosfora, kaliya, kal'tsiya, titana, margantsa i zheleza v gornyykh porodakh, ob"ektakh okruzhayushchey sredy atomno-emissionnym metodom s induktivno svyazannoy plazmoy* [Scientific Council on Analytical Methods No. 487-XC. Determination of Sodium, Magnesium, Aluminum, Silicon, Phosphorus, Potassium, Calcium, Titanium, Manganese and Iron in Rocks, Environmental Objects by Atomic-Emission Method with Inductively Coupled Plasma]. Moscow, All-Russ. Minerals Research Institute Publ., 2010.

12. Kudryavtsev P.G., Figovskiy O.L. Nanokompozitnye organomineral'nye gibridnye materialy [Nanocomposite Organic-Hybrid Materials]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 2. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476> (accessed 17.07.2017).

13. Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya* [Rheology: Concepts, Methods, Applications]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2007. 560 p. (In Russ.)

14. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. Vyazkost' i struktura dispersnykh sistem [Viscosity and Structure of Disperse Systems]. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Khimiya*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 243–276.

15. Myakin'kova L.L., Makletskaya A.V. Lesnaya biotekhnologiya na etape innovatsionnogo razvitiya ekonomiki [Forest Biotechnology at the Stage of Innovation Development of Economy]. *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and Expert Examination], 2014, no. 1(12), pp. 31–39.

16. Pilipenko A.T., Falendysh N.F., Parkhomenko E.P. Sostoyanie alyuminiya (III) v vodnykh rastvorakh [The State of Aluminum (III) in Aqueous Solutions]. *Khimiya i tekhnologiya vody*, 1982, vol. 4, no. 2, pp. 136–147.

17. Prismakova A.E., Fedotova M.G., Dyagileva A.B. Poluchenie lignoguminovykh produktov v protsesse ochistki stochnykh vod predpriyatiy lesnogo kompleksa [Obtaining Lignohumin Products in the Wastewater Treatment Process of Forestry Enterprises]. *Sovremennyye problemy ekologii: dokl. XV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern Environmental Issues: Proc. 15th Intern. Sci. Techn. Conf.]. Ed. by V.M. Panarin. Tula, Innovatsionnye tekhnologii Publ., 2016, pp. 4–7. (In Russ.)

18. Rudakova I.S., Molodkina L.M., Chernoberezhskiy Yu.M., Dyagileva A.B. Issledovanie zavisimosti razmerov chastits vodnykh dispersiy sul'fatnogo lignina ot pH metodom fil'tratsii na trekovykh membranakh [Study of the Dependences of Particle Sizes in Aqueous Dispersions of Sulfate Lignin on Ph by the Filtration Through Track-Etched Membranes]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 2007, vol. 69, no. 5, pp. 718–720.

19. Smirnova A.I. *Vliyanie alyumosoderzhashchikh mineral'nykh komponentov tekhnogennogo proiskhozhdeniya na formirovanie organomineral'nykh struktur na osnove sul'fatnogo lignina: dis. ... kand. khim. nauk* [Effect of Aluminum-Containing Mineral Components of Technogenic Origin on the Formation of Organomineral Structures Based on Sulfate Lignin: Cand. Chem. Sci. Diss.]. Saint Petersburg, 2013. 130 p.

20. Smirnova A.I., Dyagileva A.B. Mekhanizm formirovaniya organomineral'nykh struktur na osnove sul'fatnogo lignina i alyumosoderzhashchikh komponentov [Obtaining Organic-Mineral Structure on the Basis of Technical Lignin and Alum-Containing Components]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2011, no. 6, pp. 112–118.

21. Fengel D., Wegener G. *Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin; New York, Walter de Gruyter, 1984. 613 p.

22. Khabarov Yu.G., Gerasimova L.V. Modifikatsiya ligninov putem okislitel'nogo radikal'nogo sochetaniya. 4. Okislitel'noe radikal'noe sochetanie fenol'nykh soedineniy v usloviyakh odnoelektronnogo okisleniya [Lignin Modification through Oxidative Radical Combination. 4. Oxidative Radical Combination of Phenol Compounds in the Conditions of Oneelectron Oxidation]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2001, no. 1, pp. 109–114.

23. Chernoberezhskiy Yu.M., Dyagileva A.B. On the Possible Mechanism of Lignin Removal from Waste Water by Aluminum Sulphate. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 1993, vol. 55, no. 6, pp.138–139.
24. Chudakov M.I. *Promyshlennoe ispol'zovanie lignina* [Industrial Use of Lignin]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 196 p. (In Russ.)
25. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. *Osnovy zol'-gel' tekhnologii nanodispersnogo kremnezema* [Fundamentals of Sol-Gel Technology of Nanodisperse Silica]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 208 p. (In Russ.)
26. Schramm G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Karlsruhe, Gebroeder HAAKE GmbH, 2000. 291 p.
27. Belgacem M.N., Gandini A. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Amsterdam; Boston, Elsevier, 2008. 562 p.
28. Borwankar R.P., Case S.E. Rheology of Emulsions, Foams and Gels. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 1997, vol. 2, iss. 6, pp. 584–586.
29. Carson M., Walter C., Walter S. The Future of Forest Biotechnology. *Forest Biotechnology in Latin America. Proc. Workshop Biotecnología Forestal. Global Biotechnology Forum March 2–5, 2004*. Ed. by R. Kellison, S. McCord, K.M.A. Gartland. Raleigh, Institute for Forest Biotechnology, 2004, pp. 13–40.
30. Durrani C.M., Donald A.M. Physical Characterisation of Amylopectin Gels. *Polymer Gels and Networks*, 1995, vol. 3, iss. 1, pp. 1–27.
31. Galliard T., Bowler P. Morphology and Composition of Starch. *Starch: Properties and Potential*. Ed. by T. Galliard. New York, John Wiley & Sons, 1987. 281 p.
32. Kajiwara Y., Chujo Y. Microwave-enhanced Hybridizations of Biopolymers with Silica: Effective Method for Rapid Preparation and Homogeneous Dispersion. *Polymer Bulletin*, 2011, vol. 66, iss. 8, pp. 1039–1050.
33. Kickelbick G., ed. *Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2007. 516 p.
34. Sarkanen K.V., Ludwig C.H., eds. *Lignins: Occurrence, Formation, Structure, and Reactions*. New York, John Wiley & Sons, 1971. 916 p.
35. Sjöström E. *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. New York, Gulf Professional Publ., 1993. 293 p.
36. Steffe J.F. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. USA, Freeman Press, 1996. 428 p.

Received on January 22, 2018

УДК 658.562.012.7:676.085.2:66.021.3
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.149

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОМЫВКИ СУЛЬФАТНОГО МЫЛА КИСЛОЙ ВОДОЙ И ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ТАЛЛОВОГО МАСЛА ТРЕБОВАНИЯМ СТАНДАРТОВ

С.И. Третьяков, канд. техн. наук, проф.

А.А. Глуханов, канд. техн. наук

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

Основная проблема промышленных способов получения таллового масла – значительные его потери с отходами производства. Причиной является присутствие в сырье лигнина, вызывающего эмульгирование масла в кислой воде с образованием стойкой эмульсии. Известные способы ее разрушения либо малоэффективны, либо связаны со значительными затратами энергии. Уменьшить количество эмульсии можно удалением лигнина из сульфатного мыла, как правило, промывкой в щелочной среде. Целью настоящей работы являлось изучение промывки сульфатного мыла в кислой среде с оптимизацией режима по минимуму содержания лигнина в мыле, а также оценка соответствия показателей качества таллового масла из промытого мыла требованиям российских стандартов. Показано, что при правильном выборе режима промывки оседание лигнина принципиально не препятствует его отделению от мыла. Путем построения четырехфакторного дробного эксперимента подобраны оптимальные значения факторов, влияющих на отделение лигнина при промывке. Проведен анализ качественных показателей получаемого после промывки таллового масла, реализована оценка уровня качества относительно требований технических условий на сырое талловое масло. Установлено, что промывка кислой водой, оказывает положительное действие на качество масла.

Ключевые слова: сульфатное мыло, лигнин, промывка, оптимальный режим, талловое масло, показатели качества, технические условия.

Введение

Одной из основных проблем, возникающих при производстве таллового масла, являются значительные потери готового продукта с отходами производства, составляющие до 200 кг/т, или до 15 % от содержания компонентов таллового масла (суммы смоляных и жирных кислот и неомыляемых веществ – СЖН) в исходном сырье – сульфатном мыле [5]. Главная причина потерь – образование при разложении сульфатного мыла стойкой эмульсии талловое масло–вода–лигнин (так называемой лигнин-талловой эмульсии). В работе [7] показано, что эмульсия относится к типу «масло в воде», а лигнин, в равной степени гидро- и олеофильный, располагается на межфазной поверхности, экранируя поверхность капель масла и препятствуя их коагуляции. Лигнин-

Для цитирования: Третьяков С.И., Глуханов А.А. Оптимизация промывки сульфатного мыла кислой водой и оценка соответствия качества получаемого таллового масла требованиям стандартов // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 149–160. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.149

талловая эмульсия, благодаря специфическим свойствам лигнина как высокомолекулярного стабилизатора, чрезвычайно стойкая.

Проблему можно решить за счет разрушения образующейся эмульсии одним из общепринятых способов или предварительной подготовки сульфатного мыла. Для разрушения лигнин-талловой эмульсии на предприятиях чаще всего используют центробежное разделение в центрифугах [2]. Нами ранее доказана эффективность термической деструкции лигниновой фазы [4] и акустической обработки реакционной смеси, образующейся при разложении сульфатного мыла, наложением ультразвуковых колебаний [3]. Однако вышеперечисленные варианты требуют значительных затрат энергии, к тому же центрифугирование связано с аппаратурными затруднениями.

Подготовка сульфатного мыла предполагает удаление из него лигнина, являющегося причиной формирования лигнин-талловой эмульсии. Лигнин в сульфатном мыле присутствует всегда как растворенный компонент не отстоявшегося из мыла черного щелока [11]. Содержание лигнина в сульфатном мыле определяется главным образом породным составом древесины и концентрацией его в черном щелоке [15]. В сульфатном мыле от варки хвойных пород содержание лигнина составляет 2...4 %, от варки лиственных пород – 6...10 % [5]. Наиболее распространен способ подготовки сульфатного мыла за счет его промывки щелочными технологическими жидкостями: слабым белым щелоком или отстаивающейся после разложения мыла кислой водой, подщелоченной белым щелоком до pH 10 [13]. Предлагаются варианты промывки мыла другими щелочными агентами [12, 14]. Высокое значение pH среды необходимо для исключения осаждения лигнина, что наблюдается при pH ниже 8. Известен способ обработки сульфатного мыла неподготовленной кислой водой при pH 3, который предполагает снижение расхода серной кислоты на разложение [2]. В этом случае вместе с отработанной промывной жидкостью удаляется и часть лигнина, выпадающего в осадок при подкислении мыла. Сведения о том, насколько промывка мыла кислыми агентами эффективна в части удаления лигнина, практически отсутствуют.

Цель настоящей работы – изучение промывки сульфатного мыла кислой водой от разложения, оптимизация режима промывки по минимуму остаточного содержания лигнина в мыле, а также оценка соответствия показателей качества таллового масла требованиям российских документов в области стандартизации [9, 10].

Объекты и методы исследования

Для эксперимента использовали усредненную пробу сульфатного мыла, отобранного на установке разложения сульфатного мыла Архангельского ЦБК. По качественным показателям проба соответствовала марке Л по ТУ 13-0281078-28-118–88 [8]: сумма СЖН – 42,2 %; массовая доля влаги – 45,4 %; общая щелочность – 8,2 %. Содержание лигнина в пробе мыла – 5,9 %. Для оценки качества готового продукта сульфатное мыло подвергали разложению 30 %-й H_2SO_4 по периодическому способу с последующим разделением реакционной смеси гравитационным отстаиванием. Талловое масло, полученное без промывки мыла, соответствовало марке СТМ II сорта по ТУ 13-0281078-119–89 [9].

Сульфатное мыло промывали при температуре 80 °С модельными пробами кислой воды, отстоявшейся из реакционной смеси. Характеристики кис-

лой воды (плотность, кг/м^3 ; кислотность, % H_2SO_4) регулировали добавлением расчетных количеств Na_2SO_4 и H_2SO_4 . Соотношение объемов кислой воды и сульфатного мыла при промывке – 1:1. Отстаивание после промывки проводили при температуре 40, 60 и 80 °С. Первая наиболее эффективна для всплывания солей СЖН, третья – для отстаивания продуктов разложения мыла. После отстаивания получали следующие фазы: мыльную (сульфатное мыло; при высоких значениях кислотности кислой воды – с примесью таллового масла); водную (полупрозрачный раствор темного цвета с рН 4–9 в зависимости от кислотности кислой воды); лигниновую (коричневый осадок в виде мелких хлопьев, распределенный в объеме водной фазы).

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе сульфатное мыло промывали кислой водой различной плотности (исходная кислотность – 2,9 % H_2SO_4). Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

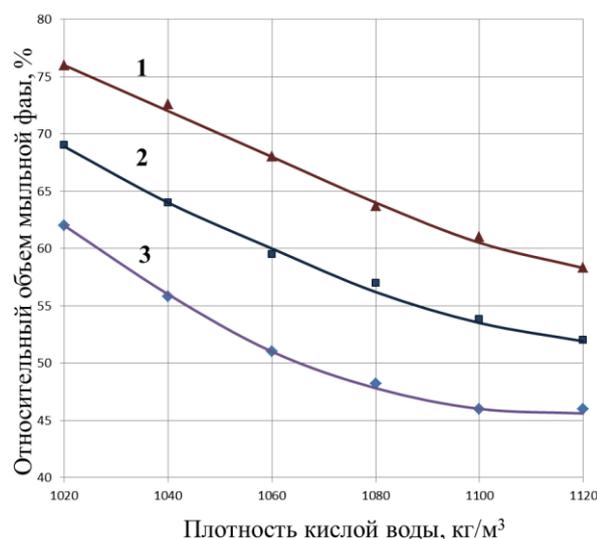


Рис. 1. Зависимость объема мыльной фазы от плотности промывающей кислой воды при разной температуре отстаивания, °С: 1 – 80; 2 – 60; 3 – 40

При плотности промывной жидкости ниже 1040 кг/м^3 расслоение мыльной, водной и лигниновой фаз при отстаивании происходило медленно и не полностью из-за невысокой разности в плотностях фаз и повышенной растворимости солей СЖН в нейтральной среде (рН водной фазы была близка к 7). С ростом плотности кислой воды мыльная фаза формировалась лучше, при плотности выше 1100 кг/м^3 ее объем достигал минимального значения. Причем при температуре отстаивания 40 °С это значение было меньше, чем объем исходного мыла, что свидетельствует о наилучшей эффективности разделения фаз в данных условиях. Температурная зависимость степени расслоения фаз характерна для солей СЖН: с повышением температуры отстаивания смешиваемость водной и мыльной фаз увеличивалась, т. е. с кислотой промывной

жидкости при данной кислотности взаимодействовала только минеральная часть черного щелока, а разложения солей СЖН не происходило.

Затем исследовали влияние кислотности промывной жидкости на отстаивание фаз после промывки. Плотность при этом поддерживали на уровне 1100 кг/м^3 (рис. 2). В выбранном диапазоне зависимость степени расслоения фаз от кислотности кислой воды оказалась более сильной, чем от плотности: при кислотности менее 2 % расслоение фаз происходило в незначительной степени. С ростом кислотности разделение фаз улучшалось, причем при кислотности 3,6 % на кривой отстаивания при температуре 40°C заметен минимум, соответствующий лучшему разделению фаз. Ухудшение разделения фаз при дальнейшем увеличении кислотности в данном случае свидетельствует о том, что кислота начинает расходоваться на разложение солей СЖН, доля свободных кислот таллового масла возрастает, а решающим фактором, определяющим объем мыльной фазы, становится температура отстаивания (в отличие от солей свободные кислоты лучше отстаиваются при высокой температуре). Этот вывод подтверждается и кривыми расслоения фаз: при кислотности кислой воды более 4,5 % лучшее расслоение наблюдается при температуре отстаивания 80°C .

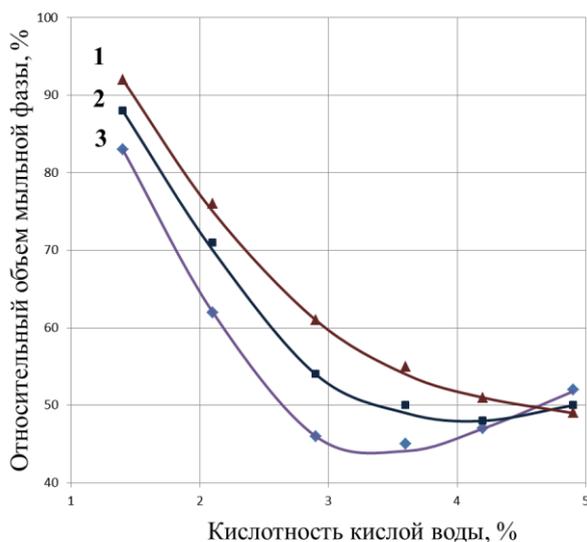


Рис. 2. Зависимость объема мыльной фазы от кислотности промывающей кислой воды при разной температуре отстаивания, °С: 1 – 80; 2 – 60; 3 – 40

Лигниновая фаза в заметном количестве формировалась только при кислотности более 2 %. При кислотности 2...4 % частицы лигнина распределялись в объеме водной фазы, при кислотности более 4 % лигниновая фаза концентрировалась между водной и мыльной фазами, причем граница раздела между лигниновой и мыльной фазами с повышением кислотности размывалась. Переход выделяющегося при подкислении в нерастворенном состоянии лигнина из мыльной в водную фазу можно объяснить следующим образом. С повышением кислотности кислой воды за счет реакций разложения солей

СЖН в мыльной фазе растет содержание компонентов таллового масла, образующих в присутствии воды и нерастворенного лигнина лигнин-талловую эмульсию, в которой лигнин располагается на поверхности раздела фаз. Присутствующие в мыльной фазе соли СЖН, как и лигнин, являются стабилизаторами эмульсий, причем более сильными. Соли СЖН, очевидно, вытесняют с поверхности раздела фаз лигнин, который свободно переходит в водную фазу.

На следующем этапе изучали влияние кислотности кислой воды на эффективность отделения лигнина от мыла. Поскольку при промывке мыла количество и концентрация всех компонентов, формирующих фазы, претерпевают изменения, для оценки эффективности промывки использованы относительные показатели. В качестве характеристики степени очистки мыла от лигнина принято соотношение содержания лигнина и СЖН в мыльной фазе (в исходной пробе сульфатного мыла это соотношение составляло 14 %). Зависимость данной характеристики от кислотности кислой воды представлена на рис. 3.

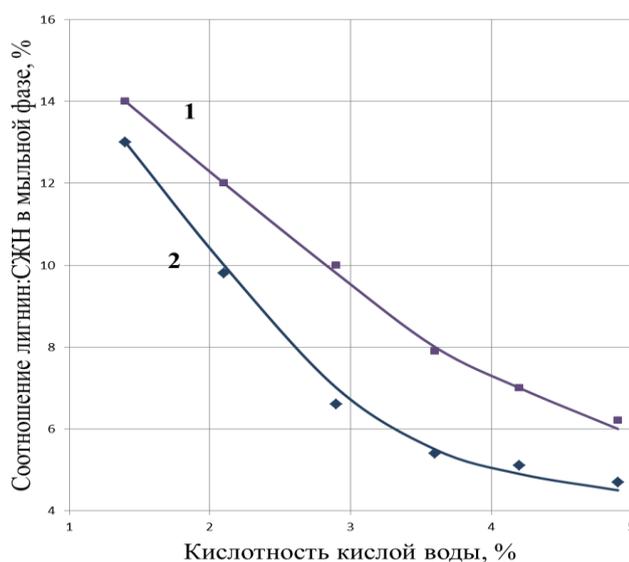


Рис. 3. Зависимость соотношения массового содержания в мыльной фазе лигнина и СЖН от кислотности промывающей кислой воды при разной температуре отстаивания, °С: 1 – 80; 2 – 40

Как видно из рис. 3, соотношение лигнин : СЖН снижается (т. е. количество лигнина, отделяющегося от мыла, увеличивается) во всем интервале кислотности. Процесс отделения лигнина лучше протекает при температуре 40 °С за счет более эффективного разделения фаз. По полученным значениям соотношения лигнин : СЖН можно сделать вывод, что при повышении кислотности промывной жидкости до 5 % в промытом мыле содержание лигнина снижается почти в 3 раза по сравнению с исходным. Следовательно, можно ожидать пропорционального снижения потерь таллового масла при разложении мыла.

При промывке сульфатного мыла кислой водой следует ожидать уноса части компонентов СЖН с отходами промывки. Соли СЖН могут частично

растворяться в водной фазе, хотя этот процесс ограничивается высокими значениями плотности промывной жидкости и низким значением pH. Отделяемый в нерастворенном виде лигнин из-за наличия развитой поверхности может увлекать за собой из мыльной фазы свободные кислоты и нейтральные компоненты СЖН. Для оценки степени протекания этих процессов была введена характеристика распределения содержания СЖН между мыльной фазой и отходами промывки (суммарно водной и лигниновой фазами) и изучено влияние на нее кислотности кислой воды. Результаты представлены на рис. 4.

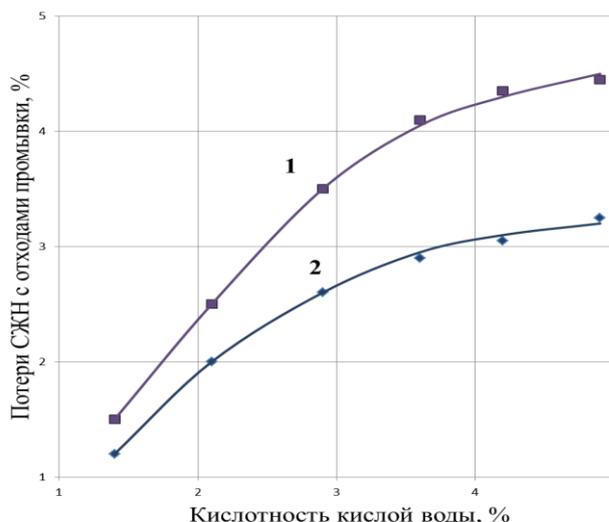


Рис. 4. Зависимость относительной массы потерь СЖН сульфатного мыла от кислотности промывающей кислой воды при разной температуре отстаивания, °С: 1 – 80; 2 – 40

Характер полученной зависимости в значительной степени согласуется с динамикой отделения лигнина из мыльной фазы (см. рис. 3). Потери СЖН с отходами промывки возрастают во всем изученном диапазоне кислотности промывки, нарастание потерь снижается с ростом кислотности. Лучшие результаты (меньшие потери СЖН) достигаются при температуре отстаивания 40 °С в основном по причине большей степени разделения фаз. Таким образом, можно заключить, что потери СЖН при промывке обусловлены практически только их уносом с лигниновой фазой, перехода СЖН и их солей в водный раствор почти не происходит. Следует отметить, что наблюдающиеся при кислотностях 3...4 % и температуре отстаивания 40 °С (предполагаемых как близкие к оптимальным при промывке) потери СЖН в количестве около 3 % от их содержания в сульфатном мыле гораздо ниже, чем потери СЖН при разложении непромытого мыла, составляющие около 15 %.

Поскольку оценка влияния отдельных факторов на процесс промывки не позволяет однозначно определить их оптимальные значения, на следующем этапе реализована оптимизация режима. Для этого построена математическая модель процесса промывки в виде регрессионной зависимости путем постановки четырехфакторного дробного эксперимента [1]. Выходным параметром выбрано отношение содержания лигнина в отходах промывки к его

содержанию в мыльной фазе (распределение лигнина между фазами), как наиболее важная характеристика процесса. На нее влияют плотность и кислотность кислой воды, температура отстаивания и содержание лигнина в исходном сульфатном мыле. Значения факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Диапазоны изменения значений влияющих факторов

Фактор	Значение фактора			Интервал варьирования фактора Δx_i
	1	0	+1	
x_1 – температура, °С	40	60	80	20
x_2 – содержание лигнина в сульфатном мыле, %*	2,3	4,1	5,9	1,8
x_3 – кислотность кислой воды, %	2,3	3,6	4,9	1,3
x_4 – плотность кислой воды, г/см ³	1,040	1,080	1,120	0,040

*Необходимое содержание лигнина достигалось предварительной промывкой исходного сульфатного мыла раствором Na₂SO₄ плотностью 1,18, подщелоченным до pH 10.

В качестве генератора плана выбрано выражение $x_4 = x_1x_2x_3$, определяющий контраст $1 = x_1x_2x_3x_4$. Получена расчетная матрица, представленная в табл. 2.

Таблица 2

Расчетная матрица четырехфакторного дробного эксперимента

x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_4	x_3x_4	y_1	y_2	y_{cp}	S_n^2
–	–	–	–	+	+	0,22	0,20	0,210	0,010
+	–	–	+	+	–	0,69	0,73	0,710	0,020
–	+	–	+	–	–	0,34	0,37	0,355	0,015
+	+	–	–	–	+	1,28	1,23	1,255	0,025
–	–	+	+	–	+	1,76	1,82	1,790	0,030
+	–	+	–	–	–	0,63	0,58	0,605	0,025
–	+	+	–	+	–	0,17	0,15	0,160	0,010
+	+	+	+	+	+	0,84	0,91	0,875	0,035

Оценка воспроизводимости результатов проведена по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S^2_{\max}}{S_e} = \frac{1,8}{28,8} = 0,23 < 0,68 = G_{\text{рас}},$$

т. е. опытные данные хорошо воспроизводятся.

Рассчитав по формулам линейные коэффициенты

$$b_0 = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_n}{N}; b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n}{N}; b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{y}_n}{N},$$

получим уравнение регрессии:

$$y = 0,74 - 4,58x_1 + 0,16x_2 + 11,09x_3 - 0,24x_4 + 3,21x_1x_4 - 0,66x_3x_4.$$

Доверительный интервал, рассчитанный по критерию Фишера с учетом дисперсий коэффициентов, составил 1,1, т. е. третий, пятый и седьмой члены уравнения оказались незначимы.

Критерий Фишера равен 0,72, что меньше табличного значения ($F_{\text{табл}} = 3,84$). Следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно эксперименту.

Проверка значимости квадратичных эффектов показала, что ими можно пренебречь. Окончательно уравнение приняло следующий вид:

$$y = 0,74 - 4,58x_1 + 11,09x_3 + 3,21x_1x_4.$$

Наиболее сильно в выбранных пределах изменения переменных на распределение лигнина между фазами влияет кислотность кислой воды, увеличивающая относительное содержание лигнина в отходах промывки. Повышение температуры оказывает существенное отрицательное влияние на выходной параметр. От содержания лигнина в сульфатном мыле не зависит распределение его между водной и мыльной фазами, т. е. установленное выше трехкратное снижение содержания лигнина в мыле после промывки соблюдается для любого исходного значения.

Из полученного уравнения и вышерассмотренных зависимостей следует, что для наилучшего отделения лигнина из мыла необходимо для промывки использовать кислую воду, имеющую кислотность 3...4 % серной кислоты плотностью не менее 1100 кг/м³, а отстаивание проводить при температуре около 40 °С.

Для оценки качества таллового масла, получаемого после промывки сульфатного мыла, и динамики его изменения при различных значениях кислотности кислой воды был использован дифференциальный метод. Он заключается в сравнении единичных показателей качества оцениваемого продукта (масло после термообработки) с соответствующими базовыми показателями (нормативы по техническим условиям), когда каждый показатель качества P_i сопоставляется с аналогичным базовым показателем качества $P_{i\text{баз}}$. Математически это сопоставление с учетом разделения показателей на позитивные (увеличение которых улучшает качество) и негативные (увеличение которых снижает качество) выражается следующей формулой:

$$k_i = \left(\frac{P_i}{P_{i\text{баз}}} \right)^{\text{sgn } \Delta P_i},$$

где k_i – i -й относительный показатель качества;

$\text{sgn } \Delta P_i$ – сигнум-функция от ΔP_i .

Сигнум-функция от ΔP_i для позитивных показателей (когда $+\Delta P_i > 0$) принимает значение +1, для негативных показателей (когда $+\Delta P_i < 0$) принимает значение –1.

Уровень качества продукта считается приемлемым, когда для всех относительных показателей соблюдается условие $k_i \geq 1$ [6].

Графическое представление результатов оценки качества масла на соответствие требованиям ТУ 13-0281078-119–89 дифференциальным методом отражено на рис. 5.

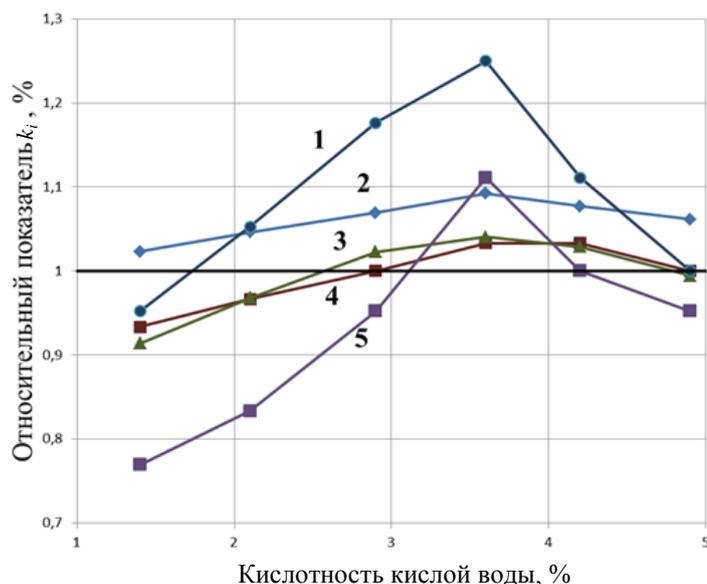


Рис. 5. Зависимость относительных показателей качества таллового масла от кислотности кислой воды: 1 – влажность; 2 – кислотное число; 3 – содержание неомыляемых веществ; 4 – содержание смоляных кислот; 5 – содержание лигнина

Получаемое талловое масло без предварительной промывки соответствовало марке СТМ II сорта по всем показателям, кроме кислотного числа. Однако все качественные показатели лишь в небольшой степени отклоняются от требований к маслу СТМ I сорта. Исходя из того, что промывка сульфатного мыла должна в той или иной степени улучшить качество масла, за базовый уровень при расчете относительных показателей принимали значения, соответствующие СТМ I сорта.

Результаты, представленные на рис. 5, позволяют сделать вывод, что в целом промывка мыла положительно влияет на качество получаемого масла. Снижается содержание примесей воды и лигнина благодаря отделению части последнего при промывке, а также и содержание неомыляемых веществ. Тем самым подтверждается предположение, что отделяющийся из мыла при промывке лигнин уносит на своей поверхности водонерастворимые компоненты таллового масла, к которым при кислотности промывки ниже 3,5 % относятся в основном нейтральные компоненты. Пропорционально снижению доли неомыляемых веществ растет содержание смоляных кислот и кислотное число.

В ходе оценки качества таллового масла по относительным показателям установлено, что талловое масло из мыла, промытого кислой водой кислотностью 3...4 %, по всем показателям качества соответствует марке СТМ I сорта, т. е. благодаря промывке удалось перевести масло в более высокую категорию качества. Однако дальнейшее увеличение кислотности промывной жидкости ухудшает показатели. Так, при кислотности промывки более 5 % качество масла соответствует начальному уровню (масло без промывки).

Кроме того, промывка сульфатного мыла кислой водой снижает потери таллового масла. Причем лучшие показатели достигаются в при кислотности промывки 3...4 %, установленном ранее в качестве оптимального для удаления лигнина из мыла.

Заключение

Промывка сульфатного мыла кислыми агентами, в частности кислой водой от разложения мыла серной кислотой, позволяет удалить часть лигнина (с исходных 6 % от массы мыла до 2 %), благодаря чему примерно в 2 раза снижаются потери таллового масла и улучшается его качество по содержанию неомыляемых веществ без ухудшения других нормированных показателей масла. Требуемые режимные параметры процесса промывки сульфатного мыла: кислотность кислой воды – 3...4 % H_2SO_4 , плотность кислой воды – не менее 1100 кг/м^3 , температура отстаивания после промывки – около 40°C .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович Н.И. Расчеты в планировании эксперимента. Л.: ЛТА, 1978. 80 с.
2. Владимирова Т.М., Третьяков С.И., Жабин В.И., Коптелов А.Е. Получение и переработка талловых продуктов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 155 с.
3. Глуханов А.А., Третьяков С.И. Повышение выхода таллового масла в ультразвуковом поле // Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации: сб. тр. III междунар. науч.-практ. конф., Москва, 28–29 апр. 2015. М.: CreateSpace, 2015. С. 61–65.
4. Глуханов А.А., Третьяков С.И., Соколов О.М. Исследование процесса термообработки, повышающей выход и качество таллового масла // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов: сб. науч. тр. Вып. IV. Архангельск, 1998. С. 85–90.
5. Головин А.И., Трофимов А.Н., Узлов Г.А., Жукова И.П., Киприанов А.И., Прохорчук Т.И., Ковалев В.Е. Лесохимические продукты сульфатцеллюлозного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 288 с.
6. Мишин В.М. Управление качеством. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2005. 463 с.
7. Селянина Л.И., Селянина С.Б. Переработка низкокачественного сульфатного мыла: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 208 с.
8. ТУ 13-0281078-28-118–88. Мыло сырое сульфатное. Технические условия. Горький, 1988. 6 с.
9. ТУ 13-0281078-119–89. Масло талловое сырое. Технические условия. Горький, 1989. 22 с.
10. ТУ 2453-022-00253497–2005. Масло талловое сырое. Технические условия. СПб., 2005. 25 с.
11. Aro Th., Fatehi P. Tall Oil Production from Black Liquor: Challenges and Opportunities // Separation and Purification Technology. 2017. Vol. 175. Pp. 469–480.
12. Bowles R.E., Foran C.D., Griffin J.H., Swann F.E. Method for Producing Crude Tall Oil by Soap Washing with Calcium Carbonate Removal: Patent US, 2012123087A1. 2012.
13. Foran C.D. Tall Oil Soap Recovery. Chemical Recovery in Alkaline Pulping Processes. Atlanta: TAPPI Press, 1992. Pp. 45–56.
14. Hofstedt A. Method and System for Washing of Crude Tall Oil Soap: Patent WO/2016/093765. 2016.
15. Panda H. Handbook on Tall Oil Rosin Production, Processing and Utilization. Delhi: Asia Pacific Business Press Inc., 2013. 480 p.

UDC 658.562.012.7:676.085.2:66.021.3
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.149

Optimization of Sulphate Soap Washing with Acid Water and the Quality Conformance Assessment of Tall Oil with Regulatory Requirements

S.I. Tret'yakov, Candidate of Engineering Sciences, Professor

A.A. Glukhanov, Candidate of Engineering Sciences

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

The key problem of industrial methods for obtaining tall oil is its significant losses with production waste. The reason is the presence of lignin in the raw material, which causes emulsification of the oil in acid water with formation of a stable emulsion. Known ways to destroy it are ineffective and involve significant energy costs. The amount of emulsion can be reduced by removing lignin from sulphate soap, usually by washing in an alkaline medium. The purpose of this work was to study the washing of sulphate soap in an acidic environment, optimizing the regime for minimum lignin content in soap, and assessing the compliance of the quality indicators of tall oil from washed soap to the requirements of Russian standards. Lignin subsidence does not prevent its separation from soap if the washing regime is selected correctly. By constructing a four-factorial fractional experiment, the optimal values of the factors influencing the separation of lignin during washing are obtained. The analysis of the quality parameters of tall oil obtained after washing has been carried out, the quality level has been estimated in relation to the specifications for crude tall oil. The acid water washing has a positive effect on the oil quality.

Keywords: sulphate soap, lignin, washing, optimum performance, tall oil, quality index, specifications.

REFERENCES

1. Bogdanovich N.I. *Raschety v planirovanii eksperimenta* [Calculations in the Design of Experiments]. Leningrad, 1978. 80 p. (In Russ.)
2. Vladimirova T.M., Tret'yakov S.I., Zhabin V.I., Koptelov A.E. *Poluchenie i pererabotka tallovykh produktov* [Production and Processing of Tall Products]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 155 p. (In Russ.)
3. Glukhanov A.A., Tret'yakov S.I. Povyshenie vykhoda tallovogo masla v ul'trazvukovom pole [Increase of the Yield of Tall Oil in Ultrasonic Field]. *Noveyshie issledovaniya v sovremennoy nauke: opyt, traditsii, innovatsii: sb. tr. III mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 28–29 apr. 2015* [The Latest Research in Modern Science: Experience, Traditions, Innovations: Coll. Papers 3d Intern. Sci. Practical Conf. Moscow, April 28–29, 2015]. Moscow, CreateSpace Publ., 2015, pp. 61–65. (In Russ.)
4. Glukhanov A.A., Tret'yakov S.I., Sokolov O.M. Issledovanie protsessov termooobrabotki, povyshayushchey vykhod i kachestvo tallovogo masla [Investigation of the Heat Treatment Process Increasing the Yield and Quality of Tall Oil]. *Okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov: sb. nauch. tr. Vyp. IV* [Protection and Rational Use of Forest Resources: Collection of Research Papers. Iss. IV]. Arkhangelsk, 1998, pp. 85–91. (In Russ.)

For citation: Tret'yakov S.I., Glukhanov A.A. Optimization of Sulphate Soap Washing with Acid Water and the Quality Conformance Assessment of Tall Oil with Regulatory Requirements. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 149–160. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.149

5. Golovin A.I., Trofimov A.N., Uzlov G.A., Zhukova I.P., Kiprianov A.I., Prokhorchuk T.I., Kovalev V.E. *Lesokhimicheskie produkty sulfatsellyuloznogo proizvodstva* [Wood Chemical Products of Sulfate-Cellulose Production]. Moscow, 1988. 288 p. (In Russ.)
6. Mishin V.M. *Upravlenie kachestvom* [Quality Management]. Moscow, 2005. 463 p. (In Russ.)
7. Selyanina L.I., Selyanina S.B. *Pererabotka nizkokachestvennogo sulfatnogo myla* [Processing of Low-Quality Sulphate Soap]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 208 p. (In Russ.)
8. TU 13-0281078-28-118–88. *Mylo syroe sulfatnoe. Tekhnicheskie usloviya* [Technical Specifications 13-0281078-28-118–88. Crude Sulphate Soap. Specifications]. Gorky, 1989. 22 p.
9. TU 13-0281078-119–89. *Maslo tallovoe syroe. Tekhnicheskie usloviya* [Technical Specifications 13-0281078-119–89. Crude Tall Oil. Specifications]. Gorky, 1988. 6 p.
10. TU 2453-022-00253497–2005. *Maslo tallovoe syroe. Tekhnicheskie usloviya* [Technical Specifications 2453-022-00253497–2005. Crude Tall Oil. Specifications]. Saint Petersburg, 2005. 25 p.
11. Aro Th., Fatehi P. Tall Oil Production from Black Liquor: Challenges and Opportunities. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 175, pp. 469–480.
12. Bowles R.E., Foran C.D., Griffin J.H., Swann F.E. *Method for Producing Crude Tall Oil by Soap Washing with Calcium Carbonate Removal*. Patent US, 2012123087A1, 2012.
13. Foran C.D. Tall Oil Soap Recovery. *Chemical Recovery in Alkaline Pulping Processes*. Atlanta, TAPPI Press, 1992, pp. 45–56.
14. Hofstedt A. *Method and System for Washing of Crude Tall Oil Soap*. Patent WO/2016/093765, 2016.
15. Panda H. *Handbook on Tall Oil Rosin Production, Processing and Utilization*. Delhi, Asia Pacific Business Press Inc., 2013. 480 p.

Received on January 22, 2018

ПОЗДРАВЛЯЕМ!

МЮЛЛЕРУ ОСКАРУ ДАВЫДОВИЧУ – 70 ЛЕТ

25 марта 2018 года исполнилось 70 лет известному ученому, доктору технических наук Оскару Давыдовичу Мюллеру.

Оскар Давыдович начал свою трудовую биографию токарем-расточником на крупнейшем предприятии. В 1968 г. он поступил в Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, где получил энциклопедическое базовое образование и стал квалифицированным инженером. Постоянные творческие поиски привели Оскара Давыдовича в очную аспирантуру, после окончания которой он защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук и продолжил работу в Северодвинском филиале Ленинградского кораблестроительного института (Севмашвтуз)



ассистентом, старшим преподавателем, доцентом, заведующим кафедрой.

Область научных интересов Оскара Давыдовича многогранна, но в целом они направлены на развитие инновационных технологических решений по повышению энергоэффективности применения биоресурсов, использованию возобновляемых источников энергии и вторичного древесного сырья. При Севмашвтузе в 1989 г. им была создана научно-исследовательская лаборатория (НИЛ «Энергия»), выполнены многочисленные исследования по направлению «Исследование и разработка методов совершенствования технологического процесса получения гранулированного топлива из древесного сырья, как возобновляемого источника энергии» в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и др.

По результатам проведенных комплексных исследований О.Д. Мюллер подготовил и защитил в 2015 г. диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по теме «Совершенствование технологии производства древесных гранул». Под его руководством создана научная школа, его учениками и коллегами выполнены и защищены кандидатские диссертации.

Он избран членом-корреспондентом Академии инженерных наук РФ им. А.М. Прохорова. Является членом диссертационного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций, членом редакционной коллегии

журнала «Научно-технические ведомости Севмашвуза», автором более 90 научных работ, 60 статей в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, 15 патентов на объекты интеллектуальной собственности. Отмечен знаками «Изобретатель РФ», «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», «Ветеран труда».

От всей души желаем юбиляру доброго здоровья, новых свершений, осуществления творческих планов.

С юбилеем Вас, дорогой Оскар Давыдович!

В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева, А.И. Лычаков,

Т.В. Тюрикова, В.И. Мелехов

Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА В.В. БЕЛЯЕВА

21 июня 2018 г. отмечает 70-летний юбилей известный специалист в области лесоводственных основ повышения эффективности искусственного лесовосстановления на Европейском Севере России, Владимир Васильевич Беляев, профессор, доктор сельскохозяйственных наук, почетный работник высшего профессионального образования РФ, член-корреспондент Петровской академии наук и искусств, действительный член Русского географического общества, главный научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики РАН им. академика Н.П. Лаврова (ФИЦКИА РАН).



В.В. Беляев – лесовод-лесокультурник, известный широкому кругу научной общественности и практикам лесного хозяйства в России и за ее пределами. Вся его жизнь связана со служением лесу и воспитанием служителей леса.

После окончания в 1971 г. Архангельского лесотехнического института им. В. Куйбышева (ныне – Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (САФУ)) работал лесничим Кулойского лесничества. С 1976 г. – научный сотрудник лаборатории лесных культур Архангельского института леса и лесохимии.

В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию («Лесокультурная оценка изменчивости биометрических показателей ели и сосны в Архангельской области»), в 1997 г. – докторскую диссертацию («Эколого-лесоводственные основы повышения эффективности искусственного лесовосстановления на Европейском Севере»). В 2003 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре географии и геоэкологии Поморского государственного университета (ПГУ) им. М.В. Ломоносова (ныне – САФУ). В 2006 г. избран членом-корреспондентом Петровской академии наук и искусств.

С 1997 по 2014 г. – профессор кафедры географии и геоэкологии естественно-географического факультета ПГУ–САФУ.

В качестве ведущего научного сотрудника, руководителя группы экологии леса с 1998 г. он проводит фундаментальные научные исследования

в Институте экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (ныне – ФИЦКИА РАН). С 2013 г. и по настоящее время – главный научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы института геодинамики и геологии ФИЦКИА РАН.

Результаты его исследований по вопросам экологии вырубок свидетельствуют, что концентрированные рубки леса на огромных площадях Европейского Севера России становятся одним из основных факторов антропогенного воздействия на тайгу. Смена породного состава лесов этого региона в результате рубок, снижение их продуктивности обедняют экономическое содержание тайги и ощущаются как реальные процессы ослабления производительных сил природы.

Им доказана возможность селекции ели на заморозкоустойчивость, что является новым направлением в повышении эффективности ее восстановления в регионах, где заморозки существенно снижают качество, прежде всего, искусственных насаждений. Установлено, что лесные насаждения в местах с разным уровнем конвективного теплового потока Земли (КТПЗ) очень существенно отличаются по запасу древесины, хотя имеют сходный тип, возраст и состав древостоя.

Выявлена своеобразная концентрация высокобонитетных насаждений в местах с высоким уровнем КТПЗ, приуроченная к узлу пересечения глубинных разломов. Особый интерес представляют распространение территорий с разным уровнем КТПЗ и их отражение в геосистемах различного ранга. Пространственный анализ границ с высоким уровнем КТПЗ показывает определенную степень корреляции между отдельными единицами геоморфологического, почвенно-экологического и ландшафтного районирования, а также породного состава лесов по ландшафтам.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что пространственная организация высокопроизводительных древостоев и биоразнообразия в тайге зависят от азональных факторов, в частности от литогенной основы, которая имеет тектонические, геоморфологические и геофизические критерии.

В.В. Беляевым подготовлено 5 кандидатов наук, он является членом диссертационного совета по защите докторских диссертаций при САФУ.

Им опубликовано около 200 работ, в том числе 5 монографий, совместно с И.А. Потаповым подготовлено учебное пособие на актуальную тему «Заморозки и их изучение» (2003 г.).

Владимир Васильевич активно участвует в международных и региональных научных конференциях (работа в оргкомитетах, выступление с докладами, публикация материалов), а также в выполнении научных исследований по проектам федеральных целевых программ, международных научных и научно-технических программ, грантам РФФИ, РГНФ, региональных научных и научно-технических программ, договорам с хозяйствующими субъектами.

В 2009 г. награжден нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Уважаемый Владимир Васильевич! Коллеги и ученики сердечно поздравляют Вас с юбилеем и желают Вам крепкого здоровья, долголетия, благополучия, оптимизма и новых достижений в науке.

Б.В. Ермолин¹, Н.А. Неверов²

¹Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова

²Федеральный исследовательский центр комплексного
изучения Арктики им. акад. Н.В. Лаверова
