

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

4/370

2019

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Билей П.В., д-р техн. наук, проф., акад. ЛАН Украины (Украина, Львов)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Малыгин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Северодвинск)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Моисеев Н.А., д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Романов Е.М., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Тараканов А.М., д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр. (Россия, Архангельск)
Тельшева Г.М., д-р хим. наук, проф. (Латвия, Рига)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Черная Н.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Беларусь, Минск)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Ширнин Ю.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Штукин С.С., д-р с.-х. наук, проф. (Республика Беларусь, Минск)
Энгельмани Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

BULLETIN
OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Lesnoy Zhurnal

(Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

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

4/370

2019

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Biley P.V., Doctor of Engineering, Prof., Member of the Forest Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Lviv)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry Sciences, Prof., Member of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Malygin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Severodvinsk)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Moiseev N.A., Doctor of Agriculture, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Romanov E.M., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Tarakanov A.M., Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist (Russia, Arkhangelsk)
Telysheva G.M., Doctor of Chemistry, Prof. (Latvia, Riga)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Chernaya N.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic Belarus, Minsk)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shirnin Yu.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shtukin S.S., Doctor of Agriculture, Prof. (Republic Belarus, Minsk)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>В.А. Брынцев, М.А. Лавренов.</i> Селекционно-генетический анализ лиственниц сибирской и Сукачева, интродуцированных в Москву и Подмоскowie.....	9
<i>В.В. Нарзаяев, Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова, Ю.Е. Щерба.</i> Изменчивость вегетативного потомства плюсовых деревьев кедра сибирского, аттестованных по стволковой или семенной продуктивности.....	22
<i>О.В. Грибачева.</i> Современное состояние полезащитной полосы с участием дуба черешчатого (<i>Quercus robur</i> L.) и клена остролистного (<i>Acer platanoides</i> L.).....	34
<i>Д.М. Черниковский, А.С. Алексеев.</i> Метод определения характеристик лесов на основе материалов дистанционного зондирования Земли, данных лесоустройства и алгоритма k-NN (на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области).....	45
<i>Р.С. Хамитов, С.А. Корчагов, М.Д. Мерзленко, В.Ф. Ковязин, Е.Н. Кузнецов.</i> Связь диссимметрии шишек сосны кедровой сибирской с формированием в них семян.....	66
<i>О.О. Вронская, Л.Л. Седельникова.</i> Морфобиологический анализ представителей рода <i>Lilium</i> (Liliaceae) в северной лесостепи Западной Сибири.....	74
<i>И.Т. Кищенко.</i> Влияние температуры воздуха на сезонный рост хвойных лесобразующих видов в таежной зоне (Карелия).....	84

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>К.П. Рукомойников, А.П. Мохирев.</i> Обоснование технологической цепочки лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия.....	94
<i>В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев.</i> Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом.....	108

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>В. Моаземи, М. Ходадади, Ф. Афсуни, Х. Хатефния.</i> Влияние сезонных температурных изменений на эффективность производства древесноволокнистых плит средней плотности (на примере завода Arjan Sina).....	124
<i>А.С. Торопов, В.Е. Бызов, С.А. Торопов.</i> Производство пиломатериалов для строительства из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью.....	133
<i>В.И. Мелехов, Л.В. Кремлева, Т.В. Тюрикова, Е.В. Сазанова, Д.В. Лужанский, В.А. Слуцков.</i> Экспериментальное исследование динамики процесса обработки древесины концевыми фрезами.....	146

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Е.Л. Седова, К.Б. Воронцов, С.А. Буркова.* Влияние условий коагуляционной обработки на эффективность очистки лигнинсодержащей сточной воды по данным планированного эксперимента..... 159
- Р.А. Смит, Е.Ю. Демьянцева, О.С. Андранович.* Анализ состояния смолы при обессмоливании сульфатной лиственной целлюлозы..... 168
- К.С. Болотова, О.В. Травина, А.С. Аксенов, М.В. Емельянова, В.А. Рудакова, А.В. Канарский.* Биоконверсия целлюлозосодержащих материалов в условиях арктического региона..... 179

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- П.А. Куза.* Оценка термоустойчивости дуба черешчатого и дуба скального и степени их адаптации к влиянию теплового шока..... 187
- А.Н. Заикин, В.В. Сиваков, Е.В. Шевелева.* Методы снижения повреждаемости стволов деревьев при выборочных и санитарных рубках леса..... 200
- Е.Н. Покровская, Д.В. Агапов, Ю.Л. Ковальчук.* Микологическое обследование древесины исторических объектов культурного наследия..... 212
-



CONTENTS

FORESTRY

V.A. Bryntsev, M.A. Lavrenov. Genetic Selection Analysis of Siberian and Sukachev Larches Introduced in Moscow and Moscow Region.....	9
V.V. Narzyaev, R.N. Matveeva, O.F. Butorova, Yu.E. Shcherba. Variability of Vegetative Progeny of Siberian Pine Plus Trees Certified for Stem or Seed Productivity.....	22
O.V. Gribacheva. The Current State of Shelterbelt Featuring English Oak (<i>Quercus robur</i> L.) and Norway Maple (<i>Acer platanoides</i> L.).....	34
D.M. Chernikhovskii, A.S. Alekseev. The Method for Determining Forest Characteristics Based on Earth Remote Sensing Materials, Forest Management Data and the k-NN Algorithm (Case Study of Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region).....	45
R.S. Khamitov, S.A. Korchagov, M.D. Merzlenko, V.F. Kovyazin, E.N. Kuznetsov. Correlation between Dissymmetry of Siberian Pine Cones and Formation of Seeds in Them.....	66
O.O. Vronskaya, L.L. Sedelnikova. Morphological Analysis of the Genus <i>Lilium</i> (Liliaceae) in the Northern Forest Steppe of Western Siberia.....	74
I.T. Kishchenko. The Influence of Air Temperature on Seasonal Growth of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Karelia).....	84

WOOD EXPLOITATION

K.P. Rukomojnikov, A.P. Mokhirev. Validation of the Logging Operations' Chain through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning.....	94
V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov, V.V. Posmetyev. Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer.....	108

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

V. Moazami, M. Khodadadi, F. Afsooni, H.Hatefnia. The Effect of Seasonal Temperature Variations on the Production Efficiency of Medium Density Fiberboard (Case Study of Arian Sina Company).....	124
A.S. Toropov, V.E. Byzov, S.A. Toropov. Lumber Production for Construction from Round Timber with Heart Rot.....	133
V.I. Melekhov, L.V. Kremleva, T.V. Tyurikova, E.V. Sazanova, D.V. Luzhansky, V.A. Slutskov. Experimental Study of the Woodworking Dynamics with End Milling Cutters.....	146

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- E.L. Sedova, K.B. Vorontsov, S.A. Burkova.* Influence of Coagulation Treatment on the Efficiency of Lignin Containing Wastewater Purification..... 159
- R.A. Smith, E.Yu. Demyantseva, O.S. Andranovich.* Analysis of the Resin Forms in the Process of the Short Fiber Sulphate Cellulose Deresination..... 168
- K.S. Bolotova, O.V. Travina, A.S. Aksenov, M.V. Emelyanova, V.A. Rudakova, A.V. Kanarskiy.* Bioconversion of the Cellulose-containing Materials in the Arctic Region Conditions..... 179

BRIEF SUMMARIES

- P.A. Cuza.* Evaluation of the Thermostability of English Oak and Rock Oak and Their Degree of Adaptation to the Effects of Heat Shock..... 187
- A.N. Zaikin, V.V. Sivakov, E.V. Sheveleva.* Methods to Reduce Damage of the Tree Trunks During Selective and Sanitary Forest Felling Operations..... 200
- E.N. Pokrovskaya, D.V. Adapov, Yu.L. Kovalchuk.* Mycological Investigation of a Wood Substance of Historic Cultural Heritage..... 212
-



УДК 630*165.51

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.9

СЕЛЕКЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛИСТВЕННИЦ СИБИРСКОЙ И СУКАЧЕВА, ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ В МОСКВУ И ПОДМОСКОВЬЕ

В.А. Брынцев^{1,2}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: O-4591-2019,

ORCID: 0000-0002-6271-1444

М.А. Лавренов¹, ст. преподаватель; ResearcherID: E-2995-2018,

ORCID: 0000-0001-9708-9037

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия, 141005; e-mail: bryntsev@mail.ru, maxlavrenov93@mail.ru

²Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, Москва, Россия, 127276; e-mail: bryntsev@mail.ru

Вопрос о таксономическом статусе лиственницы Сукачева до сих пор до конца не изучен. Существуют аргументы как в пользу выделения лиственниц сибирской и Сукачева в самостоятельные виды, так и объединения их в один вид. Большое значение имеют работы по интродукции лиственниц в центр европейской части России для повышения ресурсного потенциала лесов этого региона. Изучение изменчивости лиственниц сибирской и Сукачева в новых климатических условиях, которые имеют место при интродукции, может дать интересные результаты, важные не только для обсуждения их таксономического ранга, но и для практических интродукционных целей. В ходе эксперимента проведено сравнение лиственниц сибирской и Сукачева по индивидуальной изменчивости морфологических признаков и результатам молекулярно-генетического анализа. Объекты исследования произрастали в условиях интродукции в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина (Москва) и в Ивантеевском дендрологическом саду (Подмосковье). Изучены морфологические признаки шишек, хвои и семян: длина и ширина шишек, число чешуй в них, длина хвои, длина и ширина семян. Рассчитаны средние арифметические величины признаков, ошибка средних арифметических величин признаков, коэффициент вариации. Установлены достоверные отличия морфологических признаков шишек, семян и хвои, что позволяет выделить лиственницу Сукачева в качестве географической расы, подвида лиственницы сибирской.

Для цитирования: Брынцев В.А., Лавренов М.А. Селекционно-генетический анализ лиственниц сибирской и Сукачева, интродуцированных в Москву и Подмосковье // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 9–21. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.9

Ключевые слова: лиственница сибирская, лиственница Сукачева, интродукция, вид.

Введение

Лиственница находит широкое применение благодаря прочной и долговечной древесине. Она отличается морозостойкостью, засухоустойчивостью, быстрым ростом, устойчивостью против повреждения грибами и насекомыми

[3, 10, 15–17, 21, 24]. В связи с этим большое значение имеют работы по ее интродукции в центр Европейской России для повышения ресурсного потенциала лесов этого региона [8, 13].

Лиственницы Сукачева и сибирскую культивируют в России с XVIII в. К началу XIX в. лиственница Сукачева была введена в культуру в Англии, позднее в Швеции [17].

Род *Larix* по строению укороченных и удлиненных побегов сходен с одним из древнейших в семействе Pinaceae родом *Cedrus* и реликтовым родом *Pseudolarix*. С последним их сближает еще и осеннее пожелтение и опадение хвои. Генетически род *Larix* обособился от этих родов очень давно, более чем 150 млн лет назад [25], по другим данным – около 200 млн лет назад [26]. Среди представителей семейства Pinaceae род *Larix* отличается небольшой длиной генома, из чего можно сделать предположение о долгом нахождении рода, а первоначально и вида после его обособления, в эволюционно неактивном состоянии [23]. Это делает род *Larix* претендентом на стволочный вид (род) в семействе Pinaceae.

Около 50 млн лет назад род *Pseudotsuga* отделился от рода *Larix*. Это случилось примерно в одно время с разделением рода *Pinus* на два подрода *Pinus* и *Strobus* или даже позднее. Адаптивная реакция, когда стали выделяться современные виды рода *Larix*, относится к периоду последних 10...3 млн лет [25]. Это говорит о том, что род *Larix* и в настоящее время находится в состоянии эволюционной активности, что отражается на обширности его ареала и нечеткости его внутривидовой систематики. Число видов лиственницы, признаваемое отдельными систематиками, варьирует от 6 до 29 [20].

Для интродукции и проведения селекционных работ (гибридизация, отбор) таксономический статус имеет существенное значение. Как вид лиственница Сукачева была выделена Н.В. Дылисом, который при характеристике вида основным диагностическим признаком считал морфологические особенности шишек и семян [5, 6, 9]. При указании отличительных черт лиственниц сибирской и Сукачева, что позволило выделить последнюю в самостоятельный вид, Н.В. Дылис особое внимание уделял размерам шишек. Его исследования, проведенные в условиях естественного ареала, показали, что лиственница Сукачева имеет более крупные шишки с большей шириной и менее изменчивой формой по сравнению с лиственницей сибирской. Семена лиственницы Сукачева также значительно крупнее [5].

Однако видовая самостоятельность лиственницы Сукачева является сомнительной для многих исследователей [1, 2, 18, 22]. С одной стороны, в литературе приводятся отличия лиственницы сибирской от лиственницы Сукачева по ряду морфологических и биохимических признаков [1, 22], с другой – имеются аргументы против выделения лиственницы Сукачева в самостоятельный вид. В частности, результаты исследований Л.И. Милютина, А.Я. Муратовой, А.Я. Ларионовой [1, 12] указывают на отсутствие существенных генетических и кариологических различий между лиственницами сибирской и Сукачева. Е.Г. Бобров [2] сделал категоричный вывод о том, что лиственницы сибирская и Сукачева не отличаются друг от друга по генетическим, цитологическим, кариологическим, морфологическим и географическим признакам. Не все соглашались с такими выводами, поскольку ряд различий между лиственницами сибирской и Сукачева безусловно существует. К ним относятся морфологические особенности, географическое распространение, отличия

в экологии. Однако пока не ясно, достаточно ли они значимы для присвоения лиственнице Сукачева видового статуса [1].

Изучение изменчивости лиственниц сибирской и Сукачева в новых климатических условиях, которые имеют место при интродукции, может дать интересные результаты как для обсуждения их таксономического ранга, так и для практических интродукционных целей.

Цель исследования – проведение сравнительного анализа изменчивости морфологических признаков лиственниц сибирской и Сукачева в условиях интродукции в Москву и Подмоскowie.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись лиственницы Сукачева и сибирская в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина – ГБС (Москва) и в Ивантеевском дендрологическом саду – ИДС (Ивантеевка, Московская область).

В ГБС лиственница сибирская находится с 1937 г. 133 экземпляра выращены из семян, полученных из Красноярска и Горно-Алтайска [4]. Лиственница Сукачева (30 экз. выращены из семян, полученных из Кировской области) посажена в 1953 г. [4].

В ИДС группа деревьев лиственницы сибирской находится в квартале 10. Она выращена из семян, собранных с деревьев зеленошишечной формы этого вида в Иркутском лесхозе [7]. Средний возраст деревьев на момент обследования – 65 лет. Лиственница Сукачева располагается также в квартале 10. Выращена из семян от Златоусского лесхоза (Челябинская область) и посажена в экспозицию в возрасте 3 лет в 1952 г. [4].

Изучались морфологические признаки шишек, хвои и семян: длина и ширина шишек, число чешуй в шишках, длина хвои, длина и ширина семян. Для определения каждого из показателей было подготовлено и проанализировано 100 образцов.

В ходе исследования рассчитывались среднее значение арифметической величины признака (X_{cp}), ошибка средней арифметической величины признака (S_x) и коэффициент вариации (V , %).

Коэффициент вариации оценивался по шкале изменчивости признаков С.А. Мамаева [11, 14]. Если уровень индивидуальной изменчивости низкий или очень низкий, то выборка считалась однородной по данному признаку.

Достоверность различий между выборками определялась по критерию Стьюдента (t) [19]. Табличный критерий для всех сравниваемых показателей $t_{0,05} = 2,0$.

Молекулярно-генетический анализ (ДНК-анализ) образцов хвои изучаемых видов лиственниц и получение электрофореграмм проводились в лаборатории генетики Российского центра защиты леса Федерального агентства лесного хозяйства при Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Для выделения суммарной ДНК пользовались одним из видов молекулярно-генетического анализа – СТАВ-методом.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительный анализ изменчивости морфологических признаков видов рода Larix Mill. Исследована индивидуальная изменчивость хвои, шишек и семян лиственниц сибирской и Сукачева. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 1, 3, 6, 8, коэффициенты t для морфологических признаков шишек и хвои – в табл. 2, 4, 5, 7.

Данные, приведенные в табл. 1 свидетельствуют, что по такому существенному признаку, как длина хвои, имеются отличия между лиственницами, при этом средняя длина хвои у лиственницы Сукачева выше, чем у лиственницы сибирской. Следует отметить высокую изменчивость данного признака. По шкале Мамаева [11, 14] варьирование его находится на высоком уровне.

Таблица 1

Сравнительный анализ изменчивости лиственниц сибирской и Сукачева по длине хвои

Лиственница	$X_{ср}$, мм	S_x , мм	V, %
Сибирская:			
ГБС	24,9	±0,44	21,8
ИДС	24,1	±0,43	21,9
Сукачева:			
ГБС	30,5	±0,64	25,3
ИДС	32,8	±0,61	22,6

Несмотря на высокий уровень изменчивости данного признака (табл. 2), лиственница Сукачева значительно отличается от лиственницы сибирской по длине хвои. При этом отличия между лиственницей сибирской из ИДС и ГБС незначимы, а между лиственницей Сукачева из этих двух мест хотя и значимы, но коэффициент t намного ниже, чем между лиственницами сибирской и Сукачева.

Таблица 2

Значимость разности между средней длиной хвои лиственниц сибирской и Сукачева

Лиственница	Сибирская		Сукачева	
	ГБС	ИДС	ГБС	ИДС
Сибирская:				
ГБС	–	1,30	7,21	10,50
ИДС	1,30	–	8,30	11,66
Сукачева:				
ГБС	7,21	8,30	–	2,60
ИДС	10,50	11,66	2,60	–

Примечание. Достоверные отличия в табл. 2, 5, 7 выделены жирным шрифтом.

Из табл. 3 видно, что средняя длина шишек выше у лиственницы Сукачева, произрастающей в ГБС, однако при этом и наименьшая средняя длина шишек отмечается у лиственницы Сукачева, но из ИДС. Данный признак показал средний и высокий уровни изменчивости.

Таблица 3

Сравнительный анализ изменчивости лиственниц сибирской и Сукачева по размерам шишек

Лиственница	Длина шишек			Ширина шишек		
	$X_{ср}$, мм	S_x , мм	V, %	$X_{ср}$, мм	S_x , мм	V, %
Сибирская:						
ГБС	31,1	±0,54	21,3	28,3	±0,42	18,0
ИДС	29,9	±0,46	18,7	25,1	±0,33	16,2
Сукачева:						
ГБС	32,3	±0,35	13,5	19,8	±0,26	16,0
ИДС	28,1	±0,38	16,5	21,0	±0,32	18,7

Средняя ширина шишек лиственницы сибирской выше, чем у лиственницы Сукачева. Данный признак варьирует на среднем уровне.

Показатели лиственницы сибирской из ИДС и ГБС отличались незначимо, при этом незначимые отличия по длине шишек проявились и между лиственницами Сукачева и сибирской, произрастающими в ГБС (табл. 4). Между другими вариантами исследования отличия по длине шишек были значимы. Длина шишек показала себя как крайне нестабильный признак.

Таблица 4

Значимость разности между средней длиной шишек лиственниц сибирской и Сукачева

Лиственница	Сибирская		Сукачева	
	ГБС	ИДС	ГБС	ИДС
Сибирская:				
ГБС	–	1,69	1,86	4,54
ИДС	1,69	–	4,15	3,02
Сукачева:				
ГБС	1,86	4,15	–	8,13
ИДС	4,54	3,02	8,13	–

Лиственница Сукачева значимо отличается от лиственницы сибирской по ширине шишек (табл. 5). Значимые отличия были и между разными местами наблюдения в пределах видов, однако коэффициент t был значительно ниже, что говорит о несколько более сильных межвидовых различиях.

Таблица 5

Значимость разности между средней шириной шишек лиственниц сибирской и Сукачева

Лиственница	Сибирская		Сукачева	
	ГБС	ИДС	ГБС	ИДС
Сибирская:				
ГБС	–	5,99	17,21	13,83
ИДС	5,99	–	12,62	8,92
Сукачева:				
ГБС	17,21	12,62	–	2,91
ИДС	13,83	8,92	2,91	–

Из табл. 6 следует, что по числу чешуй в шишках лиственница Сукачева в одинаковых условиях произрастания превосходит лиственницу сибирскую. Данный признак варьирует на среднем и высоком уровнях.

Таблица 6

Сравнительный анализ изменчивости лиственниц сибирской и Сукачева по числу чешуй в шишках

Лиственница	$X_{ср}$, шт.	S_x , шт.	V, %
Сибирская:			
ГБС	38,3	±0,66	21,1
ИДС	31,8	±0,49	18,7
Сукачева:			
ГБС	47,0	±0,52	13,7
ИДС	33,8	±0,52	18,7

Лиственница Сукачева значительно отличается от лиственницы сибирской по среднему числу чешуй в шишках (табл. 7). Значимые отличия наблюдались и между вариантами одного вида на разных объектах исследования.

Таблица 7

Значимость разности между средним числом чешуй в шишках лиственниц сибирской и Сукачева

Лиственница	Сибирская		Сукачева	
	ГБС	ИДС	ГБС	ИДС
Сибирская:				
ГБС	–	7,91	10,35	5,36
ИДС	7,91	–	21,27	2,80
Сукачева:				
ГБС	10,35	21,27	–	17,95
ИДС	5,36	2,80	17,95	–

Как видно из табл. 8, средняя длина семян у лиственницы Сукачева выше, чем у лиственницы сибирской. Этот признак достаточно стабилен, варьирует на низком и среднем уровнях. Лиственница Сукачева значительно отличается от лиственницы сибирской по данному признаку, о чем свидетельствует коэффициент Стьюдента: $t = 11,8$.

Средняя ширина семян у лиственницы Сукачева тоже выше. Этот признак варьирует на среднем уровне. Установлено, что изучаемые породы значительно отличаются друг от друга по ширине семян: $t = 15,6$.

Таблица 8

Сравнительный анализ изменчивости лиственниц сибирской и Сукачева, произрастающих в ИДС, по размеру семян

Лиственница	Длина семян			Ширина семян		
	$X_{ср}$, мм	S_{x^2} , мм	V, %	$X_{ср}$, мм	S_{x^2} , мм	V, %
Сибирская	4,3	±0,06	14,6	2,7	±0,04	13,8
Сукачева	5,3	±0,06	10,9	3,7	±0,05	13,9

Таким образом, результаты исследования показали достаточно высокий уровень индивидуальной изменчивости (средний и высокий уровень варьирования морфологических признаков хвои, шишек и семян). Вместе с тем различия между лиственницами сибирской и Сукачева в большинстве случаев статистически достоверны. Это говорит о том, что групповая изменчивость (в данном случае различие между двумя таксонами) превышает индивидуальную.

Молекулярно-генетический анализ. Сравнительная оценка видов рода *Larix* Mill на основе ДНК-анализа была проведена на следующих образцах:

- 1 – лиственница сибирская, дерево № 1 (ГБС);
- 2 – лиственница сибирская, дерево № 2 (ГБС);
- 3 – лиственница сибирская, дерево № 1 (ИДС);
- 4 – лиственница сибирская, дерево № 1 (г. Воскресенск, Московская обл.);
- 5 – лиственница Сукачева, дерево № 1 (ГБС);
- 6 – лиственница Сукачева, дерево № 2 (ГБС);
- 7 – лиственница Сукачева, дерево № 3 (ГБС).

Электрофореграммы спектров образцов суммарной ДНК лиственниц сибирской и Сукачева по праймерам приведены на рис. 1–5 (где М – маркер).

По праймеру 6 все варианты лиственницы сибирской показывают высокий полиморфизм, у лиственницы Сукачева отмечается высокое сходство, хотя полной идентичности нет. Большие различия наблюдаются между лиственницами сибирской и Сукачева.

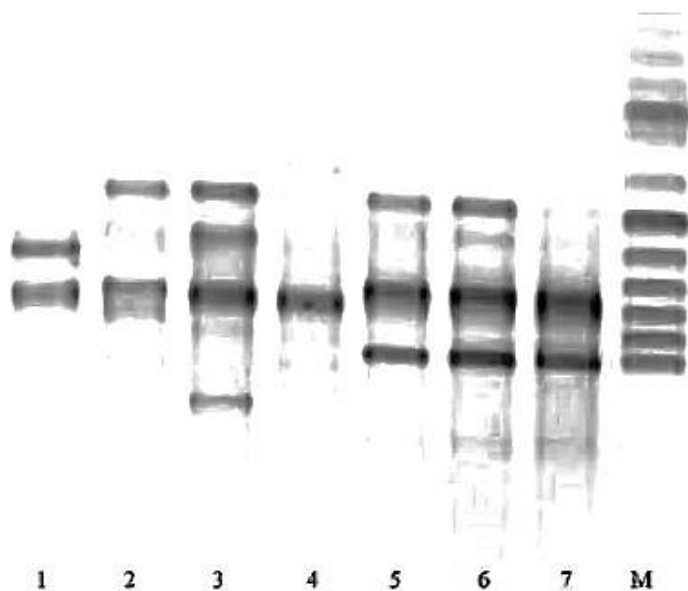


Рис. 1. Праймер 6

Fig. 1. Primer 6

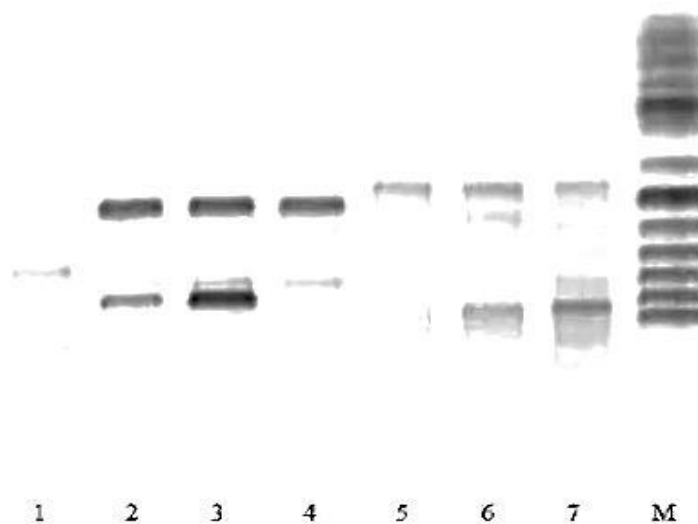


Рис. 2. Праймер 85

Fig. 2. Primer 85

По праймеру 85 наибольшее сходство обнаружено между образцами 2 и 3 лиственницы сибирской из ГБС и ИДС, а также у двух вариантов лиственницы Сукачева (образцы 6 и 7). Полной идентичности нет. Большие различия между лиственницами сибирской и Сукачева.

По праймеру 11 отмечается высокий полиморфизм у всех вариантов.

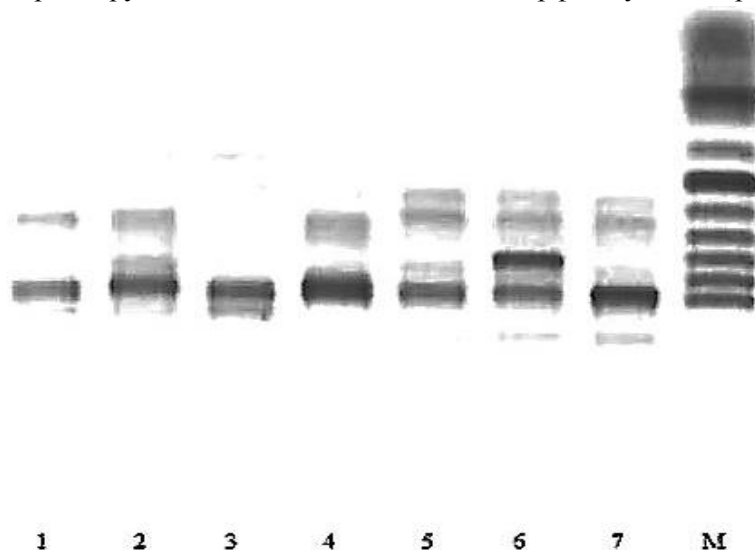


Рис. 3. Праймер 11

Fig. 3. Primer 11

По праймеру 26 установлен высокий полиморфизм у лиственницы сибирской (несколько более сходно дерево 2 ГБС с образцами 2 и 3 из ИДС). Наблюдается достаточно высокое сходство в этом примере среди экземпляров лиственницы Сукачева.

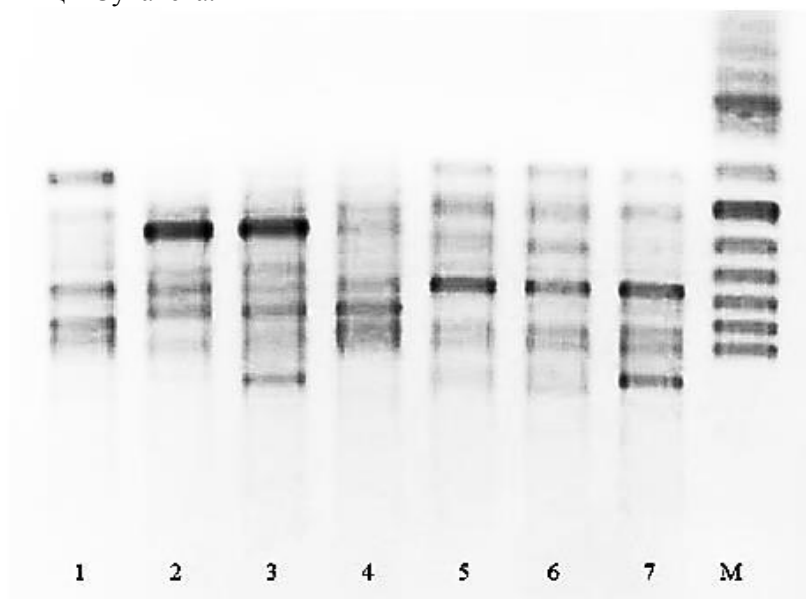


Рис. 4. Праймер 26

Fig. 4. Primer 26

По праймеру 98 выявлено достаточно высокое сходство между образцами 3 и 4 лиственницы сибирской. Высокий полиморфизм у лиственницы Сукачева.

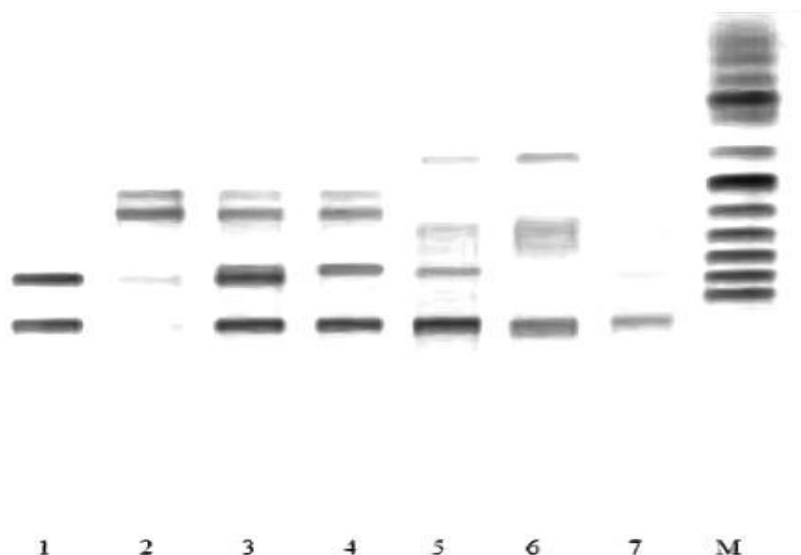


Рис. 5. Праймер 98

Fig. 5. Primer 98

Таким образом, согласно данным ДНК-анализа, среди исследованных образцов полных совпадений не обнаружено по всем указанным локусам. Имеет место высокая индивидуальная изменчивость как у деревьев лиственницы сибирской, так и по отдельным локусам лиственницы Сукачева. У локусов лиственницы Сукачева по праймерам 6, 85 и 26 наблюдается достаточно высокая схожесть между собой, при этом данные локусы резко отличаются от локусов лиственницы сибирской. В других, приведенных выше, локусах схожесть между образцами лиственницы Сукачева не такая явная, однако образцы лиственницы Сукачева имеют большее сходство друг с другом, чем с образцами лиственницы сибирской.

Заключение

На основании результатов исследований индивидуальной изменчивости морфологических признаков шишек, хвои и семян установлено, что лиственница Сукачева значительно отличается от лиственницы сибирской по данным признакам, исключением являются незначимые отличия по длине шишек между лиственницами Сукачева и сибирской, произрастающими в ГБС.

ДНК-анализ указывает на определенные различия между лиственницами сибирской и Сукачева по ряду исследованных локусов.

Таксономический статус лиственниц сибирской и Сукачева остается до конца неопределенным, что во многом связано с тем, что род *Larix* – активно эволюционирующий род. Из полученных данных можно сделать заключение, что лиственницы сибирскую и Сукачева следует рассматривать как географические расы одного вида, т. е. в таксономическом статусе подвидов. Это необходимо учитывать при интродукции этих лиственниц в европейскую часть России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоразнообразии лиственниц Азиатской России / А.П. Абаимов [и др.]; отв. ред.: С.П. Ефремов, Л.И. Милютин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т леса им. В.Н. Сукачева. Новосибирск: Гео, 2010. 159 с.
2. Бобров Е.Г. История и систематика лиственниц. Л.: Наука, 1972. 96 с. (Комаровские чтения; вып. 25).
3. Глазунов Ю.Б., Мерзленко М.Д., Лобова С.Л. Результат 60-летнего опыта уникальных географических посадок лиственницы // Учен. зап. ПетрГУ, 2017. № 8(169). С. 44–48.
4. Древесные растения Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН: 60 лет интродукции / отв. ред. А.С. Демидов. М.: Наука, 2005. 586 с.
5. Дылис Н.В. Сибирская лиственница: материалы к систематике, географии и истории. М.: Изд-во Моск. о-ва испытателей природы, 1947. 138 с.
6. Дылис Н.В. Лиственница. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 96 с.
7. Ивантеевский дендрологический сад ВНИИЛМ (каталог) / составители: А.С. Яблоков, М.И. Докучаева; науч. ред. Н.В. Котелова. М.: ВНИИЛМ, 1976. 88 с.
8. Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмоскovie путем интродукции лиственницы: автореф. дис. ... канд. с.- х. наук. М., 2009. 20 с.
9. Карасева М.А. Эколого-физиологические и агротехнические основы выращивания культур лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Led.) в Среднем Поволжье: дис. ... д-ра с.-х. наук. Йошкар-Ола, 2004. 371 с.
10. Кашин В.И., Козобродов А.С. Лиственничные леса Европейского Севера России. Архангельск: Изд-во Арх. фил. Рус. геогр. о-ва РАН, 1994. 220 с.
11. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.
12. Милютин Л.И., Муратова Е.Н., Ларионова А.Я. Генетико-таксономический анализ популяций лиственниц сибирской и Сукачева // Лесоведение. 1993. № 5. С. 55–63.
13. Орнатский А.Н. Обогащение лесных ресурсов республики Мордовия посредством интродукции лиственницы сибирской: дис. ... канд. биол. наук. Йошкар-Ола, 2002. 223 с.
14. Погиба С.П., Казанцева Е.В. Методы биометрического анализа в лесной селекции и генетике. М.: МГУЛ, 2014. 45 с.
15. Редько Г.И. Линдуловская лиственничная роща: учеб. пособие. Л.: ЛТА, 1984. 96 с.
16. Рысин Л.П. Лиственничные леса России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 343 с.
17. Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с.
18. Тихонов П.Р., Наквасина Е.Н. Внутривидовая изменчивость лиственницы Сукачева (*Larix sukaczowii* DuRoi.) по габитуальным признакам в естественных насаждениях Архангельской области // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Естественные и точные науки. 2005. Вып. 2. С. 29–35.
19. Урбах В.Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. М.: Медицина, 1975. 297 с.
20. Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений: учеб. для вузов. М.: МГУЛ, 2014. 552 с.
21. Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata K. Seed Collection and Seed Quality of *Larix* spp. from Russia: Initial Phase on the Russia-Scandinavian Larch Project // Eurasian Journal of Forest Research. 2002. No. 4. Pp. 39–49.

22. Araki N.H.T., Khatab I.A., Hemamali K.K.G.U., Inomata N., Wang X.-R., Szmidt A.E. Phylogeography of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* L. Inferred from Nucleotide Variation of Nuclear Genes // Tree Genetics & Genomes. 2008. Vol. 4, iss. 4. Pp. 611–623. DOI: 10.1007/s11295-008-0137-1

23. Burleigh J.G., Barbazuk W.B., Davis J.M., Morse A.M., Soltis P.S. Exploring Diversification and Genome Size Evolution in Extant Gymnosperms through Phylogenetic Synthesis // Journal of Botany. 2012. Vol. 2012, article ID 292857. 6 p. DOI: 10.1155/2012/292857

24. Fedorkov A. Stem Growth and Quality of Six Provenances of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* Ledeb. in a Field Trial Located in North-West Russia // Baltic Forestry. 2017. Vol. 23, no. 3(46). Pp. 603–607.

25. Leslie A.B., Beaulieu J.M., Rai H.S., Crane P.R., Donoghue M.J., Mathews S. Hemisphere-Scale Differences in Conifer Evolutionary Dynamics // PNAS. 2012. Vol. 109, iss. 40. Pp. 16217–16221. DOI: 10.1073/pnas.1213621109

26. Ran J.-H., Shen T.-T., Wu H., Gong X., Wang X.-Q. Phylogeny and Evolutionary History of *Pinaceae* Updated by Transcriptomic Analysis // Molecular Phylogenetics and Evolution. 2018. Vol. 129. Pp. 106–116. DOI: 10.1016/j.ympev.2018.08.011

Поступила 02.03.19

UDC 630*165.51

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.9

Genetic Selection Analysis of Siberian and Sukachev's Larches Introduced in Moscow and Moscow Region

V.A. Bryntsev^{1,2}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444),

ORCID: [0000-0002-6271-1444](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444)

M.A. Lavrenov¹, Senior Lecturer; ResearcherID: [E-2995-2018](https://orcid.org/0000-0001-9708-9037),

ORCID: [0000-0001-9708-9037](https://orcid.org/0000-0001-9708-9037)

¹Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: bryntsev@mail.ru, maxlavrenov93@mail.ru

²Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin, Russian Academy of Sciences,

ul. Botanicheskaya, 4, Moscow, 127276, Russian Federation; e-mail: bryntsev@mail.ru

The question of taxonomic status of Sukachev's larch is still not understood to a full degree. There are arguments both in favor of separation of Siberian and Sukachev's larches into individual species, and in favor of association them into the one. The issues of great importance are the works on the introduction of larch trees in the center of the European part of Russia in order to increase the resource potential of forests in this region. The study of variability of Siberian and Sukachev's larches in the new climatic conditions, which take place during the introduction, can give interesting results important not only for discussion of their taxonomic rank, but for practical purposes of introduction. The paper presents comparative analysis of Siberian and Sukachev's larches according to their individual variability of morphological characteristics and molecular genetic analysis. The studies were carried out in the conditions of introduction in Moscow (Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin) and Moscow region (Ivanteevskiy Arboretum). The morphological features of cones, needles and seeds were studied: length and width of cones, number of scales in them, length of needles, length and width of seeds. The arithmetic mean values of characters, the error of the arithmetic mean values of characters and the coefficient of variation were counted. On the basis of the obtained results, significant differences in morphological characteristics of

cones, seeds and needles are established, which gives reasons to distinguish Sukachev's larch as a geographical race; a subspecies of Siberian larch.

For citation: Bryntsev V.A., Lavrenov M.A. Genetic Selection Analysis of Siberian and Sukachev's Larches Introduced in Moscow and Moscow Region. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 9–21. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.9

Keywords: Siberian larch, Sukachev's larch, introduction, species.

REFERENCES

1. Abaimov A.P. et al. *Biodiversity of Larch in Asian Russia*. Editors in Chief S.P. Efremov, L.I. Milyutin. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 159 p.
2. Bobrov E.G. *History and Systematics of Larch*. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 96 p.
3. Glazunov Yu.B., Merzlenko M.D., Lobova S.L. Results of the 60-Years' Experience of Unique Geographical Larch Plantings. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University], 2017, no. 8(169), pp. 44–48.
4. *Woody Plants of the Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences: 60 Years of Introduction*. Editor in Chief A.S. Demidov. Moscow, Nauka Publ., 2005. 586 p.
5. Dylis N.V. *Siberian Larch: Materials to Systematics, Geography and History*. Moscow, MOIP Publ., 1947. 132 p.
6. Dylis N.V. *Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 96 p.
7. *Ivanteevsky Dendrological Garden of VNIILM (Catalogue)*. Content by A.S. Yablokov, M.I. Dokuchaeva; Science editor N.V. Kotelova. Moscow, VNIILM Publ., 1976. 88 p.
8. Karasev N.N. *Improving the Productivity of Forests in Moscow Region through the Larch Introduction*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 20 p.
9. Karaseva M.A. *Ecological, Physiological and Agrotechnical Basics of Cultivation of Siberian Larch (Larix sibirica Led.) Crops in the Middle Volga Region*: Dr. Agric. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 2004. 371 p.
10. Kashin V.I., Kozobrodov A.S. *Larch Forests of the European North of Russia*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Branch of RGO RAS Publ., 1994. 215 p.
11. Mamaev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants: (On the Example of the Family Pinaceae in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p.
12. Milyutin L.I., Muratova E.N., Larionova A.Ya. Genetic and Taxonomic Analysis of Siberian Larch and Sukachev Larch Populations. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1993, no. 5, pp. 55–63.
13. Ornatskiy A.N. *Enrichment of Forest Resources of the Republic of Mordovia through the Introduction of Siberian Larch*: Cand. Biol. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 2002. 223 p.
14. Pogiba S.P., Kazantseva E.V. *Methods of Biometric Analysis in Forest Breeding and Genetics*. Moscow, MSFU Publ., 2014. 45 p.
15. Red'ko G.I. *Lindulovskaya Larch Grove*: Educational Textbook. Leningrad, LTA Publ., 1984. 96 p.
16. Rysin L.P. *Larch Forests of Russia*. Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2010. 343 p.
17. Timofeev V.P. *Larch Forest Crops*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 216 p.
18. Tikhonov P.R., Nakvasina E.N. Intraspecific Variability of Larch (*Larix sukaczowii* Dyl.) According to Habitual Features in Natural Plantations of the Arkhangelsk Region. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tochnyye nauki*, 2005, no. 2(8), pp. 29–35.

-
19. Urbakh V.Yu. *Statistical Analysis in Biological and Medical Research*. Moscow, Meditsina Publ., 1975. 297 p.
20. Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Breeding of Forest and Ornamental Woody Plants*. Moscow, MSFU Publ., 2014. 552 p.
21. Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata K. Seed Collection and Seed Quality of *Larix* spp. from Russia: Initial Phase on the Russia-Scandinavian Larch Project. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2002, no. 4, pp. 39–49.
22. Araki N.H.T., Khatab I.A., Hemamali K.K.G.U., Inomata N., Wang X.-R., Szmidt A.E. Phylogeography of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* L. Inferred from Nucleotide Variation of Nuclear Genes. *Tree Genetics & Genomes*, 2008, vol. 4, iss. 4, pp. 611–623. DOI: 10.1007/s11295-008-0137-1
23. Burleigh J.G., Barbazuk W.B., Davis J.M., Morse A.M., Soltis P.S. Exploring Diversification and Genome Size Evolution in Extant Gymnosperms through Phylogenetic Synthesis. *Journal of Botany*, 2012, vol. 2012, Article ID 292857. 6 p. DOI: 10.1155/2012/292857
24. Fedorkov A. Stem Growth and Quality of Six Provenances of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* Ledeb. in a Field Trial Located in North-West Russia. *Baltic Forestry*, 2017, vol. 23, no. 3(46), pp. 603–607.
25. Leslie A.B., Beaulieu J.M., Rai H.S., Crane P.R., Donoghue M.J., Mathews S. Hemisphere-Scale Differences in Conifer Evolutionary Dynamics. *PNAS*, 2012, vol. 109, iss. 40, pp. 16217–16221. DOI: 10.1073/pnas.1213621109
26. Ran J.-H., Shen T.-T., Wu H., Gong X., Wang X.-Q. Phylogeny and Evolutionary History of *Pinaceae* Updated by Transcriptomic Analysis. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2018, vol. 129, pp. 106–116. DOI: 10.1016/j.ympev.2018.08.011

Received on March 02, 2019

УДК 630*181.51:582.475

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.22

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕГЕТАТИВНОГО ПОТОМСТВА ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ КЕДРА СИБИРСКОГО, АТТЕСТОВАННЫХ ПО СТВОЛОВОЙ ИЛИ СЕМЕННОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

В.В. Нарзыев, аспирант; ORCID: 0000-0003-1485-3381

Р.Н. Матвеева, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: 0000-0002-3476-9622

О.Ф. Буторова, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: 0000-0001-8575-7464

Ю.Е. Щерба, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: 0000-0002-8437-4274

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, просп. имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e-mail: narvv2008@rambler.ru, butorova.olga@mail.ru, shcherba_@mail.ru

Кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) является древесной породой, отличающейся многообразием свойств. Учитывая ценность данного вида и уменьшение его запасов в связи с пожарами, гибелью от шелкопряда, незаконными рубками, необходимо сохранять и размножать лидирующие экземпляры, которые формировались в естественных условиях. Приведены результаты исследования кедра сибирского в условиях Южно-Сибирской горной лесорастительной зоны. Цель исследования – изучение изменчивости клонового потомства кедра сибирского на опытном участке. В качестве маточных были взяты плюсовые деревья, аттестованные в Новосибирской области по семенной или стволовой продуктивности. Плюсовые деревья имели высоту 16,0...30,5 м, диаметр ствола 44...78 см. Среднее количество шишек на деревьях за 10-летний период до аттестации (1967–1977 гг.) составляло 203...470 шт. Для исследования были отобраны 35 плюсовых деревьев, аттестованных в 1977 г. по стволовой (17 шт.) и семенной (18 шт.) продуктивности, сопоставлены их показатели с показателями клонового потомства при возрасте привоя 29 лет. Определены следующие биометрические показатели рамет разных клонов: высота ствола, диаметр и объем ствола и кроны, длина хвои, образование шишек независимо от аттестации плюсовых деревьев по стволовой или семенной продуктивности. Клоновый посадочный материал выращен путем прививки черенков весной 1989 г. на 6-летние сеянцы кедра сибирского. При посадке на плантацию их возраст составил 8 лет (подвой – 6 лет, привой – 2 года). В последующие годы наблюдалась изменчивость показателей клонового потомства. Установлено, что биометрические показатели и процент деревьев, образовавших шишки, не имели достоверных различий при сравнении потомств плюсовых деревьев, выделенных как по семенной, так и по стволовой продуктивности. Существенно отличалось среднее количество шишек у рамет от плюсовых деревьев по семенной продуктивности. Большая изменчивость показателей наблюдалась между клонами и раметами в клонах независимо от цели отбора при аттестации маточных деревьев. Коэффициент наследуемости маточных деревьев по высоте клонового потомства составлял 40,7 %, по диаметру ствола – 35,0 %. Были отобраны отдельные раметы, отличающиеся интенсивностью роста, семенной и экологической продуктивностью. Полученные результаты могут быть использованы при создании клоновых плантаций второго поколения повышенной генетической ценности в условиях Южно-Сибирской горной лесорастительной зоны.

Для цитирования: Нарзыев В.В., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Щерба Ю.Е. Изменчивость вегетативного потомства плюсовых деревьев кедра сибирского, аттестованных по стволовой или семенной продуктивности // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 22–33. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.22

Ключевые слова: кедр сибирский, плюсовое дерево, прививка, клон, рамета, изменчивость, урожайность, интенсивность роста.

Введение

Кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) является древесной породой, отличающейся многообразием ценных свойств. Его орехи (семена) используются как пищевой продукт, широко применяются также древесина, живица и др. Кроме того, кедровые насаждения выполняют почвозащитные, экологические и другие функции [1, 5, 10 и др.].

Учитывая ценность данного вида и уменьшение его запасов в связи с пожарами, гибелью от шелкопряда, незаконными рубками, необходимо сохранять и размножать лидирующие экземпляры, которые формировались в естественных условиях. С этой целью проводится аттестация плюсовых деревьев по стволовой и семенной продуктивности. Их размножение позволяет создавать плантации целевого назначения. О целесообразности создания клоновых плантаций хвойных пород имеется большое количество публикаций [2, 4, 7, 8, 11, 14, 16, 17, 20, 21, 24 и др.].

В Австрии прививочные плантации кедр европейского существуют с конца 50-х годов прошлого века [19]. В Корее выращивают клоны кедр корейского прививкой и черенкованием [22]. Лесные плантации успешно создаются во многих странах (Китай, Швеция, Финляндия, США), в основном для получения древесины [3]. A.D. Yanchuk et al. [26] анализировали изменчивость запаса древесины на клоновой плантации ели ситхинской в Канаде. B. Li, S. McKeand, R. Weir [23] рекомендовали на лесосеменных плантациях сосны ладанной проводить отбраковку отстающих в росте клонов для повышения на 12 % запаса древесины. S. Goto et al. [18] установлены достоверные различия, достигающие в некоторых случаях почти 100-кратной величины, у семян деревьев разных клонов сосны Тунберга.

Перспективным направлением считается создание лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности. Для этого в первую очередь используют привитой посадочный материал, заготовленный с маточных деревьев, отобраных по конкретным показателям. Клоновые лесосеменные плантации, в частности кедр сибирского, закладывают привитым посадочным материалом или прививкой на подвой сосны обыкновенной или кедр сибирского. Е.В. Титов [12] отмечает, что перспективным является плантационное лесовыращивание пород для получения недревесной продукции – орехов. А.П. Царев и др. [13] пишут, что прививочным плантациям отводится особая роль в реализации мероприятий по ускоренному размножению наиболее ценных экземпляров сосны кедровой сибирской.

Отмечаются преимущества и недостатки плантаций вегетативного происхождения, которые раньше вступают в стадию семеношения. У некоторых экземпляров наблюдается несовместимость прививаемых компонентов, что требует проведения гомопластических прививок и тщательного подбора привоя и подвоя. Особое внимание необходимо уделять деревьям, с которых заготавливаются черенки, так как вегетативное потомство от них является генетически однородным [6, 15].

Цель исследования – изучение изменчивости клонового потомства кедр сибирского. В качестве маточных были взяты плюсовые деревья, аттестованные в Новосибирской области по семенной и стволовой продуктивности.

Исследования являются актуальными в связи с проведением оценки маточных деревьев кедр сибирского по клоновому потомству и использованием лучших экземпляров для размножения и выращивания селекционного

посадочного материала при создании целевых плантаций, ориентированных на повышенные урожаи кедрового ореха или ускоренное получение древесины в условиях Южно-Сибирской горной лесорастительной зоны [9].

Селекционная оценка плюсовых деревьев по показателям роста и репродуктивного развития 29-летнего привоя разных клонов проведена впервые.

Объекты и методы исследования

Для исследования отобраны 35 плюсовых деревьев, аттестованных в 1977 г. по стволовой (17 шт.) и семенной (18 шт.) продуктивности, сопоставлены их показатели с показателями клонового потомства при возрасте привоя 29 лет. Измерялись следующие биометрические показатели рамет разных клонов: высота и диаметр ствола, диаметр кроны, длина хвои; определялись объем ствола и кроны, образование шишек в вариантах, где плюсовые деревья были аттестованы по стволовой или семенной продуктивности. Биометрические показатели плюсовых деревьев брали из паспортов, составленных при их аттестации.

У клонов плюсовых деревьев методом сплошного перечета устанавливали количество шишек в кроне дерева с 2013 по 2017 г. Длину хвои измеряли на текущем приросте боковых побегов мутовки, расположенной на высоте 1,3 м с южной стороны дерева (по 5 шт.). По стволовой продуктивности измерено 188 рамет от плюсовых деревьев, по семенной – 217 рамет. Количество рамет в каждом клоне варьировало от 8 до 16 шт. В среднем представленность рамет – 11,5 шт.

Объем ствола потомства определяли по следующей формуле:

$$V_{\text{ств}} = gHF,$$

где g – площадь поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м, м²; H – высота дерева, м; F – видовое число, $F = 0,5$.

Объем кроны устанавливали по формуле А.В. Тюрина:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\pi D^2 L}{8},$$

где D – диаметр кроны, м; L – протяженность кроны, м.

Рассчитывали коэффициент наследуемости маточных деревьев по высоте и диаметру ствола вегетативного потомства:

$$H^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_{ph}^2},$$

где σ_g^2 – генотипическая дисперсия; σ_{ph}^2 – фенотипическая дисперсия.

Объектами исследований являлись раметы клонов плюсовых деревьев, аттестованных по семенной или стволовой продуктивности. Маточные деревья произрастали на территории Колыванского лесхоза Новосибирской области. Плантация была создана посадкой привитых растений в Саянском участковом лесничестве Ермаковского лесничества Красноярского края. Расстояние между посадочными местами – 8×8 м. Климат района исследований резко континентальный (в январе средняя температура воздуха составляет –22,7 °С, в июле – +14 °С). Почва серая лесная. Условия для выращивания кедра сибирского благоприятные.

Клоновый посадочный материал выращен путем прививки черенков весной 1989 г. на 6-летние сеянцы кедра сибирского. К моменту посадки на плантацию их возраст составил 8 лет (подвой – 6 лет, привой – 2 года). Наблюдения за ростом и репродуктивным развитием клонов проведены при возрасте привоя 29 лет.

Для статистической обработки результатов исследования использовали программы Microsoft Office.

Результаты исследования и их обсуждение

Высота плюсовых деревьев, аттестованных по стволу продуктивности, была на 10 % больше средних показателей деревьев кедра сибирского, произрастающих в соответствующих выделах Кандауровского и Орско-Симанского лесничеств, диаметр ствола – выше на 30 % и более. Некоторые деревья, отобранные по семенной продуктивности, кроме высокой урожайности имели превышение по высоте и диаметру ствола (табл. 1).

Таблица 1

Биометрические показатели плюсовых деревьев

Номер плюсового дерева	Высота		Диаметр ствола		Номер плюсового дерева	Высота		Диаметр ствола	
	м	% к X_{cp}	см	% к X_{cp}		м	% к X_{cp}	см	% к X_{cp}
<i>Отобраны по стволу продуктивности</i>									
13/13	25	125	60	150	31/31	26	113	72	164
17/17	26	114	62	140	33/33	26	113	60	132
18/18	26,5	115	62	140	37/37	27	117	60	150
20/20	26	114	62	140	112/76	30,5	115	78	150
21/21	28	122	76	172	113/77	29	109	72	138
22/22	26	114	70	158	128/92	28	110	60	143
29/26	24	114	60	187	141/105	28	112	64	152
30/30	25	119	52	162	146/110	27	110	70	167
					147/111	27	110	68	162
<i>Отобраны по семенной продуктивности</i>									
88/52	20	91	58	125	99/63	20	111	54	104
89/53	19	105	52	100	100/64	17	94	44	84
90/54	18	100	46	88	101/65	16	89	42	81
91/55	19	105	72	138	104/68	20	111	56	105
92/56	19	105	72	138	106/70	20	111	56	105
94/58	23	128	72	138	107/71	20	111	51	98
96/60	19	105	46	89	108/72	23	128	58	112
97/61	19	105	62	120	110/74	21	116	67	129
98/62	19	105	65	125	111/75	21	116	52	100

Примечание: X_{cp} – среднее значение показателя в опыте.

Так, клоновое потомство плюсового дерева 94/58, аттестованного по семенной продуктивности, имело высоту на 28,0 % больше среднего значения, диаметр ствола – на 38,0 %. Превышение только по высоте было у клонов 99/63, 104/68, 106/70, 107/71, 108/72, 110/74; по диаметру ствола – у 91/55, 92/56.

Среднее количество шишек на маточных (плюсовых) деревьях за 10-летний период до аттестации (1967–1977 гг.) составило 203...470 шт., многолетняя удельная энергия семеношения варьировала от 4,4 до

10,2 шт./см. Длина шишек 6,2...8,5 см. Наибольшее количество шишек и удельная энергия семеношения были у плюсовых деревьев 90/54, 100/64, 89/53. Крупные шишки отмечены у плюсовых деревьев 100/64 и 88/52.

Наблюдения за ростом и семеношением клонового потомства показали, что высота и диаметр ствола, диаметр и объем кроны, длина хвои, процент деревьев, образовавших шишки за 5-летний период (2013–2017 гг.), не имеют достоверных различий при сравнении потомств плюсовых деревьев, выделенных как по стволу, так и по семенной продуктивности (табл. 2).

Таблица 2

**Показатели клонового потомства деревьев,
аттестованных по стволу или семенной продуктивности**

Принцип отбора маточных деревьев по продуктивности	Высота ствола, м	Диаметр		Объем, м ³		Длина хвои, см	Количество урожайных деревьев, %
		ствола, см	кроны, м	ствола	кроны		
Стволовая	6,1±0,35	16,4±1,38	3,0±0,24	0,064	20,48	10,9±0,52	24,5
Семенная	6,0±0,36	16,0±1,33	2,9±0,20	0,060	18,47	10,8±0,46	23,0
Среднее	6,0±0,35	16,2±1,36	3,0±0,22	0,062	20,13	10,8±0,47	23,7

Фенотипическая изменчивость показателей независимо от цели отбора при аттестации маточных деревьев наблюдается среди потомства кедров сибирского, что позволило отселектировать клоны, отличающиеся интенсивностью роста (табл. 3).

Таблица 3

Клоны, отселектированные по интенсивности роста

Принцип отбора маточных деревьев по продуктивности	Номер клона	Высота ствола		Диаметр ствола		Объем ствола	
		м	% к X _{ср}	см	% к X _{ср}	м ³	% к X _{ср}
Стволовая	17/17	6,6	110,0	16,8	103,7	0,0731	117,9
Семенная	97/61	6,5	108,3	18,7	115,4	0,0894	144,2

По развитию кроны выделяются потомства 3 деревьев из 17, аттестованных по стволу, и 1 дерево из 18, аттестованных по семенной (табл. 4).

Таблица 4

Клоны, отселектированные по развитию кроны

Принцип отбора маточных деревьев по продуктивности	Номер клона	Диаметр кроны		Объем кроны		Длина хвои	
		м	% к X _{ср}	м ³	% к X _{ср}	см	% к X _{ср}
Стволовая	17/17	3,5	116,7	33,99	147,8	11,5	106,5
	141/105	3,5	116,7	33,75	146,7	11,7	108,3
	147/111	3,4	113,3	31,09	135,2	11,8	109,2
Семенная	104/68	3,3	110,0	28,35	123,3	11,6	107,4

Сопоставлен процент урожайных рамет в каждом клоне за период с 2013 по 2017 г., выделены клоны, у которых процент рамет, образовавших шишки, превысил среднее значение на 30 % и более (рис. 1).



Рис. 1. Клоны, отселектированные по количеству рамет, образовавших шишки (на горизонтальной оси – номера клонов)

Fig. 1. Clones selected by the amount of ramets formed cones (horizontal axis – the numbers of clones)

Была сопоставлена урожайность маточных деревьев и клонового потомства (рис. 2).

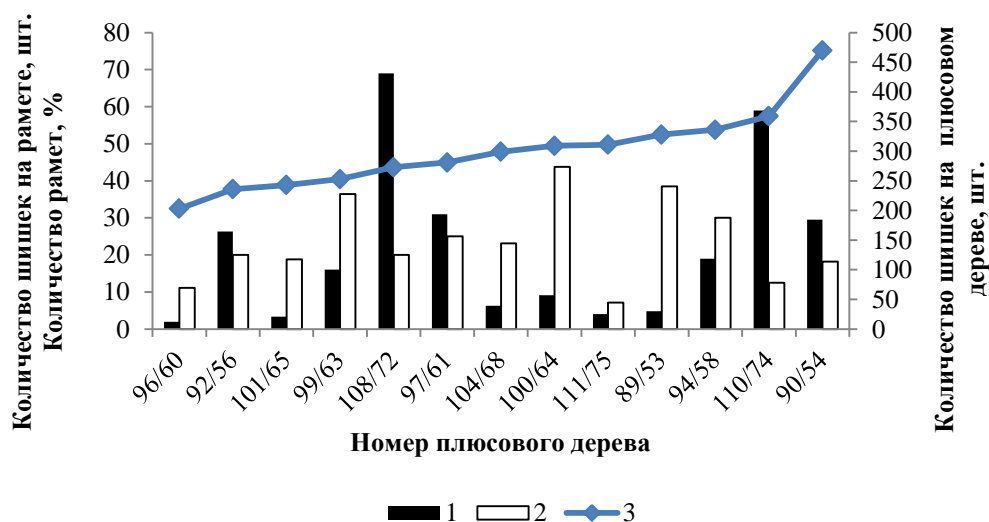


Рис. 2. Формирование шишек на плюсовых деревьях и раметах: 1 – среднее количество шишек на урожайных раметах клона; 2 – процент урожайных рамет в клоне; 3 – среднее многолетнее количество шишек на плюсовом дереве

Fig. 2. Cones formation on plus trees and ramets: 1 – average amount of cones on yielding ramets of a clone; 2 – yielding ramets in a clone, %; 3 – average multiyear amount of cones on a plus tree

Коэффициент корреляции между урожайностью маточных деревьев и клонового потомства составил 0,247, что указывает на слабую связь.

Значительные различия показателей семян и шишек между клонами сосны и несущественные внутри клона отмечали J. Xu et al. [25]. К такому же выводу пришел Z. Zhuowen [27], изучая генеративное развитие рамет разных клонов куннингамии ланцетной, отметив отсутствие достоверных различий между ракетами одного клона. Наши исследования показали большую изменчивость показателей рамет внутри клона, что позволило отселектировать отдельные экземпляры, которые имели показатели, превышающие средние значения.

Максимальное количество шишек на ракетах от маточных деревьев, аттестованных по стволовой продуктивности, составило 50 шт. (клон 33/33, ракета 5-15). Образование шишек на данной рамете отмечено в 2016 г. (42 шт.) и в 2017 г. (8 шт.). У потомства маточных деревьев, аттестованных по семенной продуктивности, максимальное количество шишек (82 шт.) было на рамете 4-24 клона 107/71 (2016 г. – 71 шт., 2017 г. – 11 шт.). В некоторых клонах урожайность рамет еще не наступила.

Среднее количество шишек за период с 2013 по 2017 г. в клоновом потомстве деревьев, отобранных по стволовой продуктивности, составило 10,2 шт., по семенной – 18,8 шт. Превышение – 84,3 %. За этот период единичные ракеты образовывали шишки в течение 2 и даже 3 лет (табл. 6).

Таблица 6

Раметы, отселектированные по урожайности

Принцип отбора маточных деревьев по продуктивности	Номер клона	Номер ракеты	Количество шишек		Количество урожайных лет за период с 2013 по 2017 г.	
			шт.	% к $X_{\text{ср}}$		
Стволовая	22/22	6-30	22	151,7	2	
	33/33	5-15	50	344,8	2	
	37/37	6-4	20	137,9	2	
	141/105	14-21	21	144,8	1	
		14-30	20	137,9	1	
	146/110	22-24	27	186,2	1	
		14-22	24	165,5	1	
	147/111	6-9	24	165,5	1	
	Семенная	88/52	3-28	23	158,6	2
		90/54	3-29	52	358,6	2
92/56		3-30	27	186,2	2	
		3-21	38	262,1	1	
94/58		3-31	39	269,0	2	
97/61		12-26	68	469,0	2	
		35-18	20	137,9	1	
99/63		4-31	46	317,2	3	
100/64		11-23	34	234,5	2	
106/70		19-23	38	262,1	1	
107/71		4-24	82	565,5	2	
108/72		4-33	24	165,5	2	
		4-34	72	496,6	1	
	4-25	66	455,2	2		
110/74	12-22	59	406,9	2		
Среднее			14,5	100,0		

В клоновом потомстве выделяются отдельные раметы, отличающиеся максимальным количеством шишек за исследуемый период. Некоторые раметы, независимо от принципа отбора при аттестации маточных деревьев, сформировали в несколько раз больше шишек, чем среднее значение.

Определен коэффициент наследуемости маточных деревьев в широком смысле (см. с. 24): по высоте ($H^2 = 40,7 \%$) и диаметру ($H^2 = 35,0 \%$) ствола клонового потомства в возрасте привоя 29 лет.

Выводы

1. Плюсовые деревья кедра сибирского, отобранные по одному из показателей (по семенной или стволовой продуктивности), генетически могут быть ценными и по другому показателю, что определяется по клоновому потомству.

2. Отмечается большая изменчивость показателей роста и репродуктивного развития не только между клонами, но и между раметами внутри клонов. Подтверждается, что при одинаковом генотипе фенотип растений изменяется в зависимости от многих факторов: условий произрастания, развития корневой системы подвоя, влияния срастания привоя с подвоем и др.

3. В условиях Южно-Сибирской горной лесорастительной зоны целесообразно при создании лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности и прививочных плантаций целевого назначения использовать для заготовки черенков раметы отдельных клонов, отличающиеся лучшими показателями по интенсивности роста, урожайности или экологической продуктивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бех И.А. Кедровники Южного Приобья. Новосибирск: Наука, 1974. 212 с.
2. Гиргидов Д.Я., Долголиков В.И. Отбор плюсовых маточных деревьев и вегетативное размножение хвойных пород при создании лесосеменных плантаций. Л.: ЛенНИИЛХ, 1962. 32 с.
3. Желдак В.И. Лесные плантации в системе лесоводства // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 3(35). С. 5–25. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.3.5
4. Зеленьяк А.К., Морозова Е.В., Иоюз А.П. Особенности вегетативного размножения лиственницы сибирской для создания лесосеменных плантаций // Успехи современного естествознания. 2016. № 11-1. С. 38–42.
5. Игнатенко М.М. Сибирский кедр (биология, интродукция, культура). М.: Наука, 1988. 160 с.
6. Матвеева Р.Н., Братилова Н.П., Кубрина С.М. Изменчивость сосны кедровой сибирской по аккумуляции микроэлементов в хвое и семенах: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2009. 96 с.
7. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Щерба Ю.Е. Семенное и вегетативное размножение отселектированных деревьев сосны кедровой сибирской. Красноярск: СибГТУ, 2016. 206 с.
8. Нарзязев В.В., Мартынов В.С. Клонирование: классические традиции передовых технологий // Молодежь и наука XXI века: XVII Междунар. форум студентов, аспирантов и молодых ученых. Актуальные проблемы философии и социологии: материалы Всерос. науч.-практич. конф., Красноярск, 14 апр. 2016 г. Красноярск: КГПУ им. В.П. Астафьева, 2016. С. 47–54.

9. Приказ Минприроды от 18.08.2014 № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации». М.: М-во природ. ресурсов и экологии РФ, 2018. 20 с.
10. Тутов Е.В. Кедр. Царь сибирской тайги. М.: Колос, 2007. 175 с.
11. Тутов Е.В. Формирование кроны у прививок кедра европейского в Республике Коми // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГТУ, 2012. С. 105–109.
12. Тутов Е.В., Горобец А.И. Плантационное выращивание кедровых сосен и прутьевидной ивы на селекционной основе // Лесн. журн. 2010. № 3. С. 40–45. (Изв. высш. учеб. заведений).
13. Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений: учеб. М.: МГУЛ, 2014. 552 с.
14. Шейкина О.В., Гладков Ю.Ф. Оценка селекционного потенциала клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Науч. журн. КубГАУ (электрон. науч. журн.). 2013. № 93(09). С. 257–272. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/41.pdf> (дата обращения: 05.03.19).
15. Шлончак Г.А., Шлончак А.В., Шинкаренко А.И. Создание семенных плантаций сосны привитыми и корнесобственными саженцами // Лесоводство и агролесомелиорация: респ. межведомств. науч. сб. № 81. Киев: Урожай, 1990. С. 34–38.
16. Щерба Ю.Е., Матвеева Р.Н. Особенности роста сортов-клонов кедра сибирского // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы второй междунар. науч.-техн. конф., С-Петербург, 24–26 мая 2017 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. Т. 1. С. 178–180.
17. Bilir N., Kang K.-S., Ozturk H. Fertility Variation and Gene Diversity in Clonal Seed Orchards of *Pinus brutia*, *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in Turkey // *Silvae Genetica*. 2002. Vol. 51, iss. 2-3. Pp. 112–115.
18. Goto S., Miyahara F., Ide Y. Identification of the Male Parents of Half-Sib Progeny from Japanese Black Pine (*Pinus thunbergii* Parl.) Clonal Seed Orchard Using RAPD Markers // *Breeding Science*. 2002. Vol. 52. Pp. 71–77. DOI: 10.1270/jsbbs.52.71
19. Holser K. Drei Sabrzehnte Erfahrungen mit Zirbenpfröpfungen // *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* [Austrian Journal of Forest Science]. 1989. B. 106, N. 2. S. 79–88.
20. Hu D.-H., Wu B.-L., Ruan Z.-C., Li J.-L., Yao B.-J., Zhu B.-Z. The Number of Plants in a Single Clone and on One Plot Necessary to Verify the Features of Growth and Wood Density of Clones of *Cunninghamia lanceolata* // *Linye kexue yanjiu* [Forest Res.]. 2002. Vol. 15, no. 2. Pp. 212–218.
21. Kang K.-S. Clonal and Annual Variation of Flower Production and Composition of Gamete Gene Pool in a Clonal Seed Orchard of *Pinus densiflora* // *Canadian Journal of Forest Research*. 2000. Vol. 30, no. 8. Pp. 1275–1280. DOI: 10.1139/x00-060
22. Kang K.-S., Choi W.-Y., Han S.-U., Kim C.-S. Effective Number and Seed Production in a Clonal Seed Orchard of *Pinus koraiensis* // *Forest Genetics*. 2004. Vol. 11(3-4). Pp. 277–280.
23. Li B., McKeand S., Weir R. Impact of Forest Genetics on Sustainable Forestry – Results from Two Cycles of Loblolly Pine Breeding in the U.S. // *Journal of Sustainable Forestry*. 1999. Vol. 10, iss. 1-2. Pp. 79–85. DOI: 10.1300/J091v10n01_09
24. Sivacioglu A., Ayan S., Çelik D.A. Clonal Variation in Growth, Flowering and Cone Production in a Seed Orchard of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Turkey // *African Journal of Biotechnology*. 2009. Vol. 8(17). Pp. 4084–4093. DOI: 10.5897/AJB09.424
25. Xu J., Wang Z., Chen Y., Qiu J. Analysis of Genetic Indicators, Features of Seeds and Cones, as Well as Productivity of Cones of Clones Growing in the *Pinus massoniana* Seed Nursery // *Linye kexue* [Sci. silv. sin.]. 2004. Vol. 40, no. 4. Pp. 201–205.
26. Yanchuk A.D., Bishir J., Russell J.H., Polsson K.R. Variation in Volume Production through Clonal Deployment: Results from a Simulation Model to Minimize Risk for Both a Currently Known and Unknown Future Pest // *Silvae genetica*. 2006. Vol. 55, iss. 1-6. Pp. 25–37. DOI: 10.1515/sg-2006-0005

27. Zhuowen Z. Differences in Flowering Characteristic among Clones of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook // *Silvae genetica*. 2002. Vol. 51, iss. 5-6. Pp. 206–210.

Поступила 05.03.19

UDC 630*181.51:582.475

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.22

Variability of Vegetative Progeny of Siberian Pine Plus Trees Certified for Stem or Seed Productivity

V.V. Narzyaev, Postgraduate Student; ORCID: [0000-0003-1485-3381](https://orcid.org/0000-0003-1485-3381)

R.N. Matveeva, Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: [0000-0002-3476-9622](https://orcid.org/0000-0002-3476-9622)

O.F. Butorova, Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: [0000-0001-8575-7464](https://orcid.org/0000-0001-8575-7464)

Yu.E. Shcherba, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-8437-4274](https://orcid.org/0000-0002-8437-4274)

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeni gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation;

e-mail: narvv2008@rambler.ru, butorova.olga@mail.ru, shcherba_@mail.ru

Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) is a tree species differences by the diversity of valuable properties. Considering its value and reduction of its growing stock due to forest fires, death from silkworm and illegal logging, it is necessary to preserve and multiply the leading species, which were formed in vivo. The results of studying the Siberian pine in the conditions of the Southern Siberian mountainous forest site zone are presented. The research purpose is the study of variability of Siberian pine progeny on the trial plot. Plus trees certified in Novosibirsk region for seed and stem productivity were taken as parent trees. Plus trees had a height of 16.0–30.5 m and trunk diameter of 44–78 cm. The average number of cones on trees for a 10-year period before certification (1967–1977) was 203–470 pcs. Plus trees (35) certified in 1977 for stem (17 trees) and seed productivity (18 trees) were selected for the study. Their parameters were compared with the clone progeny at the scion's age of 29 years. The following biometric parameters of ramets of different clones were determined: height of stem, diameter and volume of stem and crown; length of needles; cones formation regardless of plus trees certification for stem or seed productivity. Clonal planting material was grown by grafting of Siberian pine to the 6-year-old seedlings in spring of 1989. The seedling' age was 8 years (scion – 6 years, rootstock – 2 years) when they were planted on a plantation. In subsequent years, variability of clone progeny parameters was observed. It was found that the biometric parameters and percentage of trees that formed cones had no significant differences in comparison of progeny of plus trees certified for both seed and stem productivity. The average number of cones in ramets of plus trees was significantly different by seed productivity. A large variability of parameters was observed among the clones and ramets in clones regardless of the purpose of selection in certification of parent trees. The heritability coefficient of parent trees was 40.7 % in height of clonal progeny, and 35.0 % in stem diameter. The individual ramets differ by growth intensity, seed and environmental productivity were selected. The obtained results can be used in the creation of the second generation clone plantations of increased genetic value in the conditions of the Southern Siberian mountainous forest site zone.

For citation: Narzyaev V.V., Matveeva R.N., Butorova O.F., Shcherba Yu.E. Variability of Vegetative Progeny of Siberian Pine Plus Trees Certified for Stem or Seed Productivity. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 22–33. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.22

Keywords: Siberian pine, plus tree, graft, clone, ramet, variability, yielding ability, growth intensity.

REFERENCES

1. Bekh I.A. *Cedar Forests of Southern Priobye*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974. 212 p.
2. Girgidov D.Ya., Dolgolikov V.I. *Selection of Plus Parent Trees and Vegetative Propagation of Conifers in the Creation of Seed Plantations*. Leningrad, LenNIILKh Publ., 1962. 32 p.
3. Zheldak V.I. Forest Plantations in Forestry System. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2017, no. 3(35), pp. 5–25. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.3.5
4. Zelenyak A.K., Morozova E.V., Iozus A.P. Features of Vegetative Propagation (Cloning) of Siberian Larch for Creation Seed Orchards. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2016, iss. 11, part 1, pp. 38–42.
5. Ignatenko M.M. *Siberian Pine (Biology, Introduction, Culture)*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 160 p.
6. Matveeva R.N., Bratilova N.P., Kubrina S.M. *The Variability of Siberian Pine by Accumulation of Trace Elements in Needles and Seeds: Monography*. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2009. 96 p.
7. Matveeva R.N., Butorova O.F., Shcherba Yu.E. *Seed and Vegetative Reproduction from Selective Siberian Pine Trees*. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2016. 206 p.
8. Narzyaev V.V., Martynov V.S. The Classical Tradition and Advanced Technology of Cloning. *Youth and Science of the 21st Century: The 17th Int. Forum of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. Current Issues of Philosophy and Sociology: Proceedings of All-Russian Sci.-Pract. Conf., Krasnoyarsk, April 14, 2016*. Krasnoyarsk, KSPU named after V.P. Astafiev Publ., 2016, pp. 47–54.
9. *The Order of the Ministry of Natural Resources dated 18.08.2014 no. 367 "On the Approval of the List of Forest Site Zones of the Russian Federation and the List of Forest Regions of the Russian Federation"*. Moscow, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, 2018. 20 p.
10. Titov E.V. *Cedar. The Tsar of the Siberian Taiga*. Moscow, Kolos Publ., 2007. 152 p.
11. Titov E.V. Crown Formation in Grafts of European Cedar in the Republic of Komi. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy*, 2012, pp. 105–109.
12. Titov E.V., Gorobets A.I. Plantation Cultivation of Cedar Pine and Common Osier on Selection Basis. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2010, no. 3, pp. 40–45.
13. Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Selection of Forest and Decorative Woody Plants*. Moscow, MSTU Publ., 2014. 552 p.
14. Sheikina O.V., Gladkov Yu.F. Assessment of the Breeding Potential of Plus Scotch Pine Tree Clones. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 93(09), pp. 257–272. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/41.pdf> (accessed 05.03.19).
15. Shlonchak G.A., Shlonchak A.V., Shinkarenko A.I. Creation of Pine Seed Plantations by Graft and Rooting Seedlings. *Forestry and Silvicultural Reclamation: Republican Interagency Academic Collection no. 81*. Kiev, Urozhay Publ., 1990, pp. 34–38.
16. Shcherba Yu.E., Matveeva R.N. Growth Features of Clonal Varieties of Siberian Pine. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science and Education*. Saint Petersburg, SPbGLTU Publ., 2017, vol. 1, pp. 178–180.
17. Bilir N., Kang K.-S., Ozturk H. Fertility Variation and Gene Diversity in Clonal Seed Orchards of *Pinus brutia*, *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in Turkey. *Silvae Genetica*, 2002, vol. 51, iss. 2-3, pp. 112–115.

18. Goto S., Miyahara F., Ide Y. Identification of the Male Parents of Half-Sib Progeny from Japanese Black Pine (*Pinus thunbergii* Parl.) Clonal Seed Orchard Using RAPD Markers. *Breeding Science*, 2002, vol. 52, pp. 71–77. DOI: 10.1270/jsbbs.52.71

19. Holser K. Drei Sabrzehnte Erfahrungen mit Zirbenpfropfungen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* [Austrian Journal of Forest Science], 1989, B. 106, N. 2, S. 79–88.

20. Hu D.-H., Wu B.-L., Ruan Z.-C., Li J.-L., Yao B.-J., Zhu B.-Z. The Number of Plants in a Single Clone and on One Plot Necessary to Verify the Features of Growth and Wood Density of Clones of *Cunninghamia lanceolata*. *Linye kexue yanjiu* [Forest Res.], 2002, vol. 15, no. 2, pp. 212–218.

21. Kang K.-S. Clonal and Annual Variation of Flower Production and Composition of Gamete Gene Pool in a Clonal Seed Orchard of *Pinus densiflora*. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 30, no. 8, pp. 1275–1280. DOI: 10.1139/x00-060

22. Kang K.-S., Choi W.-Y., Han S.-U., Kim C.-S. Effective Number and Seed Production in a Clonal Seed Orchard of *Pinus koraiensis*. *Forest Genetics*, 2004, vol. 11(3-4), pp. 277–280.

23. Li B., McKeand S., Weir R. Impact of Forest Genetics on Sustainable Forestry – Results from Two Cycles of Loblolly Pine Breeding in the U.S. *Journal of Sustainable Forestry*, 1999, vol. 10, iss. 1-2, pp. 79–85. DOI: 10.1300/J091v10n01_09

24. Sivacıoğlu A., Ayan S., Çelik D.A. Clonal Variation in Growth, Flowering and Cone Production in a Seed Orchard of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Turkey. *African Journal of Biotechnology*, 2009, vol. 8(17), pp. 4084–4093. DOI: 10.5897/AJB09.424

25. Xu J., Wang Z., Chen Y., Qiu J. Analysis of Genetic Indicators, Features of Seeds and Cones, as Well as Productivity of Cones of Clones Growing in the *Pinus massoniana* Seed Nursery. *Linye kexue* [Sci. silv. sin.], 2004, vol. 40, no. 4, pp. 201–205.

26. Yanchuk A.D., Bishir J., Russell J.H., Polsson K.R. Variation in Volume Production through Clonal Deployment: Results from a Simulation Model to Minimize Risk for Both a Currently Known and Unknown Future Pest. *Silvae genetica*, 2006, vol. 55, iss. 1-6, pp. 25–37. DOI: 10.1515/sg-2006-0005

27. Zhuowen Z. Differences in Flowering Characteristic among Clones of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. *Silvae genetica*, 2002, vol. 51, iss. 5-6, pp. 206–210.

Received on March 05, 2019

УДК 630*5:581.526.13:633.872./674.031.772.224.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.34

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛЕЗАЩИТНОЙ ПОЛОСЫ С УЧАСТИЕМ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR* L.) И КЛЕНА ОСТРОЛИСТНОГО (*ACER PLATANOIDES* L.)

О.В. Грибачева, канд. биол. наук, доц., зав. кафедрой; ORCID: 0000-0002-6192-3939
Луганский национальный аграрный университет, городок ЛНАУ-1, г. Луганск, Украина, 91008; e-mail: olesya_koraneva_78@mail.ua

Защитные лесонасаждения являются одним из важнейших факторов экологической оптимизации агроландшафта. Цель работы – анализ современного состояния лесополосы в окрестностях с. Золотарёвка (Станично-Луганский р-н Луганской области Украины) с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и разработка необходимых мероприятий для ее восстановления. Архивных данных о времени создания и возрасте исследуемого объекта не выявлено. Полезащитные полосы в Луганской области создавались в соответствии со сталинским планом преобразования природы, который был рассчитан на 1949–1965 гг. В исследуемом насаждении нами были заложены две постоянные пробные площадки в соответствии с ОСТ 56-69–83. По результатам перечислительной таксации определены состав полезащитной полосы, диаметр и средняя высота деревьев, их состояние по Крафту. Жизненное состояние деревьев оценено на основании «Санитарных правил в лесах РФ». Наиболее многочисленным под пологом материнского насаждения является подрост клена остролистного, клена татарского и вишни магалевской (*Prunus mahaleb* L.), которые первоначально не входили в состав древостоя полезащитной полосы. Установлено, что в насаждении идет лесообразовательный процесс, направленный на формирование лесного биоценоза с преобладанием клена остролистного. Решающим фактором, влияющим на деревья дуба в полезащитных полосах, является состояние их крайних рядов. При естественном формировании древостоя в насаждении, созданном коридорным или рядовым способом, выживаемость дуба зависит от отпада клена остролистного. Выявлено, что для улучшения условий роста и развития дуба черешчатого в исследуемом насаждении необходимо проводить проходные рубки в рядах клена остролистного. Если не осуществлять комплекс мер по содействию возобновлению в данной полезащитной полосе, то в дальнейшем может произойти смена дуба черешчатого на клены остролистный и татарский.

Для цитирования: Грибачева О.В. Современное состояние полезащитной полосы с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клена остролистного (*Acer platanoides* L.) // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 34–44. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.34

Ключевые слова: полезащитная полоса, дуб черешчатый, клен остролистный, древостой, кустарниковый ярус, напочвенный покров, средний диаметр дерева, общая и средняя площадь поперечного сечения ствола дерева.

Введение

Одним из основных принципов сельскохозяйственного использования пахотных земель является научно-обоснованное сочетание экологических и экономических интересов общества. Экологизация сельскохозяйственного производства предусматривает: рациональное использование земель на основе законов природы, учет потенциальных возможностей природных ресурсов, необходимость воспроизводства почвенного плодородия.

Защитные лесонасаждения являются одним из важнейших факторов экологической оптимизации агроландшафта. Они вносят изменения в экологическое и биологическое равновесие территории путем создания своеобразного микроклимата на почвах, прилегающих к лесным полосам, поглощения части поверхностного стока, что в конечном итоге влияет на продуктивность и качество продукции прилегающих агроценозов. Защитные насаждения в степной зоне имеют важное водоохранно-защитное, санитарно-гигиеническое, климатическое значение. При повышении полезной и общей лесистости происходит формирование более благоприятного микроклимата территории. Полезные полосы изучались многими отечественными и зарубежными учеными [2, 6, 10, 11, 16–22]. Однако в последнее время наблюдаются тенденции уничтожения деревьев в лесополосах, их естественное старение и уменьшение видового биоразнообразия в них.

Цель исследования – оценка современного состояния лесополосы в окрестностях с. Золотарёвка (Станично-Луганский р-н Луганской области Украины) с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и разработка необходимых мероприятий для ее восстановления.

Объекты и методы исследования

Достоверных архивных данных по времени создания и возрасту полезной лесополосы в окрестностях с. Золотарёвка (65 км от г. Луганска) не выявлено. Полезные полосы в Луганской области создавались в соответствии со сталинским планом преобразования природы, который был рассчитан на 1949–1965 гг. С учетом этой информации возраст древостоя в исследуемой полосе достиг критического значения 70–80 лет. В полосе преобладают старые особи дуба черешчатого, многоствольного клена остролистного и молодой подрост клена остролистного в возрасте 5–10 лет, который сформирует в дальнейшем новый состав древостоя.

В насаждении заложены две постоянные пробные площадки (1 и 2) в соответствии с ОСТ 56-69–83 [5], при ревизии которых использовали геоботанические и общепринятые лесоводственные методики [8, 14]. По результатам перечислительной таксации определяли состав полезной полосы, диаметр и среднюю высоту деревьев, их состояние по Крафту [4]. Оценку жизненного состояния деревьев проводили на основании «Санитарных правил в лесах РФ» [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Полезная лесополоса, пространственную структуру которой изучали, расположена в окрестностях с. Золотарёвка (в 65 километрах от г. Луганска). Территория, на которой произрастает исследуемая полезная полоса, относится к шестому агролесомелиоративному району Украины по Б.И. Логгину [1]. Почвы района – неглубокие с укороченным профилем, малогумусные обыкновенные черноземы. Этот район относится к наиболее подверженным суховеям территориям, где количество дней с суховеями достигает 16–24, в отдельные годы – 60. Преобладающее направление ветра при суховеях – восточное и юго-восточное. Рекомендованное направление продольных полос ССВ-ЮЮЗ.

Протяженность полевая защитная полоса составляет 0,86 км вдоль агроценоза с участием кукурузы обыкновенной (*Zea mays* L.), направление – с запада на восток, ширина – 13 м, площадь – 1,1 га. Лесополоса закладывалась двухъярусной: первый ярус – дуб черешчатый, второй – клен остролистный.

Пробные площадки 1 и 2 представлены дубом черешчатым (Дч) и кленом остролистным (Кло). Дуб черешчатый занимает три центральных ряда, клен остролистный – два крайних ряда. Дуб высевали гнездовым способом с последующим вводом сопутствующих и быстрорастущих пород. Площади прямоугольных пробных площадок: 1 – 1170,0 м², 2 – 1502,8 м². Конструкция полевой защитной полосы – ажурно-продуваемая. Состав насаждения – 6Дч4Кло. Кустарниковый ярус представлен терном колючим. Выявлен в небольшом количестве семенной и вегетативный подрост дуба черешчатого. Тип лесорастительных условий – сухая кленовая дубрава (D₁). Полнота насаждения – 0,5-0,6. Тип почвы – обыкновенные черноземы. Общий вид исследуемых защитных лесных полос в окрестностях с. Золотарёвка показан ниже.



Общий вид полевой защитной лесополосы с эдификатором дубом черешчатым (справа – крайние ряды, представленные кленом остролистным, слева – средние, представленные дубом черешчатым)

General view of forest shelterbelt with English oak as an edifier (on the right – last rows represented by Norway maple, on the left – middle rows represented by English oak)

Фитоценоз включает микрофитоценозы: древостои с преобладанием деревьев I и II класса по Крафту, кустарниковый ярус, травянистый ярус, подстилку. Первую микрогруппировку образует доминантный вид – дуб черешчатый, который относится к видам-эдификаторам, оказывающим существенное влияние на формирование фитоценоза. Вторая группа включает сопутствующие виды: клен остролистный, ясень зеленый (*Fraxinus lanceolata* Borkn.), вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.), грушу лесную (*Pyrus communis* subsp. *Pyraster* (L.) Ehrh.), яблоню лесную (*Malus sylvestris* (L.) Mill.), вишню магалебскую (*Prunus mahaleb* L.). Участие в древостое вида-интродукта – клена остролистного – особенно сильно подавляет развитие подроста местных видов, в том числе рода *Quercus* [10, 11]. У некоторых деревьев дуба черешчатого выявлены начальные признаки поражения листьев мучнистой росой и частичное повреждение блошкой дубовой (*Haltica quercetorum* Foudr.).

Кустарниковый ярус представлен терном колючим (*Prunus spinosa* L.) и бирючиной обыкновенной (*Ligustrum vulgare* L.). Терн колючий, являясь корнеотпрысковым кустарником, дает обильную поросль, образуя заросли и вытесняя травянистую растительность из лесополосы. В первичных пятнах *Prunus spinosa* L. при разрастании отмирание крупных скелетных ветвей в центре и заселение их среднерослыми и высокорослыми кустарниками. На следующих стадиях происходит поселяются в эти пятна низкорослые деревья (яблони лесной, вишни магалебской, кленов остролистного и татарского). В естественных фитоценозах терн колючий способствует распространению древесно-кустарниковой растительности за счет большого количества образуемой им прикорневой поросли и отсутствия травянистой растительности в центре зарослей. На краях лесополосы появляются корневые отпрыски, которые расширяют ее за счет пахотного поля. Поэтому несвоевременное ограничение роста и распространения терна колючего в лесополосах с участием дуба черешчатого приводит к угнетению последнего. В целях повышения возможности воспроизводства дуба путем естественного семенного возобновления необходимо осуществлять комплекс следующих мероприятий: рыхление почвы с частичным удалением подстилки в семенные годы; постоянные уходы за появляющимся возобновлением путем вырубki подлеска и поросли сопутствующих пород вокруг подростa дуба.

Наиболее многочисленным под пологом материнского насаждения является подрост кленов остролистного и татарского, а также вишни магалебской, которые первоначально не входили в состав древостоя изучаемой полезащитной лесополосы. Семена этих пород занесены из соседних лесных полос. Присутствие на пробных площадках подростa клена остролистного обусловлено регулярностью семеношения этой породы, высокой семенной продуктивностью, летучестью семян, ранним появлением всходов весной. Подрост дуба черешчатого на пробных площадках имеет вегетативное и семенное происхождение. На пробной площадке 1 протяженностью 90,0 м количество семенного подростa составило 1 шт. высотой 48,0 см, вегетативного – 3 шт. высотой соответственно 97,0; 128,0 и 155,0 см; на пробной площадке 2 протяженностью 115,6 м – соответственно 3 шт. высотой 18,1; 22,0 и 115,6 см и 3 шт. высотой 72,0; 81,0 и 111,0 см. Обладая высоким светолюбием, подрост дуба черешчатого при низкой освещенности под пологом высокополнотного насаждения развиваться не может [9, 17]. Исследования показали, что семенное и вегетативное возобновление дуба в изучаемой лесополосе недостаточное и неравномерное по площади. В научных работах других ученых доказано, что всходы дуба черешчатого, несмотря на их большое количество, погибают к концу первого вегетационного сезона. По данным П.Е. Сороговца [13], оптимальная освещенность для развития дубового подростa должна быть на уровне 31...48 %, при меньших значениях он угнетается. Однако Е.С. Павловский считает, что на ювенильном этапе формирования лесополосы требуется боковое отенение гнездовых дубков. В последующие годы для их осветления необходимо осуществлять разреживание или удаление деревьев быстрорастущих пород, которые проводятся с регулярностью 2-3 года после первого разреживания [6, 7].

Если не осуществлять комплекс мер по содействию возобновлению в полевосащитной лесополосе, то в дальнейшем произойдет смена дуба черешчатого на местные лиственные породы деревьев, в первую очередь на виды рода *Асер*. Подрост древесных пород в основном сосредоточен в широких окнах между деревьями дуба черешчатого.

Несвоевременность рубок ухода и загущенность в рядах клена остролистного приводят к затенению подроста дуба черешчатого. Сомкнутость древостоя в рядах клена остролистного составляет от 0,7 до 0,9, дуба черешчатого – от 0,5 до 0,6.

При отжиге пашни наблюдалось выгорание лесополосы и, как следствие, образование многоствольности у клена остролистного. Наблюдается от 3 до 5 стволов, разветвление ствола начинается на высоте 30...50 см и выше от корневой шейки.

В травостое обеих пробных площадок преобладают злаки и разнотравье, которые преимущественно сосредоточены в крайних рядах лесополосы. К семейству злаковых (*Poaceae* Barnhart) относят: мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), овсяницу луговую (*Festuca pratensis* Huds.), овсяницу побегоносную (*Agrostis stolonifera* L.), щитинник зеленый (*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.).

Площадь общего покрытия злаками на пробной площадке 1 составила 30 %, на пробной площадке 2 – 60 %. Разнотравье травянистого яруса представлено алтеем лекарственным (*Althaea officinalis* L.), молочаем солнцеглядом (*Euphorbia helioscopia* L.), полынью горькой (*Artemisia absinthium* L.), вероникой длиннолистной (*Veronica longifolia* L.), сокирками полевыми (*Consolida regalis* Gray), амарантом запрокинутым (*Amaranthus retroflexus* L.), живучкой хиосской (*Ajuga chia* Schreb.), марьянником дубравным (*Melampyrum nemorosum* L.), тысячелистником обыкновенным (*Achillea millefolium* L.).

По пробным площадкам алтей лекарственный и вероника длиннолистная расположены контагиозно, т. е. небольшими пятнами по всему фитоценозу. Фенологическое состояние растений в травянистом ярусе выявлено с преобладанием генеративного этапа (фенофаз). Приземный ярус представлен лишайниками и мхами. Большинство из них находятся на стволах деревьев. Практически всю наземную часть лесополосы покрывает подстилка толщиной до 1 см, представленная сухими листьями и ветками.

Установлено, что в насаждении идет лесообразовательный процесс, направленный на формирование лесного биоценоза с преобладанием клена остролистного. Однако при постепенном изреживании крайних рядов за счет удаления части деревьев клена остролистного можно избежать утончения деревьев дуба черешчатого и получить ценный кленово-дубовый древостой. В насаждениях, где по схеме смешения дуб высаживается только в среднем ряду, создать долговечное насаждение очень сложно, так как потребуются систематическое осветление дуба в молодом возрасте, в результате чего соседние ряды будут настолько изрежены, что появится угроза задернения почвы, а травы станут серьезным конкурентом. При размещении в ряду нескольких конкурирующих между собой пород уменьшается их угнетающее воздействие на дуб, но с увеличением ассортимента древесных пород в схемах смешения сокращаются сроки повторений рубок ухода в насаждениях, так как плановые рубки ухода создают лучшие условия роста оставшимся деревьям, а те, в свою очередь, тормозят развитие дуба.

Деревья дуба черешчатого из центрального ряда на юго-восточной и юго-западной сторонах имеют одинаковое количество стволов (табл. 1). У деревьев клена остролистного, произрастающего на пробной площадке 1, выявлено большее количество стволов на восточной стороне, чем на южной. Это свидетельствует о том, что для роста и развития клена остролистного необходимы полузатененные участки, но в то же время данная порода светолюбива и хорошо плодоносит лишь при достаточном освещении.

Таблица 1

**Характеристика пробных участков в полезащитной полосе
с эдификатором дубом черешчатым**

Ряд (сторона)	Вид растения	Среднее количество стволов на одном дереве, шт.
<i>Пробная площадка 1</i>		
Первый (восточная сторона)	Клен остролистный	5
Третий (юго-восточная сторона)	Дуб черешчатый	1
Пятый (южная сторона)	Клен остролистный	4
<i>Пробная площадка 2</i>		
Первый (западная сторона)	Клен остролистный	4
Третий (юго-западная сторона)	Дуб черешчатый	1
Пятый (южная сторона)	Клен остролистный	3

Станично-Луганский р-н, в котором находится с. Золотарёвка, расположен в северо-восточной степной физико-географической зоне, в северной части Луганской области. Климатические показатели на этой территории отличаются от показателей других районов. Так, в северной части области среднегодовая температура воздуха составляет 7,1...7,4 °С, в центральной части – 8,0 °С, суммарная солнечная радиация – соответственно 95...100 и 105...114 ккал/см² [15]. В целом климатические показатели северных районов Луганской области подходят для роста и развития клена остролистного и способствуют поддержанию его лесообразующей роли в формировании насаждений.

Диаметр деревьев клена остролистного и дуба черешчатого изменяется в зависимости от расположения деревьев и древостоя в целом относительно сторон света.

На пробной площадке 2, расположенной севернее пробной площадки 1, диаметр у деревьев дуба черешчатого составляет (22,00±1,03) см против (19,20±0,76) см на площадке 1 (табл. 2). Диаметр у модельных деревьев дуба черешчатого в полезащитной лесополосе – 13,0...31,0 см, клена остролистного – 5,0...33,0 см.

Аналогичные изменения диаметра в зависимости от расположения площадок отмечены и для клена остролистного. Наибольший диаметр у деревьев клена остролистного ((17,10±0,93) см) наблюдается на пробной площадке 2 при произрастании в пятом ряду, расположенном с южной стороны полосы.

Деревья дуба черешчатого центрального ряда должны быть в более благоприятных условиях, чем деревья, соседствующие с рядами клена. Такая закономерность должна наблюдаться при выращивании пород с соблюдением лесоводческих мероприятий. В третьем ряду (юго-восточная сторона) диаметр дуба наименьший – (19,00±0,76) см. На второй пробной площадке в третьем ряду (юго-западная сторона) диаметр деревьев несколько увеличивается и составляет (22,00±1,03) см, но много деревьев с кривыми стволами и отмечены

широкие просветы между деревьями. В среднем ряду ширина между посадочными местами для дуба черешчатого – 2,8 м. Согласно литературным данным [2, 3, 17], качественные дубово-ясеновые насаждения формируются при ширине междурядий 1,5...2,0 м. Чередование рядов кустарника и дуба не улучшают его рост, крупные кустарники нередко обгоняют дуб по высоте. Средний диаметр деревьев дуба черешчатого достигает максимальных значений во втором ряду (восточная сторона), где диаметр деревьев клена остролистного наименьший – $(14,05 \pm 0,64)$ см (табл. 2).

Таблица 2

Биометрические характеристики модельных деревьев дуба черешчатого и клена остролистного в полезащитной полосе

Ряд	Вид растения	Площадь поперечного сечения ствола дерева, м ²		Средний диаметр дерева, см
		общая	средняя	
<i>Пробная площадка 1</i>				
Первый (восточная сторона)	Клен остролистный	2827,0	37,7	14,05±0,64
Третий (юго-восточная сторона)	Дуб черешчатый	3945,2	74,4	19,20±0,76
Пятый (южная сторона)	Клен остролистный	1670,5	38,0	14,46±0,70
<i>Пробная площадка 2</i>				
Первый (западная сторона)	Клен остролистный	4199,4	64,6	16,41±0,80
Третий (юго-западная сторона)	Дуб черешчатый	4013,5	154,4	22,00±1,03
Пятый (южная сторона)	Клен остролистный	3958,8	78,2	17,10±0,93

Анализируя древостой, можно утверждать, что решающим фактором, влияющим на деревья дуба, будет состояние крайних рядов в лесополосе. При естественном формировании древостоя в насаждении, созданном коридорным или рядовым способом, выживаемость дуба зависит от отпада клена остролистного, который может выпадать из насаждения преимущественно только в том случае, если сильно поврежден вредителями или на него совместно влияет травянистая и кустарниковая растительность.

При естественном формировании насаждения, без проведения рубок, интенсивнее развивается клен, опережая рост дуба. И только там, где клен был в сильной степени угнетен, дуб выживает. В некоторых местах насаждения, во всех вариантах опыта, встречается дуб высотой 19,0...26,0 м с диаметром ствола до 28,0 см и площадью кроны до 28,0 м². Необходимо отметить, что площадь кроны дуба в четвертом ряду – 8,0 м², в центральном – 6,7 м².

Выводы

1. Деревья дуба черешчатого центрального ряда на юго-восточной и юго-западной сторонах полезащитной лесополосы имеют одинаковое количество стволов. У деревьев клена остролистного, произрастающего на пробной площадке 1, большее количество стволов выявлено на восточной стороне, чем на южной.

2. Диаметр деревьев клена остролистного и дуба черешчатого изменяется в зависимости от расположения деревьев и древостоя в целом относительно сторон света.

3. Средний диаметр деревьев дуба черешчатого достигает максимальной величины во втором ряду (восточная сторона), где диаметр деревьев клена остролистного наименьший – $(14,05 \pm 0,64)$ см.

4. В насаждении идет лесообразовательный процесс, направленный на формирование лесного биоценоза с преобладанием клена остролистного.

5. В целях повышения возможности воспроизводства дуба путем естественного семенного возобновления необходимо осуществлять комплекс следующих мероприятий по содействию возобновлению: рыхление почвы с частичным удалением подстилки в семенные годы; постоянные уходы за появляющимся возобновлением путем вырубki подлеска и поросли сопутствующих пород вокруг подростa дуба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логгинов Б.И.* Агролесомелиоративное районирование Украинской ССР. Киев: Госсельхозиздат УССР, 1991. С. 307–319.

2. *Манаенков А.С.* Закономерности водного режима, роста и долговечности искусственных древостоев в засушливых условиях // Изв. СПбЛТА. 2017. Вып. 221. С. 91–106. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.221.91-106

3. Методическое руководство по повышению долговечности широкополосных защитных насаждений на юге европейской территории России. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2013. 56 с.

4. Лесоустроительная инструкция: утв. приказом № 31 МПР России от 06.02.2008 г. Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77100/ (дата обращения: 12.12.2018 г.).

5. ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИЛХ, 1984. 50 с.

6. *Павловский Е.С.* Выращивание защитных насаждений в Каменной степи. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 170 с.

7. *Павловский Е.С.* Лесоводственные особенности агролесомелиоративных насаждений Каменной степи: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Воронеж, 1969. 38 с.

8. *Раменский Л.Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.

9. *Рыжков О.В.* Состояние и развитие дубрав Центральной лесостепи. Тула: Наука, 2001. 182 с.

10. *Рябцев И.С.* Возобновление широколиственных пород под пологом древостоя: дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2014. 180 с.

11. *Рябцев И.С., Тиходеева М.Ю., Рябцева И.М.* Подпологовое возобновление лесообразующих пород в широколиственных лесах разного возраста с господством дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 3, Биология. 2009. Вып. 2. С. 12–21.

12. Санитарные правила в лесах Российской Федерации: утв. приказом № 301 МПР России от 19.11.2007 г. Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72929/ (дата обращения: 12.12.2018).

13. *Сороговец П.Е.* К экологии дубового самосева (влияние света на рост и развитие) // Бюл. Ин-та биологии. 1957. Вып. III. С. 28–34.

14. *Сукачѳв В.Н.* Руководство к исследованию типов леса. М.; Л.: Гос. изд-во с.-х. и колхоз.-кооператив. лит., 1931. 328 с.

15. Фисуненко О.П., Жадант В.И. Природа Луганской области. Луганск: ЛГПИ им. Т.Г. Шевченко, 1994. 233 с.
16. Brandle J.R., Ruark G. Working Trees: Windbreaks for Carbon in the U.S. // Inside Agroforestry. 2000/2001. Vol. Fall 2000 / Winter 2001: Carbon. Pp. 1; 9.
17. Coates K.D. Tree Recruitment in Gaps of Various Size, Clearcuts and Undisturbed Mixed Forest of Interior British Columbia, Canada // Forest Ecology and Management. 2002. Vol. 155, iss. 1-3. Pp. 387–398. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00574-6
18. Concha J.Y., Alegre J.C., Pocomucha V. Determination of Carbon Reservations in the Aerial Biomass of Agroforestry Systems of *Theobroma cacao* L. in the Department of San Martin, Peru // Ecologia Aplicada. 2007. Vol. 6, no. 1-2. Pp. 75–82.
19. Jose S. Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview // Agroforestry Systems. 2009. Vol. 76, iss. 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1007/s10457-009-9229-7
20. Lacombe S., Bradley R.L., Hamel C., Beaulieu C. Do Tree-Based Intercropping Systems Increase the Diversity and Stability of Soil Microbial Communities? // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2009. Vol. 131, iss. 1-2. Pp. 25–31. DOI: 10.1016/j.agee.2008.08.010
21. Reynolds P.E., Simpson J.A., Thevathasan N.V., Gordon A.M. Effects of Tree Competition on Corn and Soybean Photosynthesis, Growth, and Yield in a Temperate Tree-Based Agroforestry Intercropping System in Southern Ontario, Canada // Ecological Engineering. 2007. Vol. 29, iss. 4. Pp. 362–371. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2006.09.024
22. Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Culdberg O., Bairlein F. Ecological Responses to Recent Climate Change // Nature. 2002. Vol. 416, no. 6879. Pp. 389–395.

Поступила 21.02.19

UDC 630*5:581.526.13:633.872./674.031.772.224.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.34

The Current State of the Shelterbelt Featuring English Oak (*Quercus robur* L.) and Norway Maple (*Acer platanoides* L.)

O.V. Gribatcheva, Candidate of Biology, Assoc. Prof., Head of the Department of Horticulture and Silviculture; ORCID: [0000-0002-6192-3939](https://orcid.org/0000-0002-6192-3939)

Lugansk National Agrarian University, gorodok LNAU-1, Lugansk, 91008, Ukraine; e-mail: olesya_kopaneva_78@mail.ua

Shelterbelt forests are one of the most important factors of ecological optimization of agrolandscape. The research purpose is to analyse the current state of the forest belt with the involvement of English oak (*Quercus robur* L.) and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in the vicinity of Zolotaryovka village (Stanichno-Luganskiy district of Lugansk region, Ukraine) and development of necessary measures for belt's regeneration. Archival data on the time of planting and age of the studied object were not found out. Shelterbelts in Lugansk region were created in accordance with Stalin's plan for the transformation of nature, which was designed for the period from 1949 till 1965. We laid out two permanent trial plots due to the branch standard OST 56-69–83 in the studied plantation. We determined the composition of the shelterbelt, the diameter and mean height of trees and their condition by Kraft using the results of the enumerative inventory. The vital status of trees was estimated based on the "Sanitary regulations in the forests of the Russian Federation". Undergrowth of Norway maple, Tatarian maple and mahaleb cherry (*Prunus mahaleb* L.) is the most numerous under the canopy of parent plantations. These species originally were not in the stand composition of the shelterbelt. It has been found that in the stand there is a forest-forming

process aimed at formation of a forest biocenosis with predominance of Norway maple. The decisive factor affecting the condition of oak trees in the shelterbelts is the condition of their last rows. The survival rate of oak depends on the fall of Norway maple with the natural formation of forest stand in the plantation created by the corridor or ordinary way. It was revealed that it is necessary to carry out increment felling in the rows of Norway maple in order to improve the conditions for growth and development of English oak in the studied plantation. If a set of measures for promotion of tree regeneration in the shelterbelt is not carried out, then in the future there may be a change of English oak to Norway maple and Tatarian maple trees.

For citation: Gribacheva O.V. The Current State of the Shelterbelt Featuring English Oak (*Quercus robur* L.) and Norway Maple (*Acer platanoides* L.). *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 34–44. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.34

Keywords: shelterbelt, English oak, Norway maple, forest stand, shrub layer, ground cover, average tree diameter, total and average tree crosscut area.

REFERENCES

1. Logginov B.I. *Agroforestry Zoning of Ukrainian SSR*. Kiev, Gossel'khozizdat USSR Publ., 1991, pp. 307–319.
2. Manaenkov A.S. The Regularities of Water Regime, Growth and Longevity of Artificial Forest Stands in Dry Conditions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2017, iss. 221, pp. 91–106. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.221.91-106
3. *Methodological Guidance for Improving the Durability of Wide-Strip Protective Plantations in the South of the European Part of Russia*. Volgograd, VNIALMI Publ., 2013. 56 p.
4. *Forest Management Instruction: Approved by the Order no. 31 of the Ministry of Natural Resources of Russia from February 6, 2008*. Available at: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77100/ (Accessed 12.12.18).
5. OST 56-69–83. *Forest Management Trial Plots. Method of Laying out*. Moscow, TsBNTILKh Publ., 1984. 50 p.
6. Pavlovskiy E.S. *Cultivation of Protective Plantations in the Kamennaya Steppe*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 170 p.
7. Pavlovskiy E.S. *Silvicultural Feature of Agroforestry Plantations of the Kamennaya Steppe*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 1969. 38 p.
8. Ramenskiy L.G. *Introduction to the Integrated Soil-Geobotanical Study of Lands*. Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1938. 620 p.
9. Ryzhkov O.V. *State and Development of Oak Woods of the Central Forest-Steppe*. Tula, Nauka Publ., 2001. 182 p.
10. Ryabtsev I.S. *Regeneration of Broad-Leaves Species under the Stand Canopy*: Dr. Biol. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2014. 180 p.
11. Ryabtsev I.S., Tikhodeeva M.Yu., Ryabtseva I.M. Under Shelterwood Regeneration of Woody Plants in Oak-Dominated (*Quercus robur* L.) Broadleaf Stands of Different Age. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta* [Vestnik of Saint Petersburg University], 2009, ser. 3, iss. 2, pp. 12–21.
12. *Sanitary Regulations in the Forests of the Russian Federation: Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of Russia on November 19, 2007*. Available at: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72929/ (Accessed 12.12.18).
13. Sorogovets P.E. On the Ecology of Oak Self-Seeding (Influence of Light on Growth and Development). *Byulleten' Instituta biologii*, 1957, iss. III, pp. 28–34.

14. Sukachev V.N. *Guidance to the Study of Forest Types*. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo sel'skokhozyaystvennoy i kolkhozno-kooperativnoy literatury, 1931. 328 p.

15. Fisunen O.P., Zhadant V.I. *Nature of Lugansk Region*. Lugansk, LGPI im. T.G. Shevchenko Publ., 1994. 233 p.

16. Brandle J.R., Ruark G. Working Trees: Windbreaks for Carbon in the U.S. *Inside Agroforestry*, 2000/2001, vol. Fall 2000 / Winter 2001: Carbon, pp. 1; 9.

17. Coates K.D. Tree Recruitment in Gaps of Various Size, Clearcuts and Undisturbed Mixed Forest of Interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 155, iss. 1-3, pp. 387–398. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00574-6

18. Concha J.Y., Alegre J.C., Pocomucha V. Determination of Carbon Reservations in the Aerial Biomass of Agroforestry Systems of *Theobroma cacao* L. in the Department of San Martin, Peru. *Ecologia Aplicada*, 2007, vol. 6, no. 1-2, pp. 75–82.

19. Jose S. Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview. *Agroforestry Systems*, 2009, vol. 76, iss. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s10457-009-9229-7

20. Lacombe S., Bradley R.L., Hamel C., Beaulieu C. Do Tree-Based Intercropping Systems Increase the Diversity and Stability of Soil Microbial Communities? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, vol. 131, iss. 1-2, pp. 25–31. DOI: 10.1016/j.agee.2008.08.010

21. Reynolds P.E., Simpson J.A., Thevathasan N.V., Gordon A.M. Effects of Tree Competition on Corn and Soybean Photosynthesis, Growth, and Yield in a Temperate Tree-Based Agroforestry Intercropping System in Southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 2007, vol. 29, iss. 4, pp. 362–371. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2006.09.024

22. Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Culdberg O., Bairlein F. Ecological Responses to Recent Climate Change. *Nature*, 2002, vol. 416, no. 6879, pp. 389–395.

Received on February 21, 2019

УДК 630*5:528.85:630*9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ
НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ, ДАННЫХ ЛЕСОУСТРОЙСТВА И АЛГОРИТМА k-NN
(НА ПРИМЕРЕ ЛОДЕЙНОПОЛЬСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Д.М. Черниховский, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [I-7020-2016](#),

ORCID: [0000-0002-6375-3080](#)

А.С. Алексеев, д-р геогр. наук, проф.; ResearcherID: [F-6891-2010](#),

ORCID: [0000-0001-8795-2888](#)

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;

e-mail: a_s_alekseev@mail.ru, cherndm2006@yandex.ru

Российская система национальной (государственной) инвентаризации лесов, действующая с 2007 г., в методическом отношении несовершенна и служит объектом критики и дискуссий. К слабым ее сторонам следует отнести недостаточное внимание, уделяемое дистанционным методам. Возможное направление совершенствования отечественной системы инвентаризации лесов – использование автоматической классификации их характеристик на основе материалов дистанционного зондирования Земли. Одним из перспективных алгоритмов автоматической классификации является метод «ближайшего соседа», или k-NN (k-nearest neighbors) метод, успешно применяемый при проведении инвентаризации лесов в других странах. Он основан на регрессии между спектральными характеристиками пикселей с известными характеристиками лесов и остальных пикселей изображения. Вопросы практического применения этого метода в целях национальной инвентаризации лесов впервые были поставлены и изучены финскими исследователями в 90-х гг. прошлого века. На протяжении двух последних десятилетий в разных странах проведено значительное количество экспериментов в этой области. Цель данного исследования – оценка возможности применения k-NN метода для определения обобщенных характеристик лесов на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области. Площадь лесничества – 401 866 га, в его состав входят 16 участков лесничества. В целях формирования набора тренировочных участков для классификации средствами геоинформационных технологий в пределах лесничества создана регулярная сеть с шагом 1×1 км. В качестве тренировочных участков, расположенных в узлах сети, использовались либо участки круглой формы радиусом 10 м, либо лесотаксационные выделы, которым присваивались лесотаксационные характеристики на основе материалов лесоустройства. Для проведения классификации применялись снимки Landsat-8 (спектральные каналы – GREEN, RED, NIR, SWIR 2). Выполнена автоматическая классификация снимков Landsat-8 по ряду лесотаксационных характеристик – среднему запасу на 1 га, среднему классу бонитета, средней относительной полноте, доле площади хвойных и лиственных насаждений. Результаты классификации k-NN методом сравнивались с материалами лесоустройства. Систематические ошибки оценки запаса, полноты и бонитета для территории Лодейнопольского лесничества составили менее 5 %. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего изучения теоретических и практических вопросов применения k-NN метода для определения характеристик лесов. Развитие данного направления может способствовать совершенствованию методики российской государственной инвентаризации лесов.

Для цитирования: Черниховский Д.М., Алексеев А.С. Метод определения характеристик лесов на основе материалов дистанционного зондирования Земли, данных

лесоустройства и алгоритма k-NN (на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области) // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 45–65. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

Ключевые слова: метод ближайших соседей, дистанционные методы, инвентаризация лесов, автоматическая классификация изображений, дистанционный зондирование Земли.

Введение

Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ) – приоритетное направление отечественных лесоучетных работ. Начиная с момента внедрения в 2007 г., является предметом острых дискуссий и критики. По совокупности причин отечественная методика ГИЛ (направление – «Определение количественных и качественных характеристик лесов») и получаемые на ее основе результаты признаются несовершенными [1–3, 15, 26]. К явным методическим недостаткам этого направления, отмечаемым многими специалистами, относят недостаточное внимание дистанционным методам, необоснованное планирование размещения наземных пробных площадей, а также экономически низкоэффективное одиночное (а не кластерное) размещение пробных площадей. Указанные противоречия особенно явно прослеживаются при сравнении действующей в России методики ГИЛ с методиками национальной инвентаризации лесов (НИЛ) других стран [11, 29]. Авторы обширного обзора [11] отмечают, что при разработке отечественной системы НИЛ целесообразно ориентироваться на опыт стран, сопоставимых с Россией по площади, занятой лесами (Канада, США). Также рекомендуется учитывать опыт стран, определяющих тенденции развития государственных систем инвентаризации лесов в Европейском регионе (Швеция, Финляндия, Германия).

Для решения задач НИЛ в разных странах активно применяются дистанционные методы [11, 29, 36, 40, 46, 47]. Одним из распространенных в мире алгоритмов автоматической классификации материалов спутниковой съемки в целях НИЛ является метод «ближайших соседей», или k-NN (k-nearest neighbors) метод, который основан на регрессии между спектральными характеристиками пикселей изображения с известными характеристиками лесов, относящимися к наземным пробным площадям, и остальных пикселей. Обзор публикаций демонстрирует значительный интерес к данному направлению на протяжении последних десятилетий. Впервые возможности практического применения k-NN метода были исследованы и опробованы в целях НИЛ в Финляндии в 1990 г. Вскоре он стал стандартом для работ по НИЛ в Финляндии, Швеции, позднее – в Австрии и США. Исследователь Erkki Tomppo в 1997 г. стал лауреатом премии Маркуса Валленберга за свои работы по k-NN методу. Сущность этого метода изложена в монографиях по НИЛ Финляндии «Forest Inventory: Methodology and Applications» [29] и «Multi-Source National Forest Inventory: Methods and Applications» [47], а также в многочисленных публикациях начала 2000-х гг. [27, 30–34, 37, 38, 41, 43, 46]. Особенности применения k-NN метода для решения задач инвентаризации лесов отдельных стран отражены в национальных руководствах по НИЛ и публикациях [27, 32, 33, 41, 46].

Необходимо отметить, что k-NN метод позволяет оценивать ряд важнейших характеристик лесов на основе данных, полученных при обследовании наземных пробных площадей, и материалов дистанционного зондирования Земли – ДЗЗ (в основном материалов съемки Landsat, находящихся в свободном доступе). Преимуществом k-NN метода является возможность оперативного получения результатов для значительных по площади территорий (стран, регионов, муниципалитетов) с приемлемой точностью для решения задач НИЛ и формированием карт распределения характеристик лесов.

Исследователи из разных стран активно изучают возможные направления дальнейшего применения и совершенствования k-NN метода. Помимо вопросов, касающихся решения задач НИЛ в разных странах [30–32, 34, 38, 39, 42, 45], изучаются возможности оптимизации самого алгоритма классификации, использования дополнительных данных и процедур обработки, способных повлиять на результат [29–32, 34, 35, 37, 38, 41, 42, 45, 47, 48].

Среди русскоязычных публикаций, посвященных применению и развитию методов автоматического дешифрирования материалов ДЗЗ в лесном хозяйстве, можно выделить ряд взаимопересекающихся направлений: фундаментальные исследования отображения характеристик лесов на материалах ДЗЗ [8, 9, 22]; картографирование растительности с выделением различных типов растительных группировок, изучением их структуры и состояния [14, 18, 19, 25]; оценка лесистости территорий [16]; инвентаризация охотничьих угодий [18]; изучение процессов лесовосстановления [4, 6, 7, 10], динамики лесных экосистем, природных и антропогенных ландшафтов [20, 24]; определение отдельных лесотаксационных характеристик лесов [16, 19, 21]; оценка лесопатологического состояния лесов [17].

В большинстве перечисленных публикаций решение поставленных задач осуществляется путем выполнения автоматической классификации материалов ДЗЗ (такими материалами в основном служат снимки Landsat).

Краткий обзор публикаций, связанных с автоматическим дешифрированием лесов, свидетельствует о значительном интересе ученых к данному направлению, высоком научном уровне проводимых исследований, знакомстве отечественных специалистов с мировым опытом, широком спектре потенциальных возможностей методов автоматического дешифрирования в лесном хозяйстве.

Есть основания предполагать, что действующая методика работ по ГИЛ (направление – «Определение количественных и качественных характеристик лесов») будет пересмотрена и усовершенствована. Среди вероятных направлений совершенствования этой методики – более активное использование дистанционных методов (в том числе автоматическая классификация материалов ДЗЗ) с учетом накопленного мирового опыта НИЛ.

Основная цель исследования – оценка возможностей применения k-NN метода для определения обобщенных характеристик лесов на основе материалов ДЗЗ на примере конкретного лесничества Ленинградской области.

Задачи исследования:

– формирование набора исходных пространственных данных для выполнения автоматической классификации лесов средствами геоинформационных технологий;

- оценка обобщенных характеристик лесов путем выполнения автоматической классификации материалов космической съемки k-NN методом;
- сравнение результатов классификации с результатами лесоустройства.

Актуальность исследования связана с общепризнанной необходимостью совершенствования методики отечественной системы ГИЛ. Рассматривается возможность применения в российских условиях k-NN метода – одного из наиболее распространенных в мире алгоритмов автоматической классификации лесов, успешно используемого при проведении НИЛ.

Новизна исследования заключается в экспериментальном применении k-NN метода для определения ряда обобщенных характеристик лесов на основе материалов съемки Landsat и данных лесоустройства конкретного лесничества.

Объекты и методы исследования

Исходными данными при выполнении НИЛ с использованием k-NN метода служат материалы наземных пробных площадей (ПП) и материалы ДЗЗ [29, 33, 46]. При этом наземные ПП обычно располагаются кластерами (в виде различных геометрических фигур) в узлах регулярной сети, покрывающей всю территорию страны. Отдельные ПП часто имеют форму круга радиусом около 10 м. Рекомендуется использовать порядка 500 ПП на одну сцену снимка Landsat [33]. Получение такого набора данных (в виде совокупности наземных ПП, расположенных в узлах регулярной сети) без организации масштабных исследований невозможно. Даже наземные ПП ГИЛ Российской Федерации не соответствуют подобным требованиям – их расположение не является регулярным (к тому же данные о координатах ПП ГИЛ засекречены), а известные примеры расположения ПП в отдельных регионах [23] демонстрируют приуроченность ПП ГИЛ к дорогам и рекам, что ставит под сомнение репрезентативность и охват лесорастительных условий. Использование данных лесоустройства отчасти позволяет решить задачу выбора тренировочных (пробных) участков для классификации. Именно таким образом поступили авторы работы [5], демонстрируя возможности k-NN метода.

В качестве модельной территории выбрано Лодейнопольское лесничество Ленинградской области (рис. 1).

Общая площадь лесничества составляет 401 866 га. В состав лесничества входят 16 участковых лесничеств. Последнее лесоустройство было проведено в 2017 г. [12]. Леса лесничества относятся к таежной зоне, Балтийско-Белозерскому таежному району Российской Федерации (Средне-Таежному району европейской части Российской Федерации). В лесничестве эксплуатационные леса составляют 55,6 %, защитные – 44,4 %. Площадь земель лесного фонда на 89,4 % представлена лесными землями, из которых покрытые лесной растительностью – 86,1 %, непокрытые – 3,3 %. На долю нелесных земель приходится 10,6 % территории лесничества, среди них преобладают болота (8,1 %). Земли, покрытые лесной растительностью, представлены сосняками (33,25 %), ельниками (31,74 %), березняками (26,48 %), осинниками (7,87 %) и насаждениями иных пород – ольхи серой и черной, ивы древовидной и др. (0,66 %).

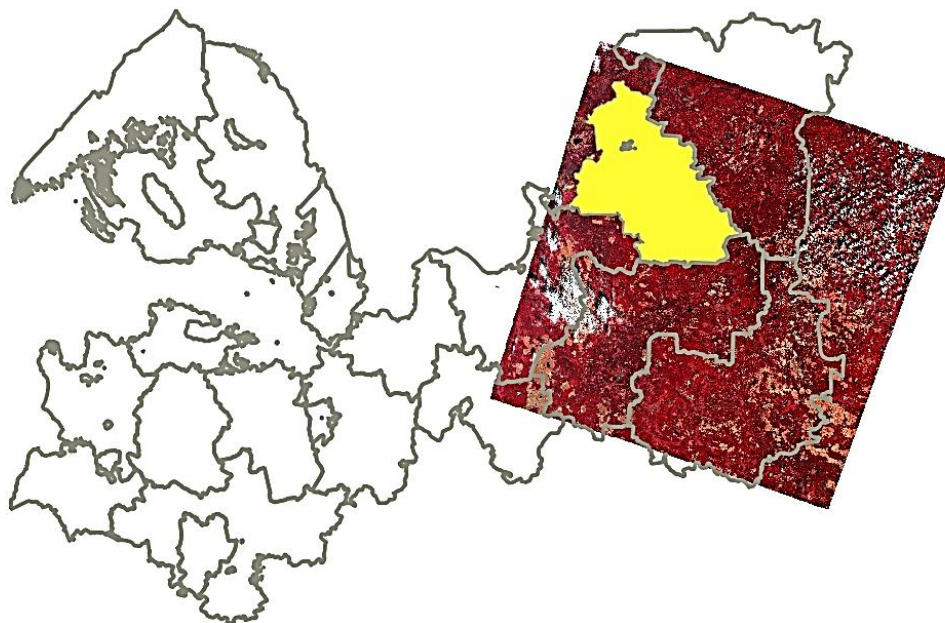


Рис. 1. Расположение Лодейнопольского лесничества и снимка Landsat-8 OLI (дата съемки – 20.08.2018 г.) на территории Ленинградской области (лесничество выделено желтым цветом)

Fig. 1. Position of the Lodeynopol'skoe forest district and satellite image Landsat-8 OLI (survey date 20.08.2018) in the territory of Leningrad Region (the district is highlighted in yellow)

Материалы лесоустройства не являются оптимальными исходными данными для формирования тренировочных участков НИЛ по ряду причин. При использовании подобных участков на качество результатов автоматической классификации будет негативно влиять пространственная неоднородность лесоустроительных выделов. Неоднородность лесотаксационных характеристик внутри выдела допускается Лесоустроительной инструкцией и подразумевает возможное отличие характеристик насаждений в разных частях выдела от обобщенной (указанной в таксационном описании) характеристики. Поэтому механическое присвоение ПП атрибутов лесотаксационного выдела, в который она попадает, может приводить к ошибкам.

При выборе тренировочных участков для классификации использовано два варианта:

- формирование буферных зон – полигонов радиусом 10 м вокруг узлов регулярной сети с шагом 1×1 км;
- выбор лесотаксационных выделов, пересекающихся с узлами сети.

В качестве базового программного обеспечения выбрана географическая информационная система (ГИС) QGIS. В табл. 1 кратко отражены основные этапы работ и их содержание.

Для оценки возможностей применения k-NN метода использовался свободный плагин (программный модуль) k-NN classifier к ГИС QGIS, разработанный для учебных целей (разработчик – Вентспилсская высшая школа, Латвия). Теоретической основой плагина послужили статьи [30, 44].

Таблица 1

Порядок и содержание основных этапов работ по оценке возможностей применения k-NN метода для определения обобщенных характеристик лесов на основе материалов лесоустройства

Этап	Содержание	Программное обеспечение
Формирование геоинформационного проекта модельной территории	Создание нового геоинформационного проекта на модельную территорию. Экспорт набора векторных слоев из геоинформационных баз данных лесоустройства	ГИС QGIS и WinGIS, программы PLP-2015, MS Excel
Загрузка и первичная обработка материалов ДЗЗ	Выбор и получение материалов спутниковых съемок территории лесничества. Выполнение атмосферной коррекции и обрезки изображений. Формирование наборов спектральных каналов	ГИС QGIS, плагин Semi-Automatic Classification, картографический сервис USGS (https://earthexplorer.usgs.gov)
Формирование набора тренировочных участков для классификации	Формирование наборов тренировочных участков на основе регулярной сети. Определение атрибутивных характеристик участков на основе данных лесоустройства и материалов ДЗЗ. Ограничение числа участков, пригодных для классификации	ГИС QGIS, плагин k-NN classifier, картографические сервисы открытого доступа
Выполнение автоматической классификации	Определение спектральных характеристик тренировочных участков. Выполнение классификации с использованием разных параметров. Оценка точности классификации	ГИС QGIS, плагин k-NN classifier

Результаты исследования и их обсуждение

Для территории Лодейнопольского лесничества выбраны снимки Landsat-8 (съемка выполнена 8 августа 2018 г.). Выбор, загрузка, атмосферная коррекция и обрезка каналов космических снимков проведены средствами плагина Semi-Automatic Classification для ГИС QGIS [28].

Для выполнения анализа был использован набор спектральных каналов Landsat: зеленый (Green, 0,525...0,600 мкм), красный (Red, 0,630...0,680 мкм), ближний инфракрасный (NIR, 0,845...0,885 мкм), коротковолновый инфракрасный (SWIR2, 1,560...1,660 мкм). Территория лесничества покрыта регулярной сеткой с шагом 1 км. В узлах сетки построены тренировочные участки круговой формы радиусом 10 м. Средствами ГИС-технологий участкам присвоен набор лесотаксационных характеристик на основе материалов лесоустройства. Для каждого участка определены следующие характеристики: преобладающая древесная порода, группа типов леса, средний класс бонитета, средний запас на 1 га, средняя относительная полнота. Далее на основе материалов лесоустройства и снимков высокого разрешения открытого доступа из дальнейшего анализа были исключены участки, попадающие на нелесные и не покрытые лесом земли, на облака и их тени, а также насаждения возрастом до 40 лет (такие насаждения обычно имеют неоднородную пространственную структуру и сложны для адекватного описания дистанционными методами).

Сформировано два варианта наборов тренировочных участков на основе регулярной сети с шагом 1 км:

вариант 1 – с использованием круговых площадок радиусом 10 м (969 площадок общей площадью 30,0 га);

вариант 2 – с использованием лесотаксационных выделов, попадающих на узлы сети (638 участков общей площадью 6 346,1 га)

На рис. 2 показаны общая схема расположения тренировочных участков на снимке Landsat, а также фрагменты их расположения для классификации в виде круговых площадок и лесотаксационных выделов, находящихся в узлах регулярной сети.

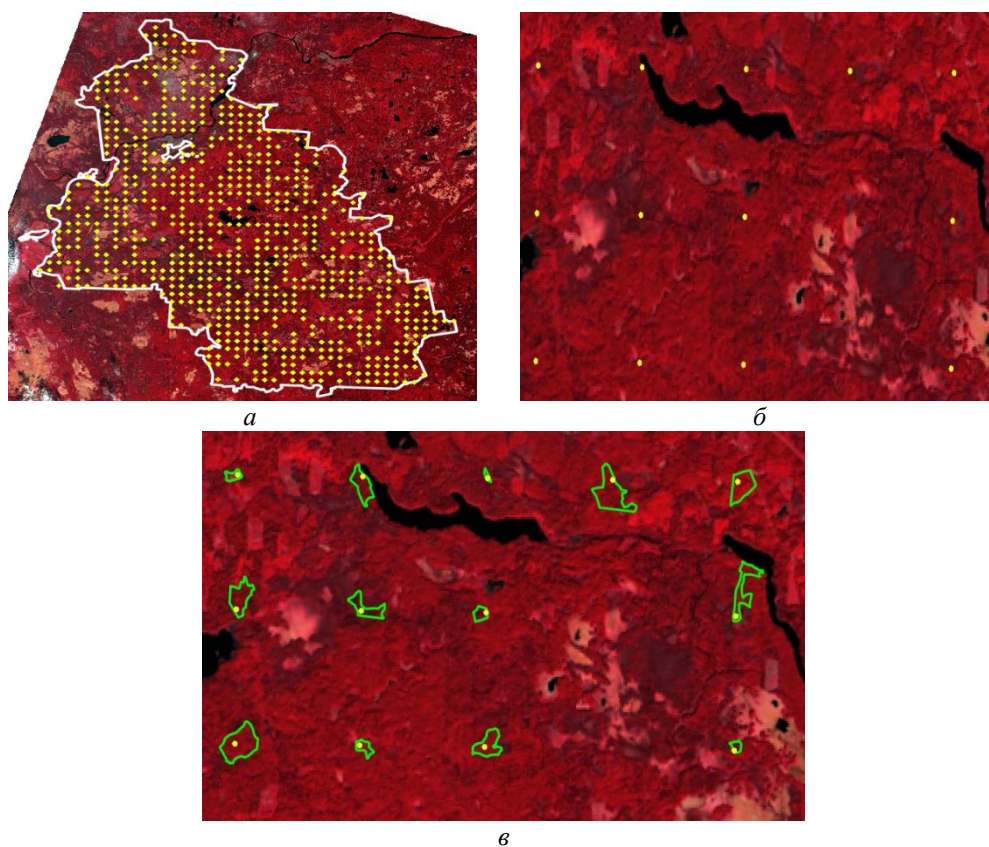


Рис. 2. Расположение сети тренировочных участков на территории Лодейнопольского лесничества Ленинградской области: *а* – схема расположения сети тренировочных участков на снимке Landsat с шагом 1 км в пределах лесничества; *б* – фрагмент снимка Landsat с расположением круговых тренировочных участков в узлах регулярной сети с шагом 1 км; *в* – фрагмент снимка Landsat на территорию лесничества с расположением лесотаксационных выделов в узлах регулярной сети с шагом 1 км

Fig. 2. The position of the trial plots network on the territory of the Lodeynopol'skoe forest district of Leningrad region: *a* – the scheme of the trial plots network in the Landsat image with the resolution of 1 km within the boundaries of the district; *б* – a fragment of the Landsat image with the location of round trial plots in the nodes of the regular network with the resolution of 1 km; *в* – a fragment of the Landsat image with the location of forest inventory compartments in the nodes of the regular network with the resolution of 1 km

Средствами плагина k-NN classifier выполнена автоматическая классификация снимка Landsat по набору характеристик лесов – среднему запасу древесных пород на 1 га, средней относительной полноте, среднему классу бонитета, группам преобладающих пород. Использовались следующие настройки: число ближайших соседей – 3; дистанционная метрика – евклидово расстояние; спектральные каналы – Green, Red, NIR, SWIR2. На основе полученных в результате классификации растровых карт средствами ГИС-технологий оценены обобщенные значения лесотаксационных характеристик внутри лесотаксационных выделов (рис. 3).

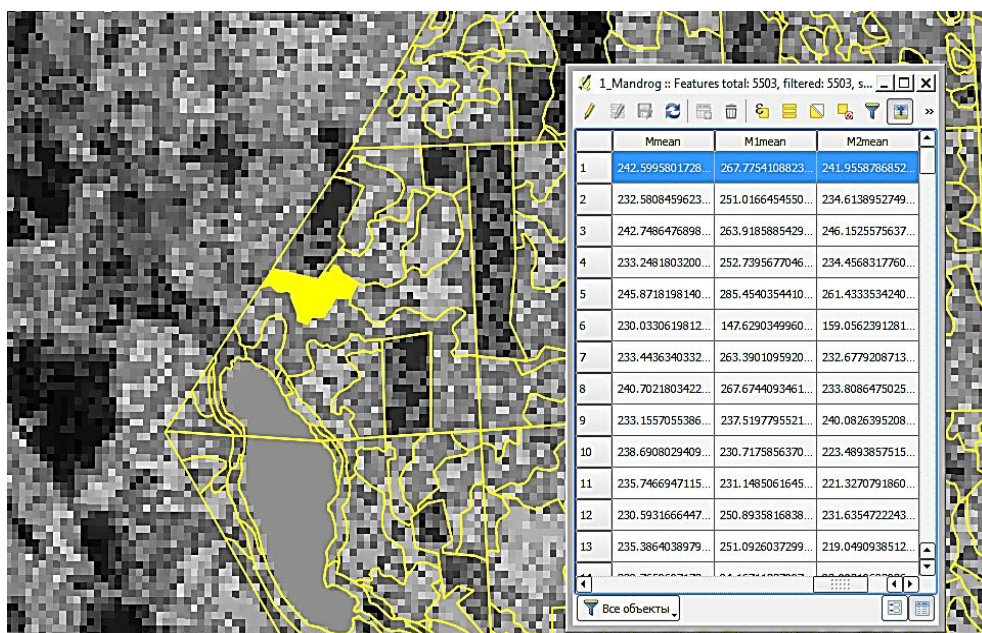


Рис. 3. Фрагмент растровой карты значений среднего запаса древесных пород, определенных в результате k-NN классификации, и векторный слой границ лесотаксационных выделов (на основе результатов классификации для каждого лесотаксационного выдела определены средние значения запасов)

Fig. 3. A fragment of the raster map of growing stock average values of tree species obtained as a result of using the k-NN classification, and the vector layer of the boundaries of the forest inventory compartments (average values of growing stock are determined for each forest inventory compartment based on the results of classification)

Критериями оценки качества k-NN классификации при расчетах служили: среднеквадратическая ошибка RMSE (Root Mean Square Error) анализируемого показателя (при оценке количественных или непрерывных характеристик) и статистика Каппа-Коэна – KHAT (при оценке качественных или категориальных характеристик).

Среднеквадратическая ошибка оценивается как

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}, \quad (1)$$

где \hat{y}_i – значение параметра, определенное в результате классификации; y_i – значение классифицируемого параметра в соответствии с исходными данными пробных площадей; N – общее число пикселей раstra.

Статистика Каппа–Коэна

$$\text{КНАТ} = \frac{d - q}{N - q}, \quad (2)$$

где d – число случаев получения правильных результатов (сумма значений, находящихся на диагонали матрицы ошибок); q – число случайных результатов, вычисляемое через число результатов в столбцах n_c и строках n_r матрицы ошибок [13, 44]:

$$q = \sum_{i=1}^N n_c n_r / N. \quad (3)$$

Для определения средних запасов каждого выдела по материалам лесоустройства использованы базы данных. Средние запасы каждого выдела на основе результатов k-NN классификации вычислялись с помощью операции «Зональная статистика» в ГИС QGIS. Сравнение полученных результатов по участковым лесничествам Лодейнопольского лесничества показано в табл. 2–4.

Оценки качества классификации по варианту 1 (участки круглой формы) составили: по среднему запасу $\text{RMSE} = 50,45 \text{ м}^3/\text{га}$; по относительной полноте $\text{RMSE} = 0,86$; по классу бонитета $\text{RMSE} = 0,72$; по группам пород $\text{КНАТ} = 0,51$.

Оценки качества классификации по варианту 2 (выделы лесоустройства) составили: по среднему запасу $\text{RMSE} = 67,97 \text{ м}^3/\text{га}$; по относительной полноте $\text{RMSE} = 1,23$; по классу бонитета $\text{RMSE} = 0,92$; по группам пород $\text{КНАТ} = 0,54$.

Полученные оценки качества определялись путем сравнения значений исходных (данные лесоустройства) и прогнозируемых (установленных в результате k-NN классификации) характеристик лесов для пикселей, относящихся к тренировочным участкам. Сравнительно высокие значения ошибок характерны для k-NN метода оценки лесов и не являются критичными. Считается, что точность классификации будет возрастать с увеличением размеров оцениваемых площадей [40].

Кроме типовой оценки качества классификации на основе тренировочных участков выполнялась оценка систематических и случайных ошибок определения обобщенных характеристик лесов по результатам классификации на уровне участковых лесничеств. Средствами ГИС-технологий оценивались средневзвешенные значения обобщенных лесотаксационных показателей по выделам участковых лесничеств. Например, средневзвешенные значения запаса на 1 га (см. табл. 2) определялись по следующей формуле:

$$\overline{M}_j = \frac{\sum_{i=1}^N S_i M_i}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad (4)$$

где \overline{M}_j – средневзвешенный запас лесных насаждений на 1 га по j -му участковому лесничеству, $\text{м}^3/\text{га}$; N – число выделов, шт.; S_i – площадь i -го выдела, га; M_i – средний запас i -го выдела, $\text{м}^3/\text{га}$.

Таблица 2

Сравнение результатов оценки запасов (м³/га) лесных насаждений на основе k-NN классификации снимка Landsat-8 с материалами лесоустройства на примере Лудейнопольского лесничества Ленинградской области

№ п/п	Участковое лесничество	Число выделов, шт./общая площадь, га	По данным лесоустройства	По результатам классификации с использованием лесотаксационных выделов	
				По данным лесоустройства	По результатам классификации с использованием лесотаксационных выделов
1	Мандрогское	3 944 / 11 019,5	248,9	215,2	198,7
2	Кондушское	4 273 / 12 733,1	201,6	201,2	183,8
3	Свирское	6 610 / 20 663,7	201,6	196,6	188,1
4	Лудейнопольское	3 110 / 13 365,2	195,9	206,7	196,8
5	Тенское	2 552 / 12 378,1	209,3	217,0	210,7
6	Шоткусское	2 016 / 8 202,6	175,9	169,4	169,9
7	Луговское	2 392 / 12 135,8	214,4	206,5	193,1
8	Шапшинское	4 819 / 16 289,1	231,6	216,1	212,2
9	Доможировское	3 514 / 12 958,0	163,2	173,8	172,9
10	Свирское сельское	6 383 / 23 277,2	211,8	212,6	207,2
11	Яровицкое	3 944 / 17 612,7	197,7	207,6	201,4
12	Алеховицкое	4 531 / 19 343,3	217,2	220,7	219,9
13	Ребовское	7 047 / 27 082,2	235,7	223,0	222,7
14	Пирозерское	3 762 / 15 598,1	235,5	216,1	211,5
15	Алеховицкое сельское	5 128 / 18 821,0	213,7	222,7	220,5
16	Тервеницкое	5 752 / 28 249,6	233,7	225,4	223,6
			Случайная ошибка определения запаса, %		±6,55
			Систематическая ошибка определения запаса, %		-1,14

Таблица 3
Сравнение результатов оценки относительной полноты и класса бонитета лесных насаждений на основе k-NN классификации снимка Landsat-8 с материалами лесоустройства на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области

№ п/п	Участковое лесничество	Относительная полнота				Класс бонитета			
		по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	леса таксационных выделов	по результатам классификации с использованием круговых площадок	по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	леса таксационных выделов	
1	Мандрогское	0,66	0,64	0,61	4,46	4,85	5,09		
2	Кондушское	0,62	0,63	0,60	4,96	5,04	5,29		
3	Сви́рское	0,63	0,63	0,62	4,90	5,03	5,14		
4	Лодейнопольское	0,67	0,64	0,64	4,73	4,66	4,66		
5	Тененское	0,66	0,63	0,63	4,59	4,50	4,55		
6	Шоткусское	0,62	0,60	0,60	5,37	5,53	5,53		
7	Луговское	0,66	0,65	0,65	4,46	4,62	4,63		
8	Шапшинское	0,62	0,62	0,63	4,70	4,52	4,61		
9	Доможировское	0,61	0,60	0,61	5,57	5,48	5,44		
10	Сви́рское сельское	0,61	0,63	0,63	4,63	4,67	4,71		
11	Яровицкое	0,68	0,65	0,64	4,90	4,85	4,90		
12	Алеховицкое	0,67	0,64	0,64	4,76	4,64	4,68		
13	Ребовское	0,63	0,62	0,63	4,53	4,43	4,52		
14	Пирозерское	0,68	0,63	0,64	4,47	4,49	4,57		
15	Алеховицкое сельское	0,60	0,63	0,63	4,45	4,39	4,44		
16	Тервеницкое	0,64	0,63	0,63	4,17	4,26	4,32		
Случайная ошибка, %		–	±3,18	±3,31	–	±3,14	±4,21		
Систематическая ошибка, %		–	–1,66	–2,07	–	0,42	1,93		

Полученные значения систематических и случайных ошибок определения обобщенных характеристик лесов по участковым лесничествам Лодейнопольского лесничества оказались незначительными (табл. 2, 3). Для таких характеристик лесов, как средний запас, относительная полнота и средний класс бонитета, значения систематических и случайных ошибок были близкими. По перечисленным показателям также не отмечается значительной разницы между двумя выбранными вариантами тренировочных участков (круговые пробные площади и выделы лесоустройства).

Полученные результаты в целом не противоречат литературным данным. Ошибки k-NN классификации на уровне пикселей и насаждений хорошо изучены в Финляндии [29, 40, 43].

Для нахождения площадей групп преобладающих древесных пород по участковым лесничествам определялось число пикселей, отнесенных к хвойной или лиственной группе. Затем число пикселей умножалось на площадь одного пикселя (сторона пикселя снимка Landsat-8 – 30 м, площадь пикселя – 0,09 га).

Оценка результатов классификации по преобладающим породам показала неудовлетворительные результаты. Поэтому использовали группировку покрытых лесом площадей по преобладающим породам (хвойные и лиственные). Приемлемые по качеству классификации результаты были получены только для второго варианта тренировочных участков (на основе выделов лесоустройства).

В табл. 4 приведены результаты сравнения площадей групп насаждений по данным материалов лесоустройства и k-NN классификации. Значительные ошибки при использовании варианта 1 пробных участков (круговые площадки радиусом 10 м) можно объяснить недостаточным охватом пикселей и варьированием породного состава (соответственно, и спектральных характеристик) в пределах лесотаксационных выделов. Так, одна круговая площадка радиусом 10 м может располагаться в пределах от одного до четырех пикселей Landsat-8 с размером стороны 30 м. При использовании в качестве тренировочных участков лесотаксационных выделов учитываются десятки и сотни пикселей в пределах выделов. В производственных условиях (при организации и проведении полевых работ по НИЛ) сплошной перечет деревьев на значительных по площади выделах будет слишком трудоемким, а сам процесс выделения границ лесостроительных выделов достаточно сложным, субъективным и не связанным с выполнением работ по НИЛ. Вероятно, компромиссом между рассмотренными в данном исследовании вариантами (круговыми площадками и выделами лесоустройства) являются кластеры из 4–12 близко расположенных пробных площадей, используемые в большинстве стран.

Таблица 4

Сравнение результатов оценки площадей (га) групп лесных насаждений на основе k-NN классификации снимка Landsat-8 с материалами лесоустройства на примере Лодейнопольского лесничества Ленинградской области

№ п/п	Участковое лесничество	Лиственные			Хвойные		
		по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	лесотаксационных выделов	по данным лесоустройства	по результатам классификации с использованием круговых площадок	лесотаксационных выделов
1	Мандрогское	4 588,1	6 871,5	2 083,1	6 430,7	4 198,9	8 987,3
2	Кондушское	2 315,7	10 730,1	1 297,4	10 415,7	2 083,7	11 516,4
3	Сварское	5 676,6	16 685,3	4 419,7	14 979,9	4 114,4	16 380,0
4	Лодейнопольское	5 386,5	8 118,6	6 380,7	7 978,7	5 329,7	7 067,6
5	Тененское	5 324,4	4 795,6	6 098,0	7 039,1	7 658,4	6 356,0
6	Шоткусское	952,8	7 020,7	792,7	7 213,9	1 238,1	7 466,1
7	Лытовское	6 043,7	7 820,1	6 486,0	6 092,1	4 385,1	5 719,1
8	Шапшинское	5 600,5	4 723,3	6 963,3	10 688,6	11 657,3	9 417,3
9	Доможировское	1 911,1	11 664,8	2 090,0	11 033,8	1 370,9	10 945,7
10	Сварское сельское	9 365,6	11 332,2	9 269,8	13 880,0	12 097,4	14 159,7
11	Яровицкое	2 456,8	6 429,7	2 933,4	15 153,9	11 294,0	14 790,3
12	Алеховицкое	2 872,2	3 747,7	4 511,3	16 471,1	15 705,5	14 941,9
13	Ребовское	11 903,2	4 558,7	11 542,6	15 179,0	22 696,7	15 712,7
14	Пирозерское	5 642,6	11 361,2	6 437,3	9 949,2	4 324,7	9 248,7
15	Алеховицкое сельское	9 195,6	4 814,8	8 999,6	9 625,4	14 119,2	9 934,4
16	Тервенничское	17 912,2	5 899,3	15 998,5	10 224,4	21 731,4	11 632,2
Случайная ошибка, %		–	±208,71	±12,93	–	±55,05	±26,99
Систематическая ошибка, %		–	121,68	–1,69	–	–18,23	0,63

Заключение

Результаты экспериментального исследования по оценке обобщенных характеристик лесов путем выполнения автоматической классификации космических снимков k-NN методом подтвердили перспективность указанного метода. Ряд обобщенных характеристик лесов на уровне участковых лесничеств (средний запас на 1 га, площади хвойных и лиственных насаждений, средняя относительная полнота и класс бонитета) был определен с приемлемой точностью.

При этом исследование проводилось по упрощенному алгоритму (в качестве тренировочных данных использовались материалы лесоустройства; установки k-NN классификации были фиксированными; маски территорий, исключаемых их анализа, не применялись; использовалась одна сцена Landsat-8).

Наиболее очевидным направлением возможного практического применения k-NN метода в России является ГИЛ. Ожидаемая в ближайшее время модификация методики ГИЛ с высокой степенью вероятности затронет те же аспекты, что и в большинстве стран, чьи методики НИЛ за последние десятилетия эволюционировали по схожему сценарию. К этим аспектам относятся: регулярное размещение наземных ПП, активное использование материалов дистанционного зондирования и средств их обработки (в частности, k-NN метода), использование дополнительных пространственных данных и геоинформационных технологий. Результатами внедрения перечисленных изменений в методики НИЛ стали: сокращение расходов на НИЛ, повышение точности, актуальности и оперативности выполнения оценок характеристик лесов, возможность одновременного охвата значительных по площади и разнообразных по пространственной структуре территорий (включая труднодоступные леса).

Знакомство с k-NN методом классификации материалов ДДЗ, как эффективным современным инструментом инвентаризации и мониторинга лесов, представляет интерес для отечественной лесной науки, лесоустроительного производства и лесного образования. Также целесообразно инициирование и проведение научно-исследовательской и опытно-экспериментальной деятельности в данном направлении с изучением накопленного мирового опыта и возможной адаптацией k-NN метода к условиям отечественных лесохозяйственных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А.С.* Теоретические основы государственной (национальной) инвентаризации лесов // Лесн. хоз-во. 2009. № 4. С. 31–33.
2. *Алексеев А.С.* Методологические основы организации и проведения государственной инвентаризации лесов // Материалы Всерос. совещ. «Использование материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды», Брянск, 9–10 окт. 2013 г. М.: Рослесинфорг, 2013. С. 87–96.
3. *Архипов В.И.* Особенности национальной инвентаризации. Какая инвентаризация лесов требуется России? // Материалы Всерос. совещ. «Использование материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды», Брянск, 9–10 окт. 2013 г. М.: Рослесинфорг, 2013. С. 105–112.
4. *Белова Е.И., Еришов Д.В.* Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.

5. Гольцев В., Толонен Т., Сюнёв В., Далин Б., Герасимов Ю., Карвинен С. Лесозаготовки и логистика в России – в фокусе научные исследования и бизнес-возможности: отчет исследовательского проекта (заключительный) / ред. С. Карвинен // Working Papers of the Finnish Forest Research Institut. 2012. Вып. 221. 159 с. Режим доступа: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp221.htm> (дата обращения: 16.05.2019).

6. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Использование материалов съемок при оценке восстановительной динамики лесов на равнинных территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 208–216.

7. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам // Лесоведение. 2013. № 5. С. 76–85.

8. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat // Лесоведение. 2014. № 5. С. 3–12.

9. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 10–20. DOI: 10/7868/S0205961416050080

10. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П., Зукерт Н.В. Сезонная информативность многоспектральных космических снимков высокого разрешения при изучении породно-возрастной динамики лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 87–94.

11. Креснов В.В., Страхов В.В., Филиппчук А.В. Национальная инвентаризация лесов в зарубежных странах // Лесхоз. информ. 2008. № 10-11. С. 53–88.

12. Лесохозяйственный регламент Лодейнопольского лесничества Ленинградской области / ФГБУ «РОСЛЕСИНФОРГ» филиал ФГБУ «РОСЛЕСИНФОРГ» «СЕВЗАПЛЕСПРОЕКТ». СПб., 2017. 306 с.

13. Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. 154 с.

14. Нешатаев М.В., Нешатаев В.Ю. Комбинированный метод картографирования растительности (на примере Лапландского заповедника) // Изв. СПбЛТА. 2012. Вып. 201. С. 29–40.

15. Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Глушенков И.С. Государственная инвентаризация российских лесов // Лесотехн. журн. 2014. № 2. С. 60–67. DOI: 10.12737/4508

16. Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Корсинов Р.С. Определение лесистости и количественных характеристик лесов по космическим снимкам Sentinel-2 (на примере Шебекинского муниципального района Белгородской обл.) // Лесхоз. информ. 2017. № 4. С. 85–93. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2017.4.09

17. Савченко А.А., Выводцев Н.В. Оценка возможностей применения данных дистанционного зондирования при мониторинге санитарного и лесопатологического состояния лесов // Учен. заметки ТОГУ. 2015. Т. 6, № 4. С. 658–661. Режим доступа: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU_6_237.pdf (дата обращения: 16.05.2019).

18. Сидоренков В.М., Дороженкова Э.В., Лопатин Е.В., Рябцев О.В., Сидоренкова Е.М. Зонирование территории Удмуртской Республики по категориям среды обитания охотничьих ресурсов на основе данных спутниковой съемки Landsat 8 OLI-TIRS // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 3(19). С. 84–93. DOI: 10.12737/14156

19. Солдатенков А.А. Дешифрирование состава лесной растительности в условиях среднегорного рельефа // Вестн. Адыг. гос. ун-та. 2014. Сер. 4: Естеств.-мат. и техн. науки. Вып. 1(133). С. 127–130.

20. Соромотин А.В., Бродт Л.В. Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки Landsat // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4, № 1. С. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49

21. Терехов А.Г., Макаренко Н.Г., Пак И.Т. Автоматический алгоритм классификации снимков Quickbird в задаче оценки полноты леса // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 3. С. 580–583. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583
22. Толкач И.В., Кравченко О.В., Ожич О.С., Таркан А.В., Ильючик М.А. Закономерности изменчивости спектральных яркостей полога основных лесобразующих пород Беларуси на снимках сканера ADS 100 // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2(198). С. 43–49.
23. Фарбер С.К., Брюханов Н.В. Материалы массовой таксации и государственной инвентаризации лесов: характеристика расхождений, причины, анализ // Сиб. лесн. журн. 2014. № 5. С. 16–28.
24. Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Вагнер А.А. Антропогенные модификации и трансформации ландшафтов в бассейне р. Касмала: классификация и динамика на основе данных дистанционного зондирования // Вестн. Алтайской науки. 2014. № 1(19). С. 233–240.
25. Шарикалов А.Г., Якутин М.В. Анализ состояния таежных экосистем с использованием методики автоматизированного дешифрирования // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2014. Вып. 3-1(83). С. 123–127. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-22
26. Ярошенко А.Ю., Владимирова Н.А., Кобяков К.Н. Предложения по оптимизации государственной инвентаризации лесов с точки зрения использования ее результатов в интересах охраны окружающей среды // Материалы Всерос. совещ. «Использование материалов государственной инвентаризации лесов в интересах охраны окружающей среды», Брянск, 9–10 окт. 2013 г. М.: Рослесинфорг, 2013. С. 82–86.
27. Beaudoin A., Bernier P.Y., Guindon L., Villemaire P., Guo X.J., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R.J. Mapping Attributes of Canada's Forests at Moderate Resolution through kNN and MODIS Imagery // Canadian Journal of Forest Research. 2014. Vol. 44(5). Pp. 521–532. DOI: 10.1139/cjfr-2013-0401
28. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.2.0.1. 2019. 212 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
29. Forest Inventory: Methodology and Applications / ed. by A. Kangas, M. Maltamo. Netherlands: Springer, 2006. 362 p. DOI: 10.1007/1-4020-4381-3
30. Franco-Lopez H., Ek A.R., Bauer M.E. Estimation and Mapping of Forest Stand Density, Volume, and Cover Type Using the k-Nearest Neighbors Method // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 77, iss. 3. Pp. 251–274. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00209-7
31. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 7–11.
32. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110, iss. 4. Pp. 420–430. DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.018
33. Haapanen R., Ek A. Software and Instructions for kNN Applications in Forest Resources Description and Estimation // Department of Forest Resources Staff Paper Series. St. Paul, MN: University of Minnesota, 2001. No. 152. 19 p.
34. Haapanen R., Ek A.R., Bauer M.E., Finley A.O. Delineation of Forest/Nonforest Land Use Classes Using Nearest Neighbor Methods // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 89, iss. 3. Pp. 265–271. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.002
35. Katila M., Tomppo E. Selecting Estimation Parameters for the Finnish Multi-source National Forest Inventory // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 76, iss. 1. Pp. 16–32. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00188-7
36. Koch B. Remote Sensing Supporting National Forest Inventories NFA // Knowledge Reference for National Forest Assessments. Rome: FAO, 2015. Pp. 77–92. Режим доступа at: <http://www.fao.org/3/a-i4822e.pdf> (дата обращения: 21.02.19).

37. Koukal T., Suppan F., Schneider W. The Impact of Relative Radiometric Calibration on the Accuracy of kNN-Predictions of Forest Attributes // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 17–21.

38. McInerney D., Pekkarinen A., Haakana M. Combining Landsat ETM+ with Field Data for Ireland's National Forest Inventory – A Pilot Study for co. Clare // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 12–16.

39. McRoberts R.E. Remote Sensing Support for the National Forest Inventory of the United States of America // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 1–6.

40. McRoberts R.E., Tomppo E.O. Remote Sensing Support for National Forest Inventories // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110, iss. 4. Pp. 412–419. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.034

41. Meng Q., Cieszewski C.J., Madden M., Borders B.E. K Nearest Neighbor Method for Forest Inventory Using Remote Sensing Data // GIScience & Remote Sensing. 2007. Vol. 44, iss. 2. Pp. 149–165. DOI: 10.2747/1548-1603.44.2.149

42. Nilsson M., Holm S., Reese H., Wallerman J., Engberg J. Improved Forest Statistics from the Swedish National Forest Inventory by Combining Field Data and Optical Satellite Data Using Post-Stratification // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 22–26.

43. Özsakabaşı F. Classification of Forest Areas by k Nearest Neighbor Method: Case Study, Antalya. M.Sc. in Geodetic and Geographic Information Thesis. Antalya: Middle East Technical University, 2008. 101 p.

44. Supervised kNN Classifier (kNN). Updated: 22.05.2017. 19 p. Режим доступа: https://github.com/mbev/kNN/blob/master/kNN_Documentation.pdf (дата обращения: 21.02.19).

45. Tomppo E.O. The Finnish Multi-Source Inventory // Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31–June 3, 2005 / ed. by H. Olsson. Borås: Skogsstyrelsen, 2005. Pp. 27–37.

46. Tomppo E., Czaplewski R., Mäkisara K. The Role of Remote Sensing in Global Forest Assessment. Forest Resources Assessment – WP no. 61. Rome: FAO, 2002. Режим доступа: <http://www.fao.org/docrep/006/ad650e/AD650E00.htm#TopOfPage> (дата обращения: 21.02.19).

47. Tomppo E., Haakana M., Katila M., Peräsaari J. Multi-Source National Forest Inventory: Methods and Applications. Netherlands: Springer, 2008. 373 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8713-4

48. Tomppo E., Halme M. Using Coarse Scale Forest Variables as Ancillary Information and Weighting of Variables in k-NN Estimation: A Genetic Algorithm Approach // Remote Sensing of Environment, 2004. Vol. 92, iss. 1. Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.003

Поступила 21.02.19

UDC 630*5:528.85:630*9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

The Method for Determining Forest Characteristics Based on Earth Remote Sensing Materials, Forest Management Data and the k-NN Algorithm (Case Study of Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region)

D.M. Chernikhovskii, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [I-7020-2016](https://orcid.org/0000-0002-6375-3080),
ORCID: [0000-0002-6375-3080](https://orcid.org/0000-0002-6375-3080)

A.S. Alekseev, Doctor of Geography, Prof.; ResearcherID: [F-6891-2010](https://orcid.org/0000-0001-8795-2888),
ORCID: [0000-0001-8795-2888](https://orcid.org/0000-0001-8795-2888)

St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: cherndm2006@yandex.ru,
a_s_alekseev@mail.ru

The Russian system of National (State) Forest Inventory (NFI) valid from 2007 is methodologically imperfect and serves as a target of criticism and discussion. Insufficient attention paid to remote sensing should be attributed to the system's weaknesses. A possible way of improving the NFI system is the use of automatic classification of forests' characteristics based on materials of Earth remote sensing. One of the advanced automatic methods for forest remote sensing materials classification is k-NN or k-nearest neighbors algorithm, which have been successively used in the NFIs in other countries. It is based on regression between the spectral response characteristics of pixels with known forest characteristics and remaining pixels of the image. Questions of practical application of this method for the purposes of NFI were first raised and studied by Finnish researchers in the 1990s. Over the past two decades, a considerable amount of research in this area has been carried out in different countries. The purpose of our research is to assess the feasibility of using the k-NN method for determining the generalized characteristics of forests on the example of the Lodeynopol'skoe forest district in Leningrad region. The forest district area is 401,866 ha. It consists of 16 forest sub-districts. A regular network was created at a pitch of 1×1 km in order to form a set of trial plots for the classification by the means of GIS-technologies within the forest district. Round-shaped plots with a radius of 10 m or forest inventory compartments were used as trial plots located in the network nodes. Forest description for both types of plots was taken from the forest management data. Landsat-8 images were used for the classification (spectral channels: GREEN, RED, NIR, SWIR 2). The Landsat-8 images were automatically classified according to a number of forest inventory characteristics: average growing stock per 1 ha; middle class of bonitet; average relative density; share of coniferous and deciduous plantations area. The results of the k-NN classification were compared with the forest management materials. Systematic errors in the assessment of growing stocks, completeness and bonitet for the territory of Lodeynopol'skoe forest district made up less than 5 %. The obtained results confirm the potential of further study of conceptual and practical issues of the k-NN method application for determining forest characteristics. The development of this direction can contribute to the improvement of the Russian State Forest Inventory methodology.

For citation: Chernikhovskii D.M., Alekseev A.S. The Method for Determining Forest Characteristics Based on Earth Remote Sensing Materials, Forest Management Data and the k-NN Algorithm (Case Study of Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region). *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 45–65. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.45

Keywords: k-nearest neighbors algorithm, remote sensing methods, forest inventory, automatic classification of images.

REFERENCES

1. Alekseev A.S. Theoretical Foundations of the State (National) Forest Inventory. *Lesnoye khozyaystvo*, 2009, no 4, pp. 31–33.
2. Alekseev A.S. Methodological Foundations of Organization and Conducting the State Forest Inventory. *Proceedings of the All-Russian Conf. "The Use of Materials of the State Forest Inventory for Environmental Protection"*, Bryansk, October 9–10, 2013. Moscow, Roslesinform Publ., 2013, pp. 87–96.
3. Arkhipov V.I. Special Features of the National Forest Inventory. What Kind of Forest Inventory does Russia Need? *Proceedings of the All-Russian Conf. "The Use of Materials of the State Forest Inventory for Environmental Protection"*, Bryansk, October 9–10, 2013. Moscow, Roslesinform Publ., 2013, pp. 105–112.
4. Belova E.I., Ershov D.V. Assessing Reforestation on Clear Cuts Based on Landsat Time Series. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 5, pp. 339–345.
5. Gol'tsev V., Tolonen T., Syuney V., Dalin B., Gerasimov Yu., Karvinen S. Wood Harvesting and Logistics in Russia – Focus on Research and Business Opportunities: Final

Report of the Research Project. Ed. by S. Karvinen. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. 2012, iss. 221. 159 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp221.htm> (Accessed 16.05.19).

6. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Application of Space Images for Reforestation Dynamics Evaluating on the Plane Territories. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2011, vol. 8, no. 2, pp. 208–216.

7. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. The Eco-Dynamical Study of Forest-Forming Process with Space Imagery. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2013, no. 5, pp. 76–85.

8. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Dynamics of Spectral Brightness for Species/Age Structure of Groups of the Forest Types on LANDSAT Satellite Images. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2014, no. 5, pp. 3–12.

9. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Influence of Forest Canopy Morphology and Relief on Spectral Characteristics of Taiga Forests. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2016, no. 5, pp. 10–20. DOI: 10/7868/S0205961416050080

10. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P., Zukert N.V. Seasonal Informative Properties of Multispectral High-Resolution Space Images for Studying of Forest Species and Age Dynamics. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2012, vol. 9, no. 1, pp. 87–94.

11. Kresnov V.V., Strakhov V.V., Filipchuk A.V. National Forest Inventory in Foreign Countries. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2008, vol. 10-11, pp. 53–58.

12. *Forest Management Regulation of the Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad Region*. FSBI «ROSLESINFORG», Branch of the FSBI «ROSLESINFORG» «SEVZAPLESPROEKT». Saint Petersburg, 2017, 306 p.

13. Malysheva N.V. *Automated Interpretation of Aerospace Images of Forest Stands*: Educational Textbook. Moscow, MSTU Publ., 2012. 154 p.

14. Neshataev M.V., Neshataev V.Yu. Combined Method for Vegetation Mapping (On the Example of the Lapland Reserve). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2012, iss. 201. pp. 29–40.

15. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Glushenkov I.S. State Forest Inventory of Russian Forests. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, no. 2, pp. 60–67. DOI: 10.12737/4508

16. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Korsikov R.S. Automated Detection of Forest Cover and Forest Characteristics Kolichestvennykh of Municipal Shebekinskiy District of the Belgorod Region on Space. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2017, no. 4, pp. 85–93. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.4.09

17. Savchenko A.A., Vyvodzev N.V. Evaluate the Possible Application Remote Sensing Data for Monitoring the Health and Forest State Forests. *Uchenye zametki TOGU* [Scientists notes PNU], 2015, vol. 6, no. 4, pp. 658–661. Available at: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU_6_237.pdf (Accessed 16.05.19).

18. Sidorenkov V.M., Doroshenkova E.V., Lopatin E.V., Ryabtsev O.V., Sidorenkova E.M. Zoning of the Udmurtija Republic Territory by Game Resource Habitat Categories Based on Landsat 8 Oli-Tirs Satellite Survey Data. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2015, vol. 5, no. 3(19), pp. 84–93. DOI: 10.12737/14156

19. Soldatenkov A.A. Interpretation of Structure of Forest Vegetation in Conditions of Mid-Mountain Relief. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [The Bulletin of Adyge State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences], 2014, iss. 1(133), pp. 127–130.

20. Soromotin A.V., Brodt L.V. Monitoring of Vegetation Cover during the Development of Oil and Gas Fields According to the Landsat Multispectral Survey Data. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology], 2018, vol. 4, no. 1, pp. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49

21. Terehov A.G., Makarenko N.G., Pak I.T. Automatic Classification Algorithm of QuickBird Images in the Problem of Evaluating of Forest Completeness. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2014, vol. 38, iss. 3, pp. 580–583. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-580-583
22. Tolkach I.V., Kravchenko O.V., Ozhich O.S., Tarkan A.V., Il'yuchik M.A. Regularities of Variability of the Spectral Brightness Canopy of the Main Forest Species of Belarus on Images of Scanner ADS 100. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry. Environmental management. Reprocessing of renewable resources], 2017, no. 2(198), pp. 43–49.
23. Farber S.K., Bryuhanov N.V. Mass Forest Survey and State Forest Inventory Data: Specification of the Discrepancies, Causes, Analysis. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2014, no. 5, pp. 16–28.
24. Chernykh D.V., Biryukov R.Yu., Zolotov D.V., Vagner A.A. Anthropogenic Modifications and Transformations of Landscapes in the Basin of the Kasmala River: Classification and Dynamics Based on the Remote Sensing Data. *Vestnik altaiskoy nauki*, 2014, no. 1(19), pp. 233–240.
25. Sharikalov A.G., Yakutin M.V. The Analysis of Taiga Ecosystems Condition Applying Automatic Decoding Method. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of Altai State University], 2014, iss. 3-1(83), pp. 123–127. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-22
26. Yaroshenko A.Yu., Vladimirova N.A., Kobayakov K.N. Suggestions on Optimizing the State Forest Inventory in Turms of Using Its Results for Environmental Protection. *Proceedings of the All-Russian Workshop "The Use of Materials of the State Forest Inventory for Environmental Protection"*, Bryansk, October 9–10, 2013. Moscow, Roslesinforg Publ., 2013, pp. 82–86.
27. Beaudoin A., Bernier P.Y., Guindon L., Villemaire P., Guo X.J., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R.J. Mapping Attributes of Canada's Forests at Moderate Resolution through kNN and MODIS Imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 44(5), pp. 521–532. DOI: 10.1139/cjfr-2013-0401
28. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.2.0.1*. 2019. 212 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
29. *Forest Inventory: Methodology and Applications*. Ed. by A. Kangas, M. Malta-mo. Netherlands, Springer, 2006. 362 p. DOI: 10.1007/1-4020-4381-3
30. Franco-Lopez H., Ek A.R., Bauer M.E. Estimation and Mapping of Forest Stand Density, Volume, and Cover Type Using the k-Nearest Neighbors Method. *Remote Sensing of Environment*, 2001, vol. 77, iss. 3, pp. 251–274. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00209-7
31. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 7–11.
32. Gjertsen A.K. Accuracy of Forest Mapping Based on Landsat TM Data and a kNN-Based Method. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 110, iss. 4, pp. 420–430. DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.018
33. Haapanen R., Ek A. Software and Instructions for kNN Applications in Forest Resources Description and Estimation. *Department of Forest Resources Staff Paper Series*. St. Paul, MN, University of Minnesota, 2001, no. 152. 19 p.
34. Haapanen R., Ek A.R., Bauer M.E., Finley A.O. Delineation of Forest/Nonforest Land Use Classes Using Nearest Neighbor Methods. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 89, iss. 3, pp. 265–271. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.002
35. Katila M., Tomppo E. Selecting Estimation Parameters for the Finnish Multi-source National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment*, 2001, vol. 76, iss.1, pp. 16–32. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00188-7

36. Koch B. Remote Sensing Supporting National Forest Inventories NFA. *Knowledge Reference for National Forest Assessments*. Rome, FAO, 2015, pp. 77–92. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i4822e.pdf> (Accessed 21.02.19).

37. Koukal T., Suppan F., Schneider W. The Impact of Relative Radiometric Calibration on the Accuracy of kNN-Predictions of Forest Attributes. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 17–21.

38. McInerney D., Pekkarinen A., Haakana M. Combining Landsat ETM+ with Field Data for Ireland's National Forest Inventory – A Pilot Study for co. Clare. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 12–16.

39. McRoberts R.E. Remote Sensing Support for the National Forest Inventory of the United States of America. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 1–6.

40. McRoberts R.E., Tomppo E.O. Remote Sensing Support for National Forest Inventories. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 110, iss. 4, pp. 412–419. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.034

41. Meng Q., Cieszewski C.J., Madden M., Borders B.E. K Nearest Neighbor Method for Forest Inventory Using Remote Sensing Data. *GIScience & Remote Sensing*, 2007, vol. 44, iss. 2, pp. 149–165. DOI: 10.2747/1548-1603.44.2.149

42. Nilsson M., Holm S., Reese H., Wallerman J., Engberg J. Improved Forest Statistics from the Swedish National Forest Inventory by Combining Field Data and Optical Satellite Data Using Post-Stratification. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 22–26.

43. Özsakabaşı F. *Classification of Forest Areas by k Nearest Neighbor Method: Case Study, Antalya*. M.Sc. in Geodetic and Geographic Information Thesis. Antalya, Middle East Technical University, 2008. 101 p.

44. Supervised kNN Classifier (kNN). Updated: 22.05.2017. 19 p. Available at: https://github.com/m6ev/kNN/blob/master/kNN_Documentation.pdf (Accessed 21.02.19).

45. Tomppo E.O. The Finnish Multi-Source Inventory. *Proceedings of ForestSat 2005, Borås, May 31 – June 3, 2005*. Ed. by H. Olsson. Borås, Skogsstyrelsen, 2005, pp. 27–37.

46. Tomppo E., Czaplewski R., Mäkisara K. *The Role of Remote Sensing in Global Forest Assessment. Forest Resources Assessment – WP no. 61*. Rome, FAO, 2002. Available at: <http://www.fao.org/docrep/006/ad650e/AD650E00.htm#TopOfPage> (Accessed 21.02.19).

47. Tomppo E., Haakana M., Katila M., Peräsaari J. *Multi-Source National Forest Inventory: Methods and Applications*. Netherlands, Springer, 2008. 373 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8713-4

48. Tomppo E., Halme M. Using Coarse Scale Forest Variables as Ancillary Information and Weighting of Variables in k-NN Estimation: A Genetic Algorithm Approach. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 92, iss. 1, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.003

Received on February 21, 2019

УДК 630*181

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.66

СВЯЗЬ ДИССИММЕТРИИ ШИШЕК СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ С ФОРМИРОВАНИЕМ В НИХ СЕМЯН

Р.С. Хамитов¹, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [Z-1461-2018](#),
ORCID: [0000-0003-1490-3553](#)

С.А. Корчагов¹, д-р с.-х. наук, проф.

М.Д. Мерзленко², д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.

В.Ф. Ковязин³, д-р биол. наук, проф.; *ResearcherID*: [Y-5917-2018](#),
ORCID: [0000-0002-3118-8515](#)

Е.Н. Кузнецов⁴, канд. с.-х. наук, доц.

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; e-mail: r.s.khamitov@mail.ru, kors45@yandex.ru

²Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, п/о Успенское, Московская обл., Россия, 143030; e-mail: md.merzlenko@mail.ru

³Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский о-в, 21-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106; e-mail: vfkedr@mail.ru

⁴Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова; Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: evg_kuznetsov@mail.ru

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) – вид, активно интродуцируемый в леса таежной зоны Восточно-Европейской равнины. Признано, что улучшение ценных хозяйственных свойств этого древесного вида и сохранение его внутривидового разнообразия следует осуществлять селекционными методами. При этом наибольшую селекционную ценность представляют семена, имеющие пищевое значение. В связи с этим актуален анализ косвенных морфологических признаков, связанных с семенной продуктивностью. Исследования проведены в целях выявления связей диссимметрии шишек сосны кедровой сибирской с их морфометрическими параметрами и череззернистостью. Изучены образцы шишек, отобранные в интродукционной Жерноковской кедровой роще (в 25 км к востоку от г. Грязовец Вологодской области). Выявлено, что правизна-левизна диссимметрии шишек сопряжена с череззернистостью. Для *D*-изомеров (правые изомеры) шишек характерно образование значительного количества односеменных чешуй. Их содержание предопределяет существенную флуктуацию количества и массы семян. У левых изомеров (*L*-изомеры) масса семян в шишках больше обусловлена массой 1000 шт., чем вариацией размеров шишек (за исключением их длины). При создании орехоносных насаждений следует выбраковывать деревья с череззерницей. Для выявления особей, продуцирующих такие шишки, требуется исследовать образцы шишек с *D*-изомерией. Ввиду того, что для *L*-форм взаимосвязь размеров шишек и количества семян выражена сильнее, для отбора деревьев крупношишечной формы (по признаку длины шишек) в качестве образцов необходимо использовать шишки с левосторонней изомерией.

Для цитирования: Хамитов Р.С., Корчагов С.А., Мерзленко М.Д., Ковязин В.Ф., Кузнецов Е.Н. Связь диссимметрии шишек сосны кедровой сибирской с формированием в них семян // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 66–73. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.66

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, лесная селекция, шишки, диссимметрия, череззерница.

Введение

К настоящему времени признано, что сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) – это ценный древесный вид, имеющий орехоносное, лесообразующее и декоративное значение. Эти качества способствуют ее активной

интродукции в таежную зону Восточно-Европейской равнины [1, 2]. Сохранение внутривидового полиморфизма и улучшение хозяйственно ценных свойств сосны кедровой сибирской следует осуществлять селекционными методами [1, 4, 8]. Необходимость использования селекционных методов в лесокультурной практике признана международным научным сообществом [14]. Наибольшую ценность представляют семена этого вида, имеющие пищевое значение. В связи с этим актуально совершенствование селекционной работы путем выявления коррелятивных признаков. Семенная продуктивность сосны кедровой сибирской варьирует на географическом, индивидуальном, эндогенном уровнях и зависит от наследственных и внешних факторов [4, 6, 11]. Такая изменчивость отмечена и у других представителей рода сосна [15, 16].

Важным аспектом биотектоники хвойных растений является диссимметрия их шишек. Структурно-пространственное развитие растений в целом может осуществляться по следующим принципам: линейному, радиальному, концентрическому и спиральному. Спиральное построение, в свою очередь, подчинено распределению в соответствии с числовыми рядами Люка и Фибоначчи [12]. Под филлотаксисом понимают навинчивание чешуй вокруг оси шишек, равно как и листорасположение на побеге. Проходящую через все чешуйки спираль принято называть генетической. Обычно ее весьма сложно различить визуально. Вместе с этим достаточно четко выражены несколько разнонаправленных спиралей – парастих, напоминающих многоходовый винт. Ориентированность навинчивания генетической спирали и определяет измерение шишек по аналогии с правилом правого или левого винта. Если отдельная парастиха или сама генетическая спираль направлена снизу вверх и справа налево – ее считают левой, а в противоположном случае – правой [3]. Такая изменчивость выражена на эндогенном уровне, поскольку у каждого дерева образуются шишки разной диссимметрии. Вместе с тем равное количество *L*- и *D*-изомеров свойственно только взрослым обильно семеносущим особям с развитой широкой кроной. Отдельные растения могут формировать несколько большее количество шишек с той или иной диссимметрией. Внутри насаждений представленность таких особей примерно одинаковая. Деревья, образующие преимущественно *D*-формы шишек, рекомендуется сохранять при формировании насаждений, поскольку они являются более продуктивными [10].

Для шишек сосны кедровой сибирской характерно, что в их дистальной и апикальной частях под семенными чешуями вместо двух формируется лишь одно нормально развитое семя. Зачастую односеменные чешуи встречаются и в проксимальной части шишек. Образование развитых полнозернистых семян предопределено нормальным развитием семяпочек. Формирование из двух расположенных на семенной чешуе семяпочек лишь одной достаточно частое явление, называемое череззерницей. Для селекции на урожайность семян не рекомендуется отбирать особи с такими дефектами [7].

Цель исследования – выявление связей между диссимметрией шишек сосны кедровой сибирской и их морфометрическими параметрами и череззернистостью.

Объекты и методы исследования

Для проведения исследований отобраны образцы зрелых шишек в интродукционной Жерноковской кедровой роще. Насаждение расположено вблизи д. Жерноково Грязовецкого р-на Вологодской области на расстоянии

630 км от естественной границы ареала этого древесного вида (58°51'12.24" с.ш., 40°38'12.72" в.д.). Насаждение создано в 1977 г. на площади 1,2 га посадкой 4-летних сеянцев, выращенных во временном питомнике, расположенном здесь же, из семян, заготовленных в местном интродукционном насаждении (Чагринская роща). Густота посадки составила 1,1 тыс. шт./га. Расстояние между саженцами в рядах равно ширине междурядий – 3 м. В 1999 г. роща объявлена памятником природы местного значения («Кедровый питомник»). К настоящему времени в ней сохранилось 615 экз. кедра (47 % от первоначальной густоты посадки). Средняя высота их стволов составляет 8,7 м, диаметр – 7,1 см.

В качестве образцов использовали опавшие в конце августа шишки, найденные под кронами 60 деревьев. Эти образцы высушивали в течение 2 месяцев при комнатной температуре.

Выявление форм по типу диссимметрии осуществляли по методике, предложенной П.Б. Юрасовым и А.И. Лобановым [13]. Количество парастих (спиралей семенных чешуй) определяли, отмечая маркером любую парастиху, закручивающуюся по оси справа налево (по часовой стрелке), от дистальной к апикальной части шишки, считая ее как первую левую. Далее подсчитывали оставшиеся парастихи, параллельные ей. Таким же образом находили правые спирали, вращая шишку против хода часовой стрелки. Количество левых и правых парастих отмечали в виде формулы, характеризующей морфологическую форму шишки по диссимметрии. Если число левых парастих составляло 3, а правых – 5, то формулу записывали в виде дроби 3/5. К *L*-изомерам относили образцы, имеющие формулу 3/5, а к *D*-изомерам – 5/3.

Каждую шишку взвешивали на лабораторных весах с точностью до $\pm 0,01$ г. Линейные параметры шишек (длину и диаметр) измеряли электронным штангенциркулем с точностью до $\pm 0,01$ мм. Определяли количество семян в шишке и число одно- и двусеменных чешуй. Для взвешивания содержащихся в шишке семян и 1000 шт. семян использовали электронные весы.

Результаты исследования и их обсуждение

Между образцами *D*- и *L*-изомеров шишек не установлено значимых различий по их линейным параметрам и массе. Вместе с тем между этими группами наблюдаются статистически значимые различия по количеству (абсолютному и выраженному в процентах) одно- и двусеменных чешуй (табл. 1). М.Г. Романовский [5] указывает, что особи, часто продуцирующие шишки, содержащие значительное количество односеменных чешуй, имеют генетический дефект и не способны завершить создание копий ДНК в одной или нескольких хромосомах.

Для левых изомеров характерно незначительное количество односеменных чешуй.

У противоположной формы их содержание на 43 % больше. По содержанию нормально развитых чешуй с двумя семенами выражена обратная тенденция. У шишек с левосторонней генетической спиралью двусеменных чешуй образуется на 21 % больше, чем у *D*-изомеров. Существенность различий между выборками статистически доказана на 5 %-м уровне значимости.

Таблица 1

Характеристика шишек с различным направлением генетической спирали

Показатель	Морфологическая форма по типу диссимметрии ($M \pm m$)		Достоверность различия t_{ϕ}^*
	Левая (L)	Правая (D)	
Длина, см	6,51±0,16	6,27±0,14	1,15
Диаметр, см	4,69±0,05	4,68±0,07	0,13
Масса, г	28,19±1,39	26,55±1,18	0,90
Содержание чешуй, шт.:			
односеменных	11±1	16±1	2,44
двусеменных	32±2	25±2	2,66
Процент чешуй:			
односеменных	26±3	39±3	3,19
двусеменных	74±3	61±3	3,19

*Коэффициент корреляции достоверен на 5 %-м уровне значимости $t_{05} = 2,0$.

Имеется не менее четкое различие и по процентному содержанию двусеменных чешуй между D - и L -формами. Поскольку общее количество семенных чешуй в правосторонних формах меньше, а абсолютное количество односеменных больше, то существенно ниже и относительное количество двусеменных. У левосторонних экземпляров, напротив, процент таких чешуй на 13 % выше.

Сопряженная флуктуация размеров и массы шишек, а также количества, массы и размеров семян, не сказалась на различиях между изомерами по характеристике семян (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика семян из шишек с разным типом диссимметрии

Показатель	Морфологическая форма по типу диссимметрии		Достоверность различия t_{ϕ}^*
	Левая (L)	Правая (D)	
Содержание семян в шишке, шт.	71±3	67±3	0,85
Масса семян в шишке, г	17,54±0,74	16,28±0,85	1,13
Длина, мм	11,5±0,1	11,3±0,1	1,68
Ширина, мм	7,9±0,1	7,5±0,1	1,58
Коэффициент формы	0,68±0,01	0,67±0,01	0,89
Масса 1000 шт., г	250,00±7,89	243,11±6,13	0,69

*Коэффициент корреляции достоверен на 5 %-м уровне значимости $t_{05} = 2,0$.

Не установлено статистически значимых различий D - и L -изомеров по морфоструктурным параметрам семян (табл. 2). Отсутствие существенных различий между этими формами по массе 1000 шт. семян отмечалось нами ранее у сосны кедровой сибирской, произрастающей в Чагринской роще [2].

Применение корреляционного анализа не позволило выявить сопряженные вариации у обеих форм шишек между массой семян и числом односеменных чешуй. Кроме того, в шишках, характеризующихся левой изомерией, отсутствуют взаимосвязи между массой семян с одной стороны и диаметром шишки, количеством двусеменных чешуй и процентом односеменных и двусеменных чешуй – с другой.

Вместе с этим у *D*-формы проявляется более сильная сопряженная флуктуация количества семян и биометрических параметров шишек. Именно для этой формы свойственна связь с относительным содержанием односеменных чешуй и количеством семян ($r = 0,74 \pm 0,08$). Между обеими диссимметрическими формами умеренной теснотой сопряжения с количеством семян характеризуется и такой параметр, как длина шишек. У *L*-формы значение коэффициента корреляции составляет $0,56 \pm 0,12$, а у *D*-изомеров – $0,63 \pm 0,11$ ($t_{05} = 2,0$). Для обеих диссимметрических форм выражена связь количества образуемых семян с массой самих шишек. При этом у *D*-изомеров значение показателя сопряженной вариации указывает на высокую тесноту связи, а у противоположной формы – свидетельствует лишь об умеренной связи ($r = 0,48 \pm 0,14$).

Таким образом, масса шишек и количество двусеменных чешуй у *D*-форм в большей степени взаимоувязаны с числом образующихся семян. У левых изомеров эта зависимость существенно ниже (по количеству двусеменных чешуй она незначима).

Количество и масса семян связаны между собой. В образцах с наличием правосторонней генетической спирали коэффициент корреляции больше ($r = 0,87 \pm 0,04$), чем у *L*-форм ($r = 0,73 \pm 0,08$). Масса семян достоверно связана с длиной шишек, причем более тесно – у *L*-форм (табл. 3).

Таблица 3

Взаимосвязь между массой семян и биометрическими параметрами шишек диссимметрических форм

Показатель	Коэффициент корреляции признаков в разрезе морфологических форм по типу диссимметрии	
	Левая (<i>L</i>)	Правая (<i>D</i>)
Длина шишек	$0,73 \pm 0,08^*$	$0,65 \pm 0,10^*$
Диаметр в максимально широком месте	$0,01 \pm 0,18$	$0,47 \pm 0,14^*$
Масса шишек	$0,81 \pm 0,06^*$	$0,91 \pm 0,03^*$
Количество чешуй:		
односеменных	$-0,04 \pm 0,18$	$-0,05 \pm 0,18$
двусеменных	$0,14 \pm 0,18$	$0,70 \pm 0,09^*$
Процент чешуй:		
односеменных	$-0,14 \pm 0,18$	$-0,42 \pm 0,15$
двусеменных	$0,14 \pm 0,18$	$0,42 \pm 0,15$

*Коэффициент корреляции достоверен на 5 %-м уровне значимости $t_{05} = 2,0$.

У *D*-изомеров масса семян достоверно коррелирует с диаметром шишки, у *L*-форм связь между этими параметрами отсутствует.

Вполне ожидаемо, что более сильна взаимосвязь между массой шишек и массой семян, содержащихся в них (в отличие от количества). Тем не менее в обоих случаях большая величина показателя связи отмечается у *L*-изомерических форм.

Аналогично числу семян количество чешуй с одним семенем также не зависит от массы семян. Между тем количество чешуй с двумя семенами проявляет сопряженную вариацию с последним признаком. Так, у шишек, обладающих правосторонней изомерией, масса семян (аналогично их количественному содержанию) взаимоувязана с количеством чешуй, содержащих два семени. Коэффициент корреляции равен $0,70 \pm 0,09$, что указывает на значительную

тесноту связи. Не обнаружено достоверной связи процентного содержания (равно как и абсолютного содержания) семенных чешуй с массой образующихся семян у шишек с *L*-изомерией.

У *D*-форм наблюдаются достоверные взаимосвязи массы образующихся в шишках семян с длиной, диаметром и массой шишек, а также количеством двусеменных чешуй. У *L*-изомеров этот показатель зависит только от длины и массы шишек, с другими параметрами достоверной корреляции не выявлено.

Необходимо иметь в виду, что плеяды сопряжения разных пар биометрических параметров могут быть различны в зависимости от географического района расположения популяций [9]. В этом аспекте важна региональная апробация поиска коррелятивных признаков для их использования в практической селекции.

Заключение

Правизна-левизна диссимметрии шишек связана с череззернистостью. Характерная для *D*-форм особенность образования одного семени связана с габитуальными параметрами шишек. Количество односемянных чешуй у шишек предопределяет их вариабельность по количеству и массе семян. Масса образующихся в шишках с *L*-изомерией семян в большей степени обусловлена их качеством (массой 1000 шт.), чем флуктуацией параметров шишек (за исключением их длины). Такая закономерность может быть использована для селекции по признакам структуры урожая. При создании орехоносных насаждений следует выбраковывать растения с череззерницей. Для этого требуется исследовать шишки с *D*-изомерией, как наиболее подверженные этому генетическому дефекту. Для отбора особей, продуцирующих крупные шишки (по их длине), необходимо анализировать образцы с левосторонней формой изомерии, поскольку содержание семян в шишках *D*-изомеров ниже по причине череззерницы и не обусловлено длиной шишек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андропова М.М., Корчагов С.А. Рост и развитие сосны кедровой сибирской в Вологодской области // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2015. Т. 19, № 6. С. 45–49.
2. Бабич Н.А., Хамитов Р.С., Хамитова С.М. Селекция и семенная репродукция кедра сибирского. Вологда–Молочное: ВГМХА, 2014. 154 с.
3. Брынцев В.А. Методика определения филлотаксиса (на примере шишек ели европейской): учеб.-метод. пособие. М.: УМЦ, 2004. 35 с.
4. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Генетика, селекция, семеноводство кедра сибирского. Красноярск: СибГТУ, 2000. 243 с.
5. Романовский М.Г. Групповая изменчивость количественных признаков. Доклады на заседаниях совместного семинара МГУ леса и Института лесоведения РАН. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 136 с.
6. Савельев С.С. Репродуктивный потенциал клонов плантации сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) на юге Красноярского края: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2011. 20 с.
7. Титов Е.В. Кедр: царь сибирской тайги. М.: Колос, 2007. 175 с.
8. Титов Е.В. Разнокачественность родителей и рост внутривидовых гибридов кедра сибирского // Лесотехн. журн. 2016. № 1. С. 62–72. DOI: 10.12737/18728
9. Тихонова И.В., Шемберг М.А. Сопряженная изменчивость морфологических признаков сосны обыкновенной на юге Средней Сибири // Лесоведение. 2004. № 1. С. 48–55.
10. Хохрин А.В. Методика отбора правых и левых форм у сосны обыкновенной и других пород // Леса Урала и хозяйство в них. Вып. 5. Свердловск: Урал. лесн. опыт. станция ВНИИЛМ, 1970. С. 110–114.

11. 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.

12. Чернов Н.Н. Биотектоника – методологическая основа изучения форм в живой природе. Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. 137 с.

13. Юрасов П.Б., Лобанов А.И. Диссимметрия шишек хвойных и способ ее определения у лиственницы сибирской // Лесохозяйств. информ. 2001. № 3. С. 19–23.

14. Danell O. Survey of Past, Current and Future Swedish Forest Tree Breeding // Silva Fennica. 1991. Vol. 25, no. 4. Pp. 241–247. DOI: 10.14214/sf.a15621

15. 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.

16. 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. DOI: 10.5897/AJB08.776

Поступила 10.01.19

UDC 630*181

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.66

Correlation between Dissymmetry of Siberian Pine Cones and Formation of Seeds in Them

*R.S. Khamitov*¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [Z-1461-2018](#),
ORCID: [0000-0003-1490-3553](#)

*S.A. Korchagov*¹, Doctor of Agriculture, Prof.

*M.D. Merzlenko*², Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist

*V.F. Kovyazin*³, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [Y-5917-2018](#),

ORCID: [0000-0002-3118-8515](#)

*E.N. Kuznetsov*⁴, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.

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, kors45@yandex.ru

²Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, p/o Uspenskoe, Moscow region, 143030, Russian Federation; e-mail: md.merzlenko@mail.ru

³Saint-Petersburg Mining University, Vasilyevsky Ostrov, 21-ya liniya, 2, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation; e-mail: vfkedr@mail.ru

⁴St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: evg_kuznetsov@mail.ru

Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) is a species actively introduced into the taiga zone forests of the East European plain. It is recognized that the improvement of the economically valuable properties and preservation of intraspecific diversity of Siberian pine should be carried out by selection methods. At the same time, seeds of the greatest breeding value have nutritional value. In this regard, it is important to analyse the indirect morphological features related to seed productivity. The studies were carried out in order to reveal the correlation between dissymmetry of Siberian pine cones and their morphometric parameters, and formation of fine-grained seeds. Samples of cones selected in the introduction Zhernokovskaya Siberian pine grove (in 25 km to the East of the town of Gryazovets, Vologda region) were studied. It was found out that left/right dissymmetry of cones is connected with fine-grained seeds. D-isomers (right dissymmetry) of cones are characterized by the formation of a significant amount of single-seeded scales. Their content predetermines a significant fluctuation in amount and weight of seeds. The mass of seeds in the cones for L-isomers (left dissymmetry) is largely determined by the quality of the seeds themselves (mass of 1000 pcs.), than by the variation of cone sizes. The exception is the length of the cones. In the creation of nut-bearing plantations trees with fine-grained seeds have to be

culled. In order to identify trees producing cones with such seeds, it is necessary to examine samples of cones with D-isomerism. Due to the fact that for L-isomers the correlation between size of cones and number of seeds is stronger, it is necessary to use cones with L-isomerism in order to select trees with large-scale cones (based on the cone length).

For citation: Khamitov R.S., Korchagov S.A., Merzlenko M.D., Kovyazin V.F., Kuznetsov E.N. Correlation between Dissymmetry of Siberian Pine Cones and Formation of Seeds in Them. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 66–73. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.66

Keywords: Siberian pine, forest tree breeding, cones, dissymmetry, fine-grained seeds.

REFERENCES

1. Andronova M.M., Korchagov S.A. The Growth and Development of Siberian Stone Pine in the Vologda Region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2015, vol. 19, no. 6, pp. 45–49.
2. Babich N.A., Khamitov R.S., Khamitova S.M. *Selection and Seed Reproduction of Siberian Pine*. Vologda–Molochnoe, Vologda SDFP Publ., 2014. 154 p.
3. Bryntsev V.A. *Procedure of Determination of Phyllotaxis (On the Example of European Spruce Cones): Study Guide*. Moscow, UMTs Publ., 2004. 35 p.
4. Matveeva R.N., Butorova O.F. *Genetics, Selection, Seed Growing of Siberian Pine*. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2000. 243 p.
5. Romanovskiy M.G. *Group Variability of Quantitative Characters. Reports at Meetings of the Joint Seminar of MSFU and the Institute of Forest Science of RAS*. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 128 p.
6. Savel'ev S.S. *Breeding Potential of Siberian Pine (Pinus Sibirica Du Tour) Plantation Clones in the South of Krasnoyarsk Krai*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 2011. 20 p.
7. Titov E.V. *Cedar: The Tsar of the Siberian Taiga*. Moscow, Kolos Publ., 2007. 152 p.
8. Titov E.V. The Heterogeneity of Parents and the Growth of Intraspecific Hybrids of Siberian Cedar. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2016, no. 1, pp. 62–72. DOI: 10.12737/18728
9. Tikhonova I.V., Shemberg M.A. Interrelated Variability of Morphological Characteristics in Scots Pine in the South of Central Siberia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2004, no. 1, pp. 48–55.
10. Khokhrin A.V. Methods of Selection of Right and Left Forms of Scots Pine and Other Species. *Forests of the Ural and Their Forest Management. Iss. 5*. Sverdlovsk, Ural'skaya lesnaya opyt'naya stantsiya VNIILM Publ., 1970, pp. 110–114.
11. Khramova O.Yu. *Reproductive Ability and Prospects of Economic Use of Siberian Pine (Pinus Sibirica Du Tour) during Introduction in Povolzhye (Case Study of Nizhny Novgorod Region)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Moscow, 2009. 164 p.
12. Chernov N.N. *Biotectionics – A Methodological Basis for Studying the Forms in Nature*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2013. 137 p.
13. Yurasov P.B., Lobanov A.I. Dissymmetry of Coniferous Cones and the Method of Its Determination in Siberian Larch. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2001, no. 3, pp. 19–23.
14. Danell O. Survey of Past, Current and Future Swedish Forest Tree Breeding. *Silva Fennica*, 1991, vol. 25, no. 4, pp. 241–247. DOI: 10.14214/sf.a15621
15. 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.
16. 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. DOI: 10.5897/AJB08.776

Received on January 10, 2019

УДК: 630*161(581.4)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.74

МОРФОБИОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *LILIUM* (LILIACEAE) В СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

О.О. Вронская¹, канд. биол. наук; ORCID: 0000-0001-8718-9448

Л.Л. Седельникова², д-р биол. наук; ORCID: 0000-0002-1122-2421

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, просп. Ленинградский, д. 10, г. Кемерово, Россия, 650065; e-mail: oksana_vronski@mail.ru

²Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, ул. Золотодолинская, д. 101, г. Новосибирск, Россия, 630090; e-mail: lusedelnikova@yandex.ru

В связи с антропогенной нагрузкой возникает угроза сокращения ареала сибирских и дальневосточных видов лилий. Одним из приемов сохранения отечественного природного генофонда *Lilium* служит их возделывание *ex situ*. Цель работы заключалась в анализе биоморфологических особенностей представителей рода *Lilium* L. в условиях северной лесостепи Западной Сибири. Получены результаты оценки морфобиологических особенностей следующих видов: *L. pilosiusculum*, *L. regale*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum*, *L. callosum*. Определены сроки цветения и суммы положительных (выше 0 °С), эффективных (выше 5 °С), активных (выше 10 °С) температур, которые необходимы для наступления таких фенофаз развития, как отрастание, бутонизация, цветение, плодоношение. Начало отрастания *L. pilosiusculum*, *L. regale*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum*, *L. callosum* наступало в первой-второй декадах мая, их цветение – в разные сроки: с третьей декады июня по третью декаду июля – у *L. pumilum*, в июне – у *L. pensylvanicum*, со второй декады июля по вторую декаду августа – у *L. callosum*, с третьей декады июля по первую декаду августа – у *L. pilosiusculum*, с третьей декады июля по вторую декаду августа – у *L. regale*. Критерием начала цветения видов служит сумма активных температур, характерных для данного региона. Отмечена разная способность видов к плодоношению в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода. Результаты показали, что у вида местной флоры *L. pilosiusculum* максимальный размер высоты побега достигал более 100 см, виды *L. callosum*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum* и *L. regale* имели низкорослые побеги (менее 60 см). Максимальным числом цветков в соцветии и показателями цветочной продуктивности характеризовались *L. pilosiusculum* и *L. regale*. Впервые выявлена индикаторная роль в листьях основных пигментов фотосинтетического аппарата (хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов) в течение сезонного развития. Установлено, что наиболее значимые показатели физиологического состояния растений – содержание в листьях хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов. Их количество в листьях зависело от фенологических фаз развития. В период бутонизации содержание каротиноидов возрастало, концентрация хлорофилла *a* была больше концентрации хлорофилла *b* на всех фазах вегетации, отношение хлорофилла *a/b* находилось в пределах нормы и колебалось от 2,189 до 3,225 мг/г сырой массы, значение *a+b*/каротиноиды у видов уменьшалось к периоду плодоношения. Установленные изменения в составе пигментного комплекса можно рассматривать в качестве индикаторов механизма адаптации видов к условиям внешней среды. Полученные в ходе исследования результаты необходимы для рационального использования лилий в реинтродукционной работе, развитие которой особенно актуально для Сибири.

Для цитирования: Вронская О.О., Седельникова Л.Л. Морфобиологический анализ представителей рода *Lilium* (Liliaceae) в северной лесостепи Западной Сибири // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 74–83. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.74

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственных заданий:

1. Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН АААА-А17-117041410053-1 (проект № 0352-2016-0002) «Оценка состояния и охрана флористического разнообразия под влиянием антропогенных и техногенных факторов *in situ* и *ex situ*». На базе УНУ Интродукционный фонд КузБС № USU 508670.
2. Центрального сибирского ботанического сада СО РАН по проекту № АААА-А17-1170126100053-9 «Выявление путей адаптации растений к контрастным условиям обитания на популяционном и организменном уровнях».

Ключевые слова: лилии, адаптационная способность, морфобиологические особенности, хлорофиллы *a* и *b*, каротиноиды, Западная Сибирь.

Введение

Виды рода *Lilium* L. широко исследуют во многих регионах России и за рубежом [1, 3, 4, 10–12, 14, 16]. Они обитают в горных лесах Западной (Красноярский край), Средней (Иркутская область) и Восточной (Республика Бурятия) Сибири, в южных и юго-восточных районах Забайкальского края, на Дальнем Востоке, лишь единичные виды встречаются в степных сообществах. Активное освоение новых площадей и загрязнение окружающей среды постепенно приводят к тому, что некогда богатые и устойчивые природные комплексы разрушаются, сокращаются и полностью уничтожаются генетические ресурсы отдельных популяций лилий [5]. В настоящее время возникла угроза сокращения ареала сибирских и дальневосточных видов лилий, поэтому важным является охрана и сохранение их естественных местообитаний. *L. pilosiusculum* (Freyn) Mischz. (Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Горный Алтай) находится в критических условиях. Одним из приемов сохранения отечественного природного генофонда *Lilium* служит их возделывание в ботанических садах [1]. В связи с этим актуальна оценка морфобиологических возможностей интродуцентов, которая позволяет определить сезонный ритм развития и оценить зимостойкость, засухоустойчивость, декоративность, особенности размножения в конкретных условиях их возделывания. Адаптационная способность проявляется на морфологическом и функциональном уровнях, где большую роль играют показатели фотосинтетического аппарата, а именно содержание в листьях хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов [9, 13, 15, 17]. Однако сведений по этому вопросу недостаточно, что стало основанием для выполнения данного исследования.

Цель исследования – анализ биоморфологических особенностей представителей рода *Lilium* L. в условиях северной лесостепи Западной Сибири.

Объекты и методы исследования

Работа проведена в 2012–2014 гг. на территории Кузбасского ботанического сада (г. Кемерово), расположенного в северной части лесостепной зоны Западной Сибири. Климат района исследований – резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха – 0,9 °С. Наиболее высокая температура воздуха – летом (35...38 °С), наиболее низкая – зимой (–57 °С). Первые весенние заморозки бывают с 28 мая по 11 июня, первые осенние – с 26 августа по 14 сентября. Среднегодовое количество осадков – 450...500 мм. Высота снежного покрова – от 47 до 72 см.

Виды – объекты исследования:

местный:

L. pilosiusculum (Freyn) Misch. – светлохвойный лесной северо-азиатский вид, произрастающий в Западной и Восточной Сибири, Северной Монголии;

инорайонные:

L. pumilum Delile – восточно-азиатский, горно-лесной и степной вид Сибири, Дальнего Востока, Монголии, Китая, Кореи;

L. pensylvanicum Ker-Gawl – лесной вид юга Восточной Сибири и Дальнего Востока;

L. callosum Siebold et Zucc. – луговой вид, произрастающий в Хабаровском и Приморском краях;

L. regale Wils. – узколокальный эндемик Китая, произрастающий только в долине р. Миньцзян, на западе провинции Сычуань [5, 6].

Декоративность оценивали по Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [7]. Фенологические наблюдения проводили согласно Методике фенологических наблюдений в ботанических садах [8]. Сумму положительных (выше 0 °С), эффективных (выше 5 °С) и активных (выше 10 °С) температур определяли с использованием методических подходов [2], количество хлорофилла *a*, *b* и сумму каротиноидов – спектрофотометрическим методом [9, 17] на приборе СПЕКС ССП-705. Статистическую обработку данных проводили, используя пакет прикладных программ Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007, с учетом следующих параметров: *M* (среднее арифметическое значение), $\pm m$ (ошибка среднего значения), *V* (коэффициент вариации).

Результаты исследования и их обсуждение

При изучении феноритмов роста и развития выяснили, что наиболее раннее весеннее отрастание у лилий наблюдалось в 2013 г. Установлено, что в первой декаде мая *L. pilosiusculum*, *L. pensylvanicum*, *L. callosum* отрастали при сумме положительных температур 100...162 °С, эффективных – 95...129 °С, активных – 47...87 °С. Во второй декаде мая *L. pumilum*, *L. regale* отрастали при сумме положительных температур 130...199 °С, эффективных – 152...187 °С, активных – 73...119 °С. Формирование первых бутонов отмечено через 21...49 дн. от начала отрастания. Однако эта фаза развития сначала наступала у *L. pensylvanicum* и *L. regale* в конце третьей декады мая – начале первой декады июня при сумме эффективных температур 157...302 °С, активных – 82–198 °С. У *L. pilosiusculum*, *L. pumilum* развитие этой фазы определено во второй декаде июня при сумме эффективных температур 309...495 °С, активных – 151...300 °С. В конце третьей декады июня наблюдалось начало бутонизации *L. callosum* при сумме эффективных температур 400...600 °С, активных – 376...467 °С. Начало цветения у видов наступало через 15...30 дн. от начала бутонизации. У *L. pilosiusculum*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum* цветение первых цветков происходило в конце третьей декады июня – начале первой декады июля при сумме активных температур 359...495 °С. Во второй декаде июля отмечено начало цветения у *L. regale* при сумме активных температур 583...610 °С. Вид *L. callosum* зацветает только в третьей декаде июля при сумме активных температур 562...674 °С. Продолжительность цветения одного цветка у *L. callosum*, *L. pilosiusculum* и *L. pumilum* составляла 3...5 дн., у *L. pensylvanicum* – 4...6 дн.,

у *L. regale* – 7...9 дн. Таким образом, продолжительность цветения зависит от гидротермических условий: в теплые и сухие периоды (2012 г.) – короткая, во влажные (2013–2014 гг.) – продолжительная, 7...24 дн. (табл. 1).

Таблица 1

Агроклиматические показатели вегетационных периодов за 2012–2014 гг.

Год	Сумма осадков, мм	Сумма температур выше 10 °С	ГТК*	Продолжительность вегетационного периода, дн.	Характеристика тепло- и влагообеспеченности
2012	103,9	1972	0,53	125	Жаркий, засушливый
2013	384,5	2178	1,76	140	Прохладный, избыточно увлажненный
2014	245,6	2145	1,14	138	Прохладный, увлажненный

*Гидротермический коэффициент.

Отмечена разная способность к плодоношению у лилий: у *L. pilosiusculum* плоды завязывались и вызревали во все годы наблюдений, у *L. pensylvanicum* – только в теплый и сухой период (2012 г.), у видов *L. regale*, *L. callosum* – во все годы наблюдений, но они не вызревали из-за невысоких температур и большого количества влаги в период плодоношения, у *L. pumilum* плоды не формировались во все годы исследования. Период вегетации у *L. pilosiusculum* составлял от 80 дн. и более, у *L. Pumilum* – короткий (60...65 дн.), у *L. callosum*, *L. regale*, *L. Pensylvanicum* – длинный (90...118 дн.).

Морфометрические параметры вегетативных органов показали, что вид местной флоры *L. pilosiusculum* высокорослый (более 100 см) по сравнению с *L. callosum*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum* и *L. regale*, которые имели низкорослые побеги (менее 60 см). Коэффициент вариации высоты побегов за 3 года составлял от 0,8 до 41,1 %. Этот показатель был наибольшим у *L. pumilum* ($V = 41,1$ %) и *L. pensylvanicum* ($V = 30,4$ %). Высота побегов вида *L. pilosiusculum* ($V = 1,1$ %) была стабильной (табл. 2).

Таблица 2

Высота генеративных побегов (см) у видов лилий за 2012–2014 гг. в условиях Кузбасского ботанического сада (г. Кемерово)

Вид	2012	2013	2014	$M \pm m$	$V, \%$
<i>L. callosum</i>	46,8	50,9	51,2	49,6±0,4	5,0
<i>L. pilosiusculum</i>	132,2	139,9	140,0	137,4±0,5	3,3
<i>L. pumilum</i>	32,1	59,2	50,0	47,1±0,2	29,3
<i>L. pensylvanicum</i>	33,0	50,4	50,2	44,5±0,2	22,4
<i>L. regale</i>	52,2	60,2	58,5	57,0±0,2	7,4

Максимальное число цветков в соцветии и показатель цветочной продуктивности определены у *L. pilosiusculum* и *L. regale*. Низкая цветочная продуктивность отмечена в теплый засушливый вегетационный период 2012 г.

У всех видов наблюдался невысокий уровень изменчивости ширины внутренних (0,9...4,5 см) и внешних (0,1...1,5 см) долей околоцветника. Выявлено, что у вида с трубчато-колокольчатой формой околоцветника (*L. regale*)

диаметр цветка в 2,5–3 раза больше, чем у видов с чалмовидным околоцветником (*L. callosum*, *L. pilosiusculum*, *L. pumilum*). При исследовании взаимозависимости признаков установлено, что все виды лилий имеют схожие корреляционные дендриты и расположение плеяд. Общее число достоверных корреляционных связей ($r \geq 0,601$) варьирует от 30 до 50. Высокий уровень сопряженности параметров наблюдался в 2013 г. Прослеживались тесные взаимосвязи между изучаемыми признаками: диаметр цветка лилий зависит от ширины внутренних и наружных долей околоцветника. Продолжительность цветения лилий тесно связана с количеством цветков в соцветии и не зависит от высоты растений и диаметра цветка. По комплексу декоративных признаков [7] установлено, что она составила 70–94 балла (табл. 3).

Таблица 3

Оценка декоративных признаков видов лилий по 5/100-балльной шкале за 2012–2014 гг.

Признак	K	1	2	3	4	5
Окраска цветка и ее устойчивость	3	4/12	5/15	4/12	5/15	5/15
Размер цветка	2	4/8	5/10	5/10	5/10	5/10
Форма цветка	2	5/10	5/10	5/10	5/10	5/10
Аромат	2	4/4	4/8	4/8	4/8	4/8
Цветонос (длина и прочность)	1	4/4	5/5	4/4	5/5	5/5
Соцветие (размер, форма, количество цветков)	2	4/8	5/10	4/8	4/8	5/10
Обилие цветения	2	4/8	4/8	4/8	3/6	4/8
Одновременность цветения (количество одновременно раскрывшихся цветков)	1	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
Габитус растения	1	4/4	5/5	4/4	4/4	4/4
Оригинальность	3	4/12	5/15	4/12	4/12	5/15
Состояние растений	1	4/4	4/4	4/4	5/5	5/5
Общая оценка сорта по 100-балльной шкале		88	94	83	87	94

Примечание. K – коэффициент значимости; 1 – *L. callosum*; 2 – *L. pilosiusculum*; 3 – *L. pumilum*; 4 – *L. pensylvanicum*; 5 – *L. regale*.

Наибольшее количество баллов (90–94) имели виды: *L. pilosiusculum*, *L. regale*. Наблюдения показали, что все виды не вымерзают и устойчивы к таким болезням, как *Botrytis elliptica* (Berk.) Cooke, *Fusarium oxysporum* Schltdl., Fl. Berol, которые встречаются в северной части лесостепной зоны Западной Сибири.

Значимым показателем физиологического состояния растений является содержание в листьях хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов [9]. При сравнении содержания пигментов фотосинтетического аппарата у видов инорайонного происхождения и местного вида *L. pilosiusculum*, который хорошо адаптирован к условиям северной лесостепи (г. Кемерово), установлено, что у него содержание хлорофилла *a* отличается стабильностью относительно динамики как в пределах одного вегетационного периода, так и по годам. Максимум накопления в листьях хлорофилла *a* был отмечен в период завязывания плодов у местного вида *L. pilosiusculum* ($V = 0,01\%$), а также у *L. callosum* (0,70 %).

У *L. pumilum* максимальное количество хлорофилла *a* наблюдалось в период цветения ($V = 0,15$ %) и плодоношения (0,07 %). Количество хлорофилла *a* в период вегетации лилий в 2,5–3 раза было больше, чем хлорофилла *b* на всех фенофазах развития, такая тенденция отмечалась у большинства растений [9]. Одним из информативных показателей, характеризующих потенциальную фитохимическую активность листьев, является отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* (a/b). Наблюдалось стабильное изменение отношения a/b у *L. pilosiusculum* (табл. 4).

Таблица 4

Среднее содержание пигментов (мг/г сырой массы) фотосинтетического аппарата на разных стадиях вегетации в листьях видов и сортов лилий

Вид	Фенологическая фаза	<i>a</i>	<i>b</i>	Каротиноиды	<i>a + b</i>	<i>a/b</i>	<i>a+b</i>
							каротиноиды
<i>L. callosum</i>	Бутонизация	0,758	0,255	0,284	1,013	2,964	3,554
	Цветение	1,135	0,399	0,294	1,534	2,844	5,210
	Плодоношение	1,125	0,310	0,321	1,435	3,867	4,462
<i>L. pilosiusculum</i>	Бутонизация	1,047	0,489	0,297	1,536	2,113	5,158
	Цветение	0,923	0,547	0,378	1,470	1,931	4,120
	Плодоношение	1,563	0,538	0,430	2,102	2,913	4,899
<i>L. pumilum</i>	Бутонизация	0,908	0,456	0,277	1,364	2,018	4,930
	Цветение	1,170	0,519	0,325	1,689	2,261	5,197
	Плодоношение	1,150	0,508	0,340	1,658	2,288	4,933
<i>L. pensylvanicum</i>	Бутонизация	0,787	0,316	0,280	1,103	2,470	3,950
	Цветение	0,691	0,291	0,243	0,982	2,406	4,036
	Плодоношение	0,596	0,266	0,283	0,863	2,235	3,227
<i>L. regale</i>	Бутонизация	0,767	0,284	0,289	1,051	2,701	3,629
	Цветение	0,797	0,290	0,257	1,086	2,778	4,246
	Плодоношение	0,910	0,328	0,289	1,238	2,806	4,227

У этого вида в течение 3 лет оно повышалось от периода бутонизации до периода плодоношения ($V = 0,32...10,55$ %). Тогда как у *L. pumilum* и *L. regale* отношение a/b не превышало нормы (*L. pumilum* – 0,24...1,63 %; *L. regale* – 0,24...1,63 %). Высокие показатели содержания хлорофилла a/b отмечались у *L. callosum* в период цветения и плодоношения ($V = 6,56...11,59$ %), у *L. pensylvanicum* – в период бутонизации в 2012 г. (15,30 %). В период бутонизации содержание каротиноидов возрастало, концентрация хлорофилла *a* была больше концентрации хлорофилла *b* на всех фазах развития растений, отношение a/b находилось в пределах нормы и колебалось от 2,189 до 3,225 мг/г сырой массы. Однако к периоду плодоношения у всех видов прослеживалась тенденция к уменьшению соотношения $a+b$ /каротиноиды, что свидетельствует о снижении светособирающей функции пигментного комплекса в конце вегетации растений (сентябрь). Возможно, это происходило в связи с уменьшением длины светового дня и увеличением перепадов среднесуточных температур в пределах 10...15 °С. В среднем получены высокие значения $a+b$ /каротиноиды, что свидетельствует о хороших механизмах адаптации изученных видов к сезонным условиям 2012–2014 гг.

Заключение

Впервые изучены морфобиологические особенности *L. callosum*, *L. pilosiusculum*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum*, *L. regale*, определены сроки цветения и соответствующие им суммы положительных температур выше 0,5

и 10 °С, необходимые для наступления конкретных фенофаз развития лилий, выявлена индикаторная роль основных пигментов фотосинтетического аппарата (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) в листьях интродуцированных видов в период роста и развития.

Установлено, что в условиях северной лесостепи Западной Сибири период вегетации у *Lilium pilosiusculum*, *L. regale*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum*, *L. callosum* (от отрастания до плодоношения) отличается по продолжительности: у *L. pumilum* – коротковегетирующий (60...65 дн.), у *L. pilosiusculum* – средневегетирующий (80...89 дн.), у *L. callosum*, *L. regale*, *L. pensylvanicum* – длительновегетирующий (90...118 дн.). Массовое цветение приходится на июль–август. Все изученные многолетние поликарпики, зимующие в грунте, имели высокие декоративные качества (70–94 бал.). Фитохимическое содержание в листьях хлорофилла *a*, *b*, каротиноидов и их соотношение в течение сезонного развития служат критериями успешной адаптации видов, которых необходимо сохранять и размножать *ex situ* как доноров при использовании в реинтродукции, селекции и озеленении регионов Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вронская О.О. Морфологические особенности рода *Lilium* L. при интродукции в Кузбасском ботаническом саду // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23469> (дата обращения: 07.02.2019).
2. Гулинова Н.В. Методы агроклиматической обработки наблюдений: учеб. пособие. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 151 с.
3. Завадская Л.В. Селекция лилий в ЦБС НАН Беларуси // Современные направления деятельности ботанических садов и держателей ботанических коллекций по сохранению биоразнообразия растительного мира: материалы Междунар. конф., посвященной 100-летию со дня рождения акад. Н.В. Смольского, Минск, 27–29 сент. 2005 г. Минск: Эдит ВВ, 2005. С. 241–244.
4. Кикоть Л. История создания и современное состояние коллекции лилии отдела цветочно-декоративных растений НБС НАН Украины // Современные направления деятельности ботанических садов и держателей ботанических коллекций по сохранению биоразнообразия растительного мира: материалы Междунар. конф., посвященной 100-летию со дня рождения акад. Н.В. Смольского, Минск, 27–29 сент. 2005 г. Минск: Эдит ВВ, 2005. С. 99–100.
5. Красная книга Кемеровской области. Т. 1. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений и грибов. Кемерово: Азия принт, 2012. 206 с.
6. Малышев Л.И., Доронькин В.М., Зуев В.В. и др. Конспект флоры Азиатской России: Сосудистые растения / под ред. К.С. Байкова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 640 с.
7. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур: Декоративные культуры. М.: Колос, 1968. Вып. 6. 223 с.
8. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М.: Наука, 1975. 27 с.
9. Шлык А.А. Биосинтез хлорофиллового аппарата // Современные проблемы фотосинтеза: [Материалы сессии. 17–18 нояб. 1971 г.]. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 85–108.
10. Baker J.G. A New Synopsis of All the Known Lilies // The Gardener's Chronicle and Agricultural Gazette. 1871. Pp. 104.
11. Byung Lim K., Younis A., Taek Park J., Jung Hwang Y. Exploitation of Diversity for Morphological Traits in *Lilium tsingtauense* under Different Habitats // Notulae Scientia Biologicae. 2014. Vol. 6, no. 2. Pp. 178–184. DOI: 10.15835/nsb629347

12. Güven S., Okur S., Demirel M., Coskuncelebi K., Makbul S., Beyazoğlu O. Pollen Morphology and Anatomical Features of *Lilium* (Liliaceae) Taxa from Turkey // *Biologia*. 2014. Vol. 69, iss. 9. Pp. 1122–1133. DOI: 10.2478/s11756-014-0416-2

13. Inamoto K., Nagasuga K., Yano T., Yamazaki H. Influence of Light Intensity on the Rate of Photosynthesis and Dry Matter Accumulation in Oriental Hybrid Lily ‘Siberia’ at Different Developmental Stages // *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2015. Vol. 90, iss. 3. Pp. 259–266. DOI: 10.1080/14620316.2015.11513180

14. Jeong J.H., Kim K.S. Morphological Characteristics of Korean Native Lilies // *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*. 1991. Vol. 32, iss. 3. Pp. 411–418.

15. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophyll *a* and *b* Leaf Extracts in Different Solvents // *Biochemical Society Transactions*. 1983. Vol. 11, iss. 5. Pp. 591–592. DOI: 10.1042/bst0110591

16. Lim K.-B., Van Tuyl J.M. Lily // *Flower Breeding and Genetics* / ed. by N.O. Anderson. Netherlands: Springer, 2006. Pp. 517–537. DOI: 10.1007/978-1-4020-4428-1

17. Zhang Y.J., Yan F., Gao H., Xu Y.Z., Guo Y.Y., Wang E.J., Li Y.H., Xie Z.K. Chlorophyll Content, Leaf Gas Exchange and Growth of Oriental Lily as Affected by Shading // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2015. Vol. 62, iss. 3. Pp. 334–339. DOI: 10.1134/S1021443715030206

Поступила 06.02.19

UDC 630*161(581.4)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.74

Morphological Analysis of the Genus *Lilium* (Liliaceae) in the Northern Forest Steppe of Western Siberia

*O.O. Vronskaya*¹, Candidate of Biology; ORCID: 0000-0001-8718-9448

*L.L. Sedelnikova*², Doctor of Biology; ORCID: 0000-0002-1122-2421

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, SB RAS, prosp. Leningradskiy, 10, Kemerovo, 650065, Russian Federation; e-mail: oksana_vronski@mail.ru

²Central Siberian Botanical garden, SB RAS, ul. Zolotodolinskaya, 101, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: lusedelnikova@yandex.ru

Due to anthropogenic load there is a risk of area reduction of Siberian and Far Eastern species of lilies. One of the methods for preserving the native natural gene pool of *Lilium* is their cultivation *ex situ*. The research purpose involved analysis of the biomorphological features of the representatives of the genus *Lilium* L. in the conditions of the northern forest steppe of Western Siberia. The results of morphobiological features evaluation were obtained for the following species: *L. pilosiusculum*, *L. regale*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum*, *L. callosum*. Time of flowering and sum of positive temperatures (above 0 °C), effective temperatures (above +5 °C) and active temperatures (above +10 °C) were determined. They are necessary for the onset of developmental phenophases such as regrowth, budding, flowering and fruiting. The beginning of regrowth of *L. pilosiusculum*, *L. regale*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum* and *L. callosum* occurred in the first or second decades of May. Flowering started at different times: from the third decade of June to the third decade of July – *L. pumilum*; in June – *L. pensylvanicum*; from the second decade of July to the second decade of August – *L. callosum*; from the third decade of July to the first decade of August – *L. pilosiusculum*; from the third decade of July to the second decade of August – *L. regale*. The criterion for the onset of species flowering is the sum of active temperatures typical for the region. There is a different ability of the species to fruiting, depending on hydrothermal conditions of the vegetation period. The results showed that the local flora species *L. pilosiusculum* had the maximum height of shoot reached more than 100 cm; while *L. callosum*, *L. pumilum*, *L. pensylvanicum* and *L. regale* had stunted shoots (less than 60 cm). *L. pilosiusculum* and *L. regale* had the maximum number of flowers in inflorescence and indicators

of flower productivity. The indicator role of the main pigments of the photosynthetic apparatus (chlorophylls *a* and *b*, carotenoids) in the leaves during seasonal development was established for the first time. It was found that the most significant indicators of the physiological state of plants were the content of chlorophyll *a* and *b*, and carotenoids in the leaves. Their amount depended on the phenological phases of development. During budding, the carotenoid content increased, the concentration of chlorophyll *a* was greater than the concentration of chlorophyll *b* at all vegetation phases, the ratio between chlorophyll *a* and *b* was within the normal limits and ranged from 2.189 to 3.225 mg/g of raw weight, the value of $a+b$ /carotenoids in species decreased by the time of fruiting. The determined changes in the pigment complex composition can be considered as indicators of the adaptation mechanism of species to environmental conditions. The obtained results are necessary for the rational use of lilies in the reintroduction work, the development of which is especially important in Siberia.

For citation: Vronskaya O.O., Sedelnikova L.L. Morphological Analysis of the Genus *Lilium* (Liliaceae) in the Northern Forest Steppe of Western Siberia. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 74–83. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.74

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignments of:

1. The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, SB RAS, AAAA-A17-117041410053-1 (project no. 0352-2016-0002) “Status Assessment and Protection of Floristic Diversity under the Influence of Anthropogenic and Technogenic Factors *in situ* and *ex situ*” based on the Unique Scientific System “Introduction Fund of KuzBS” USU 508670.
2. The Central Siberian Botanical garden, SB RAS, project no. AAAA-A17-1170126100053-9 “Revealing the Ways of Plants’ Adaptation to Contrastive Habitat Conditions at the Population and Organismic Levels”.

Keywords: lilies, adaptive capacity, morphobiological features, chlorophylls *a* and *b*, carotenoids, Western Siberia.

REFERENCES

1. Vronskaya O.O. Morphological Features of the Genus *Lilium* L. at Introduction in the Kuzbass Botanical Garden. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23469> (Accessed 07.02.19).
2. Gulina N.V. *Methods of Agroclimatic Processing of Observations*: Educational Textbook. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 151 p.
3. Zavadskaya L.V. Lilies Selection in the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. *Current Trends in the Activity of Botanical Gardens and Holders of Botanical Collections for the Conservation of Biodiversity of the World's Flora: Proceedings of the Int. Conf. Dedicated to the 100th Anniversary of Academician N.V. Smol'skiy, Minsk, September 27–29, 2005*. Minsk, Edit VV Publ., 2005, pp. 241–244.
4. Kikot' L. History and Current State of the Collection of Lilies of the Department of Flower and Ornamental Plants of the National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Current Trends in the Activity of Botanical Gardens and Holders of Botanical Collections for the Conservation of Biodiversity of the World's Flora: Proceedings of the Int. Conf. Dedicated to the 100th Anniversary of Academician N.V. Smol'skiy, Minsk, September 27–29, 2005*. Minsk, Edit VV Publ., 2005, pp. 99–100.
5. *The Red Book of Kemerovo Region*. Vol. 1. Rare and Endangered Species of Wild Plants and Fungi. Kemerovo, Aziya print Publ., 2012. 206 p.
6. Malyshev L.I., Doron'kin V.M., Zuev V.V. et al. *Compendium of the Flora of Asian Russia: Vascular Plants*. Ed. by K.S. Baykov. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012. 619 p.
7. *Procedure of State Strain Testing of Agricultural Crops: Ornamental Crops*. Moscow, Kolos Publ., 1968, iss. 6. 223 p.

8. *Procedure of Phenological Observations in the Botanical Gardens of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 27 p.
9. Shlyk A.A. Biosynthesis of the Chlorophyll Apparatus. *Current Issues of Photosynthesis: Proceedings of the Session*. November 17–18, 1971. Moscow, MSU Publ., 1973, pp. 85–108.
10. Baker J.G. A New Synopsis of All the Known Lilies. *The Gardener's Chronicle and Agricultural Gazette*, 1871, pp. 104.
11. Byung Lim K., Younis A., Taek Park J., Jung Hwang Y. Exploitation of Diversity for Morphological Traits in *Lilium tsingtauense* under Different Habitats. *Notulae Scientia Biologicae*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 178–184. DOI: 10.15835/nsb629347
12. Güven S., Okur S., Demirel M., Coskuncelebi K., Makbul S., Beyazoğlu O. Pollen Morphology and Anatomical Features of *Lilium* (Liliaceae) Taxa from Turkey. *Biologia*, 2014, vol. 69, iss. 9, pp. 1122–1133. DOI: 10.2478/s11756-014-0416-2
13. Inamoto K., Nagasuga K., Yano T., Yamazaki H. Influence of Light Intensity on the Rate of Photosynthesis and Dry Matter Accumulation in Oriental Hybrid Lily 'Siberia' at Different Developmental Stages. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2015, vol. 90, iss. 3, pp. 259–266. DOI: 10.1080/14620316.2015.11513180
14. Jeong J.H., Kim K.S. Morphological Characteristics of Korean Native Lilies. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 1991, vol. 32, iss. 3, pp. 411–418.
15. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophyll *a* and *b* Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, vol. 11, iss. 5, pp. 591–592. DOI: 10.1042/bst0110591
16. Lim K.-B., Van Tuyl J.M. Lily. *Flower Breeding and Genetics*. Ed. by N.O. Anderson. Netherlands, Springer, 2006, pp. 517–537. DOI: 10.1007/978-1-4020-4428-1
17. Zhang Y.J., Yan F., Gao H., Xu Y.Z., Guo Y.Y., Wang E.J., Li Y.H., Xie Z.K. Chlorophyll Content, Leaf Gas Exchange and Growth of Oriental Lily as Affected by Shading. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2015, vol. 62, iss. 3, pp. 334–339. DOI: 10.1134/S1021443715030206

Received on February 06, 2019

УДК 582.475.2:581.522.68

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.84

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА СЕЗОННЫЙ РОСТ ХВОЙНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

И.Т. Кищенко, д-р биол. наук, проф., чл.-кор. РАН; ORCID: 0000-0002-1039-1020

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185035; e-mail: ivanki@karelia.ru

Сезонный рост лесообразующих видов широко изучается отечественными и зарубежными учеными. Цель исследования – анализ особенностей роста вегетативных органов хвойных лесообразующих видов в таежной зоне. Объектами исследования служили деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). Сроки начала, кульминации и прекращения роста вегетативных органов определяются как биологией вида, так и погодными условиями. У деревьев *Larix sibirica* хвоя появляется в конце апреля, у *Pinus sylvestris* – в конце мая, у *Picea abies* – в начале июня. В середине мая начинается рост побегов у деревьев *Pinus sylvestris*, в конце мая – у *Picea abies* и *Larix sibirica*. В начале июня у сосны обыкновенной и в середине июня у ели европейской происходит рост древесины ствола. Максимальная интенсивность прироста: побегов у сосны обыкновенной и лиственницы сибирской приурочена к середине – концу июня, а у ели европейской – к середине июля; хвои у лиственницы – к концу мая, у сосны и ели – к середине – концу июля; стволов у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – к середине июня. Рост хвои у деревьев *Larix sibirica* заканчивается в середине июня, а у *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – в конце августа; побегов у *Larix sibirica* – в конце июня, у *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – в конце июля; стволов – в конце августа. У деревьев *Pinus sylvestris*, *Picea abies* и *Larix sibirica* продолжительность формирования побегов составляет соответственно 77, 57 и 48 сут, хвои – 98, 78 и 45 сут, стволов – 72 и 74 сут. Скорость роста побегов и хвои у деревьев изученных видов главным образом зависит от температуры воздуха в период усиленного их роста (июль). Наименее требовательным (для ростовых процессов) к температурному режиму воздуха видом является *Larix sibirica*, далее *Pinus sylvestris* и *Picea abies*.

Для цитирования: Кищенко И.Т. Влияние температуры воздуха на сезонный рост хвойных лесообразующих видов в таежной зоне (Республика Карелия) // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 84–93. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.84

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект 18-44-100002 p_a).

Ключевые слова: тайга, сосна обыкновенная, ель европейская, лиственница сибирская, побеги, хвоя, ствол, рост вегетативных органов, температура воздуха.

Введение

Сезонный рост лесообразующих видов широко изучается отечественными и зарубежными учеными [1–4, 8–11, 19, 23–25, 27, 28]. Теоретическая ценность таких исследований заключается в познании закономерностей ритмики ростовых процессов растений, влияния на интенсивность и продолжительность роста экологических факторов, в выяснении экстремальных и оптимальных значений факторов для конкретного вида. Сравнивая особенности роста аборигенных и интродуцированных видов, можно объективно оценить и

перспективность последних [1–4]. В лесоводстве фенологическая информация используется для определения сроков рубок ухода и внесения удобрений, при проведении противопожарных мероприятий, для эффективной организации борьбы с вредителями растений и болезнями. Многолетние исследования сезонного роста лесообразующих видов в Карелии ранее не проводились.

Целью данного исследования являлось изучение особенностей сезонной ритмики роста вегетативных органов сосны обыкновенной, ели европейской и лиственницы сибирской в таежной зоне.

Объекты и методы исследования

Рост вегетативных органов трех лесообразующих видов (сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.)), произрастающих в таежной зоне, изучали в течение трех вегетационных периодов. Средний возраст деревьев сосны – 60 лет, средняя высота – 15,9 м, средний диаметр стволов – 18 см; деревьев ели – соответственно 78 лет, 17,0 м и 22 см; лиственницы – 54 года, 16,5 м и 20 см). Тип леса – черничный.

По общепринятым методикам [17] закладывали пробные площади прямоугольной формы (0,25 га), на которых выбирали по 20 учетных деревьев (II–III классов роста и развития по Крафту).

Длину стеблей второго порядка ветвления (далее – побегов) измеряли в юго-западной части кроны на высоте около 2 м с момента набухания вегетативных почек до заложения зимующих почек через каждые 3 сут по методике А.А. Молчанова и В.В. Смирнова [13], длину хвои на тех же побегах – с момента ее появления до полного прекращения роста также через каждые 3 сут.

Изучение роста древесины стволов проводили по методике А.А. Молчанова и В.В. Смирнова [13]. Для этого отбирали образцы древесины через каждые 5 сут после активизации камбия ствола. Препараты древесины для исследования готовили при помощи микротомы GRANUM-202 [20]. Ширину растущего слоя древесины измеряли в 3 местах с точностью до ± 1 мкм, используя микроскоп МБМ с микрометром МОВ, ширину растущей древесины нового годовичного кольца – в радиальном направлении. Деревья лиственницы сибирской произрастают на территории Ботанического сада Петрозаводского государственного университета, потому не должны быть повреждены взятием высечек.

Всего за каждый вегетационный период было осуществлено по 20 сроков наблюдений за ростом деревьев. В каждый срок наблюдений (по каждому виду) измеряли по 20 побегов, хвоинок и препаратов ствола.

Данные о динамике температуры воздуха за вегетационные периоды предоставлены Петрозаводской гидрометеообсерваторией (Сулажгорская метеостанция).

Результаты исследования проанализированы методами вариационной статистики [5]. Статистическая обработка материалов наблюдений показала, что при определении среднеарифметической величины прироста побегов точность опыта составила в среднем 5 %, коэффициент вариации – 18 %, для хвои и ствола – соответственно 4 и 15 %, 7 и 22 %.

Результаты исследования и их обсуждение

При изучении температурного режима воздуха в период роста деревьев установлено, что у деревьев *Pinus sylvestris* рост побегов начинается раньше (15.V) других изученных видов – при среднесуточной температуре воздуха 5,2 °С (табл. 1).

Таблица 1

Температурный режим (°С) воздуха в период роста деревьев*

Вид	Начало роста			Кульминация прироста			Окончание роста		
	Дата	Средне-суточная температура	Сумма положительных температур	Дата	Средне-суточная температура	Сумма положительных температур	Дата	Средне-суточная температура	Сумма положительных температур
<i>Побеги</i>									
<i>Pinus sylvestris</i> L.	15.V	5,2	510	18.VI	14,2	929	21.VII	17,0	1854
<i>Picea abies</i> (L.) Karst	27.V	9,2	530	15.VII	19,1	1889	23.VII	17,3	1900
<i>Larix sibirica</i> Ledeb.	28.V	9,8	551	24.VI	15,0	1087	16.VII	16,1	1780
<i>Хвоя</i>									
<i>Pinus sylvestris</i> L.	25.V	10,9	503	26.VII	18,6	1933	31.VIII	12,0	2404
<i>Picea abies</i> (L.) Karst	02.VI	11,3	674	12.VII	17,8	1854	19.VIII	11,0	2349
<i>Larix sibirica</i> Ledeb.	30.IV	5,9	89	29.V	10,6	569	14.VI	12,6	892
<i>Стволы</i>									
<i>Pinus sylvestris</i> L.	08.VI	11,2	777	12.VI	13,8	820	19.VIII	9,2	1320
<i>Picea abies</i> (L.) Karst	12.VI	12,1	832	20.VI	17,3	990	25.VIII	9,5	1446

*Здесь и далее, в табл. 2, приводятся данные, усредненные за 3 года.

У деревьев *Picea abies* и *Larix sibirica* эта фенофаза отмечается на две недели позже при температуре 9,2...9,8 °С. Сумма положительных температур (далее – теплообеспеченность) к этому времени примерно одинаковая – 510...551 °С.

В дальнейшем скорость деятельности апикальной меристемы продолжает зависеть от температурного режима воздуха: с ее повышением прирост заметно возрастает. Максимальный прирост побегов быстрее всего наступает у деревьев *Pinus sylvestris* и *Larix sibirica* (18–24.VI) при температуре 14,2 и 15,0 °С соответственно. У *Picea abies* эта фенофаза отмечается на три недели позже и при значительно более высокой температуре воздуха (19,1 °С). В это время суточный прирост побегов достигает наибольших значений (12,7 мм) у деревьев *Pinus sylvestris*, у других изученных видов – всего 3,4...5,1 мм (табл. 2).

Таблица 2

Некоторые характеристики прироста вегетативных органов

Вид	Максимальный суточный прирост, мм			Годичный прирост, мм			Продолжительность роста, сут		
	Побеги	Хвоя	Стволы	Побеги	Хвоя	Стволы	Побеги	Хвоя	Стволы
<i>Pinus sylvestris</i>	12,7±0,4	3,4±0,1	0,07±0,005	422±32	52±3	1,7±0,2	77	98	72
<i>Picea abies</i>	3,4±0,2	1,7±0,1	0,04±0,002	65±4	23±1	3,3±0,3	57	78	74
<i>Larix sibirica</i>	5,1±0,2	2,3±0,1	Не опр.	115±7	42±2	Не опр.	48	45	Не опр.

К моменту кульминации прироста побегов у деревьев *Pinus sylvestris* и *Larix sibirica* теплообеспеченность повышалась до 929...1087 °С, у *Picea abies* – до 1889 °С. В период от начала до кульминации прироста побегов между интенсивностью их роста и температурой воздуха установлена довольно сильная прямолинейная зависимость ($r = +0,62...+0,80$). После кульминации прироста побегов эта зависимость перестает прослеживаться. Наличие подобной связи на протяжении всего периода роста побегов отмечали С.А. Николаева и Д.А. Савчук [15], Е.А. Робакидзе и А.И. Патов [19], Е.Н. Репин [18].

Рост побегов у изученных видов прекращается почти одновременно (16.VII–23.VII). В этот период времени температура воздуха и их теплообеспеченность мало отличаются: соответственно 16,1 и 17,3, 1780 и 1900 °С.

Самый продолжительный период формирования побегов установлен для деревьев *Pinus sylvestris* – 77 сут, у деревьев *Picea abies* и *Larix sibirica* он соответственно на 3 и 4 недели меньше (табл. 2). Годичный прирост двух последних видов составляет всего 65...115 мм, наибольшие значения отмечены у деревьев *Pinus sylvestris* – 422 мм.

Проведенные исследования показали, что время появления молодой хвои в значительной степени обусловлено видовой принадлежностью. Ее рост раньше начинается у лиственницы (30.IV), затем у деревьев сосны (25.V) и ели (02.VI). Температура воздуха и теплообеспеченность в этот период достигают для лиственницы соответственно 5,9 и 89 °С, для сосны – 10,9 и 503 °С, для ели – 11,3 и 674 °С (см. табл. 1).

На интенсивность роста хвои среднесуточная температура воздуха оказывает влияние на протяжении всего периода ее формирования ($r = 0,49...0,79$). Максимальная интенсивность роста хвои у *Larix sibirica* отмечена всего при 10,6 °С, у *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – при самой высокой за вегетацию температуре воздуха – соответственно 17,8 и 18,6 °С. В таежной зоне зависимость скорости роста хвои *Picea abies* и *Pinus sylvestris* от температуры воздуха на протяжении всего ее ростового периода обнаружена и другими исследователями [6–13, 19].

Самые ранние сроки кульминации прироста хвои имеют деревья *Larix sibirica* (29.V) при температуре воздуха и теплообеспеченности 10,6 и 569 °С, далее *Picea abies* (12.VII) – соответственно при 17,8 и 1854 °С и *Pinus sylvestris* (26.VII) – при 18,6 и 1933 °С. В это время суточный прирост хвои у деревьев *Pinus sylvestris* достигает 3,4 мм, у *Larix sibirica* и *Picea abies* – соответственно в 1,5 и 2 раза меньше (табл. 2).

Самые ранние сроки прекращения роста хвои отмечены у деревьев *Larix sibirica* (14.VI) при температуре воздуха 12,6 °С и теплообеспеченности 892 °С. У двух других изученных видов эта фенофаза заканчивается на 1,5 месяца позже (19.VIII–31.VIII) при такой же температуре, но значительно большей теплообеспеченности – 2349...2404 °С. Зависимость сроков прекращения роста листового аппарата хвойных лесообразователей от температуры воздуха в таежной зоне отмечается и другими учеными [6–12, 16].

Самый продолжительный период формирования хвои зафиксирован для деревьев *Pinus sylvestris* – 98 сут. Рост хвои у деревьев *Picea abies* и *Larix sibirica* длится в 1,5–2 раза меньше (табл. 2). Самая длинная хвоя формируется у деревьев *Pinus sylvestris* – 52 мм, у *Picea abies* она более чем в 2 раза короче.

Деятельность камбия ствола у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* начинается почти в одно время – 8–12.VI при температуре (11,2...12,1 °С) и теплообеспеченности (777...832 °С). Многочисленными исследованиями [2–4, 6, 10–12, 14, 16, 21, 26, 27] установлено, что в таежной зоне температура воздуха оказывает решающее влияние на сроки начала образования древесины ствола хвойных видов. В дальнейшем температура воздуха продолжает обуславливать интенсивность деятельности камбия стволов. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют об этом ($r = +0,51...+0,58$). Многочисленные исследования [3, 6, 8, 10, 11, 22, 27, 28], проведенные ранее в лесной и лесостепной зонах, также выявили заметное влияние температуры воздуха на интенсивность формирования древесины ствола деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies*.

Наибольшей величины радиальный суточный прирост ствола у деревьев *Pinus sylvestris* достигает 12.VI при температуре воздуха 13,8 °С, у деревьев *Picea abies* – лишь через неделю при температуре 17,3 °С. Сумма положительных температур к этому времени составляет 820...990 °С (табл. 2). Максимальный суточный радиальный прирост у деревьев *Pinus sylvestris* – 70 мкм, что в 1,5 больше, чем у *Picea abies*.

Радиальный рост древесины ствола у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* заканчивается почти одновременно (в конце августа) при понижении среднесуточной температуры до 9,2...9,5 °С и повышении суммы положительных температур почти до 1500 °С. Ранее В.В. Острошенко [16] обнаружил прекращение деятельности камбия ствола у деревьев *Picea abies* при снижении среднесуточной температуры воздуха до 10...11 °С.

Продолжительность формирования камбием древесины у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* почти не различается – 72 и 74 сут (табл. 2). Годичный радиальный прирост стволов у деревьев *Pinus sylvestris* (1,7 мм) в 2 раза превышает таковой у *Picea abies*.

Выводы

1. Сроки начала, кульминации и прекращения роста вегетативных органов определяются как биологией вида, так и погодными условиями.

2. В конце апреля у деревьев *Larix sibirica* появляется хвоя, в конце мая – у *Pinus sylvestris*, в начале июня – у *Picea abies*. В середине мая начинается рост побегов у *Pinus sylvestris*, в конце мая – у *Picea abies* и *Larix sibirica*. В начале июня у деревьев *Pinus sylvestris* и в середине июня у деревьев *Picea abies* происходит рост древесины ствола.

3. Максимальная интенсивность прироста побегов у деревьев *Pinus sylvestris* и *Larix sibirica* приурочена к середине – концу июня, у *Picea abies* к середине июля; хвои у деревьев *Larix sibirica* начинается в конце мая, у *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – в середине – конце июля; стволов у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – в середине июня.

4. Рост хвои у деревьев *Larix sibirica* заканчивается в середине июня, у *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – в конце августа; рост побегов у *Larix sibirica* – в конце июня, у *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – в конце июля; рост стволов – в конце августа.

5. Рост побегов у деревьев *Pinus sylvestris*, *Picea abies* и *Larix sibirica* длится соответственно 77, 57 и 48 сут, хвои – 98, 78 и 45 сут, стволов – 72 и 74 сут.

6. Рост побегов у деревьев *Pinus sylvestris* начинается при температуре воздуха 5,2 °С, у *Picea abies* и *Larix sibirica* – при 9,2 и 9,8 °С; хвои у деревьев *Larix sibirica* – при 5,9 °С, у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – при 10,9 и 11,3 °С; стволов у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – при 11,2 и 12,1 °С.

7. Наиболее интенсивный рост побегов у деревьев *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica* и *Picea abies* отмечается при среднесуточной температуре воздуха 14,2; 15,0 и 19,1 °С соответственно; хвои у деревьев изученных видов – при 10,6; 17,8 и 18,6 °С; стволов у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* – при 13,8 и 17,3 °С.

8. Прекращение роста вегетативных органов у изученных видов имеет место при близких значениях температуры воздуха. Формирование побегов заканчивается при температуре 16,1...17,3 °С, хвои – при 11,0...12,6 °С, стволов – при 9,2...9,5 °С.

9. Наименее требовательным (для ростовых процессов) к температурному режиму воздуха видом является *Larix sibirica*, далее следуют *Pinus sylvestris* и *Picea abies*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабушкина Е.А., Белокопытова Л.В. Климатический сигнал в радиальном приросте хвойных в лесостепи юга Сибири и его зависимость от локальных условий произрастания // Экология. 2014. № 5. С. 323–331. DOI: 10.7868/S0367059714050035
2. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Зависимость радиального прироста сосны обыкновенной от факторов внешней среды в лесостепи Предбайкалья // Лесоведение. 2003. № 5. С. 30–37.
3. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Влияние факторов внешней среды на рост ствола сосны обыкновенной в лесостепном Предбайкалье // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII, № 3. С. 86–95.
4. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Особенности роста вегетативных органов сосны обыкновенной в лесостепном Предбайкалье // Экология. 2007. № 6. С. 409–416. DOI: 10.1134/S1067413607060021
5. Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.
6. Кищенко И.Т. Сезонный рост хвои представителей рода *Picea* (*Pinaceae*) в условиях интродукции // Ботан. журн. 1998. № 1. С. 103–109.
7. Кищенко И.Т. Влияние климатических факторов на сезонное развитие трех видов рода *Larix* Mill., интродуцированных в Южную Карелию // Растительные ресурсы. 2000. Т. 36, вып. 2. С. 44–53.

8. *Кищенко И.Т.* Рост и развитие аборигенных и интродуцированных видов семейства *Pinaceae* Lindl. в условиях Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. 214 с.
9. *Кищенко И.Т.* Сезонный рост хвой некоторых видов *Pinus* L., интродуцированных в Южную Карелию // Растительные ресурсы. 2000. Т. 36, вып. 2. С. 53–61.
10. *Кищенко И.Т.* Влияние климатических факторов на рост представителей рода *Pinus* (*Pinaceae*) в условиях интродукции // Экология. 2004. № 4. С. 249–254.
11. *Кищенко И.Т., Вантенкова И.В.* Влияние экологических факторов на сезонный рост *Picea abies* L. Karst. в Северной Карелии // Экология. 2007. № 2. С. 111–116. DOI: 10.1134/S1067413607020063
12. *Кищенко И.Т., Вантенкова И.В.* Сезонный рост вегетативных органов ели европейской в разных типах леса Северной Карелии // Лесоведение. 2009. № 1. С. 63–69.
13. *Молчанов А.А., Смирнов В.В.* Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 95 с.
14. *Николаев А.Н., Исаев А.П., Федоров П.П.* Радиальный прирост лиственницы и сосны в Центральной Якутии в связи с изменением климата за последние 120 лет // Экология. 2011. № 4. С. 243–250. DOI: 10.1134/S1067413611040114
15. *Николаева С.А., Савчук Д.А.* Рост и развитие деревьев и древостоев сосны на юге Томской области // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2009. № 4(8). С. 66–78.
16. *Острошенко В.В.* Сезонный рост ели аянской // Лесн. хоз-во. 1982. № 4. С. 52–55.
17. Программа и методы биогеоэкологических исследований. М.: Изд-во АН СССР, 1974. 404 с.
18. *Репин Е.Н.* Рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях южной части Приморского края // Перспективы науки. 2014. № 8(59). С. 7–9.
19. *Робакидзе Е.А., Патов А.И.* Рост хвой ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в зависимости от экологических факторов // Лесн. журн. 2011. № 3. С. 7–14. (Изв. высш. учеб. заведений).
20. *Яценко-Хмелевский А.А.* Основы и методы анатомического исследования древесины. М.: Наука, 1954. 338 с.
21. *Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M.* The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic – A Possible Mechanism // Journal of Climate. 2004. Vol. 17, no. 20. Pp. 4045–4057.
22. *Borowski M., Dziekonski H.* Rozklad przyrostu grubosci wzdluz srezal sosen w zaltznosci od stanowiska socjalnego drzew // Sylwan. 1974. Vol. 118, iss. 11. Pp. 8–15.
23. *Briffa K.J., Jones Ph.D., Schweingruber F.H., Shiyatov S.G., Cook E.R.* Unusual Twentieth-Century Summer Warmth in a 1,000-Year Temperature Record from Siberia // Nature. 1995. Vol. 376, iss. 6536. Pp. 156–159. DOI: 10.1038/376156a0
24. *D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Free R.M.* Tree-Ring Width and Maximum Late-Wood Density at the North American Tree Line: Parameters of Climatic Change // Canadian Journal of Forest Research. 1992. Vol. 22, iss. 9. Pp. 1290–1296. DOI: 10.1139/x92-171
25. *Esper J., Frank D., Büntgen U., Verstege A., Hantemirov R.M., Kirilyanov A.V.* Trends and Uncertainties in Siberian Indicators of 20th Century Warming // Global Change Biology. 2010. Vol. 16, iss. 1. Pp. 386–398. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x
26. *Lanner R.M.* Temperature and the Diurnal Rhythm of Height Growth in Pines // Journal of Forestry. 1964. Vol. 62, iss. 7. Pp. 493–495. DOI: 10.1093/jof/62.7.493
27. *Larson P.R.* Effect of Temperature on the Growth and Wood Formation of Ten *Pinus resinosa* Sources // Silvae Genetica. 1967. Vol. 16, iss. 2. Pp. 58–65.
28. *Leikola M.* The Influence of Environmental Factors on the Diameter Growth of Forest Trees. Auxanometric Study // Acta Forestalia Fennica. 1969. Vol. 92. 144 p.

UDC 582.475.2:581.522.68

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.84

The Influence of Air Temperature on Seasonal Growth of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Republic of Karelia)

I.T. Kishchenko, Doctor of Biology, Prof., Corresponding Member of RAS;

ORCID: 0000-0002-1039-1020

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185640, Russian Federation; e-mail: ivanki@karelia.ru

Seasonal growth of forest-forming species is widely studied by Russian and foreign scientists. The research purpose is to analyse the growth features of vegetative organs of coniferous forest-forming species in the taiga zone. The study objects were Scots pine (*Pinus sylvestris*), Norway spruce (*Picea abies*) and Siberian larch (*Larix sibirica*). The time frames of beginning, culmination and cessation of growth of vegetative organs are determined by both species biology and weather conditions. In late April, needles appear at *Larix sibirica* trees; in late May – at *Pinus sylvestris* trees; in early June – at *Picea abies* trees. In mid-May, shoots start growing in *Pinus sylvestris* trees; in late May – at *Picea abies* and *Larix sibirica* trees. Wood trunk grows in early June in Scots pine and in mid-June in Norway spruce. The maximum intensity of increment of Scots pine and Siberian larch shoots is timed to mid-late June, and European spruce shoots – mid-July; larch needles – in late May, pine and spruce needles – in mid-late July; Scots pine and Norway spruce trunks – in mid-June. Needles growth at *Larix sibirica* trees ends in mid-June, and at *Pinus sylvestris* and *Picea abies* trees – in late August; shoots growth at *Larix sibirica* trees – in late June, at *Pinus sylvestris* and *Picea abies* – in late July; trunks growth – in late August. The duration of shoots formation at *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Larix sibirica* trees is 77, 57 and 48 days, respectively; needles formation – 98, 78 and 45 days; trunks formation – 72 and 74 days. The growth intensity of shoots and needles at the trees of studied species is mainly determined by the air temperature during the period of their enhanced growth (July). The least fastidious (for growth processes) to the air temperature regime is *Larix sibirica*, than *Pinus sylvestris*, and finally *Picea abies*.

For citation: Kishchenko I.T. The Influence of Air Temperature on Seasonal Growth of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Republic of Karelia). *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 84–93. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.84

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR (project no. 18-44-100002 p_a).

Keywords: taiga, Scots pine (*Pinus sylvestris*), Norway spruce (*Picea abies*), Siberian larch (*Larix sibirica*), shoots, needles, trunk, growth of vegetative organs, air temperature.

REFERENCES

1. Babushkina E.A., Belokopytova L.V. Climatic Signal in Radial Increment of Conifers in Forest-Steppe of Southern Siberia and Its Dependence on Local Growing Conditions. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2014, no. 5, pp. 323–331. DOI: 10.7868/S0367059714050035
2. Zabuga V.F., Zabuga G.A. Dependence of Radial Increment of Scots Pine on Environmental Factors in Forest-Steppe of the Cisbaikalia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2003, no. 5, pp. 30–37.
3. Zabuga V.F., Zabuga G.A. Influence of Environmental Factors on Growth of the Scots Pine Trunk in the Forest-Steppe Pre-Baikal Region. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2006, vol. XXIII, no. 3, pp. 86–95.

4. Zabuga V.F., Zabuga G.A. Specific Features of the Growth of Scots Pine Vegetative Organs in the Forest-Steppe Zone of Cisbaikalia. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2007, no. 6, pp. 409–416. DOI: 10.1134/S1067413607060021
5. Zaytsev G.N. *Mathematical Statistics in Experimental Botany*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 424 p.
6. Kishchenko I.T. Needle Seasonal Growth of the Genus *Picea* (Pinaceae) Representatives under the Conditions of Introduction. *Botanicheskii Zhurnal*, 1998, no. 1, pp. 103–109.
7. Kishchenko I.T. Influence of Climatic Factors on Seasonal Development of Three Species of the Genus *Larix* Mill. Introduced into Southern Karelia. *Rastitelnye resursy*, 2000, vol. 36, iss. 2, pp. 44–53.
8. Kishchenko I.T. *Growth and Development of Native and Introduced Species of the Pinaceae Lindl. Family in the Conditions of Karelia*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2000. 214 p.
9. Kishchenko I.T. Needle Seasonal Growth of Some *Pinus* L. Species Introduced into South Karelia. *Rastitelnye resursy*, 2000, vol. 36, iss. 2, pp. 53–61.
10. Kishchenko I.T. Effect of Climatic Factors on the Growth of Representatives of the Genus *Pinus* (Pinaceae) under Conditions of Introduction. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2004, no. 4, pp. 249–254.
11. Kishchenko I.T., Vantenkova I.V. Effects of Environmental Factors on the Seasonal Growth of *Picea abies* L. (Karst.) in Northern Karelia. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2007, no. 2, pp. 111–116. DOI: 10.1134/S1067413607020063
12. Kishchenko I.T., Vantenkova I.V. Seasonal Growth of Vegetative Organs of European Spruce in Different Forest Types of Northern Karelia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2009, no. 1, pp. 63–69.
13. Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Methods of Studying Woody Plants Increment*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 95 p.
14. Nikolaev A.N., Isaev A.P., Fedorov P.P. Radial Increment of Larch and Pine in Central Yakutia as Dependent on Climate Change over the Past 120 Years. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2011, no. 4, pp. 243–250. DOI: 10.1134/S1067413611040114
15. Nikolaeva S.A., Savchuk D.A. Pine Tree and Stand Growth and Development in the Southern Tomsk Oblast. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2009, no. 4(8), pp. 66–78.
16. Ostroshenko V.V. Seasonal Growth of Ajan Spruce. *Lesnoe khozyaystvo*, 1982, no. 4, pp. 52–55.
17. *Program and Methods of Biogeocoenological Research*. Moscow, AN SSSR Publ., 1974. 404 p.
18. Repin E.N. Growth of Scotch Pine (*Pinus Silvestris* L.) in Conditions of Southern Primory. *Perspektivy nauki* [Science Prospects]. 2014, no. 8(59), pp. 7–9.
19. Robakidze E.A., Patov A.I. Needles Growth of Siberian Spruce Depending on Environmental Factors. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2011, no. 3, pp. 7–14.
20. Yatsenko-Khmelevskiy A.A. *Fundamentals and Methods of Anatomical Study of Wood*. Moscow, AN SSSR Publ., 1954. 338 p.
21. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic – A Possible Mechanism. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, no. 20, pp. 4045–4057.
22. Borowski M., Dziekonski H. Rozklad przyrostu grubosci wzdłuż sreszal sosn w zaltznosci od stanowiska socjalnego drzew. *Sylwan*. 1974, vol. 118, iss. 11, pp. 8–15.
23. Briffa K.J., Jones Ph.D., Schweingruber F.H., Shiyatov S.G., Cook E.R. Unusual Twentieth-Century Summer Warmth in a 1,000-Year Temperature Record from Siberia. *Nature*, 1995, vol. 376, iss. 6536, pp. 156–159. DOI: 10.1038/376156a0

24. D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Free R.M. Tree-Ring Width and Maximum Late-Wood Density at the North American Tree Line: Parameters of Climatic Change. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, vol. 22, iss. 9, pp. 1290–1296. DOI: 10.1139/x92-171

25. Esper J., Frank D., Büntgen U., Verstege A., Hantemirov R.M., Kirdyanov A.V. Trends and Uncertainties in Siberian Indicators of 20th Century Warming. *Global Change Biology*, 2010, vol. 16, iss. 1, pp. 386–398. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01913.x

26. Lanner R.M. Temperature and the Diurnal Rhythm of Height Growth in Pines. *Journal of Forestry*, 1964, vol. 62, iss. 7, pp. 493–495. DOI: 10.1093/jof/62.7.493

27. Larson P.R. Effect of Temperature on the Growth and Wood Formation of Ten *Pinus resinosa* Sources. *Silvae Genetica*, 1967, vol. 16, iss. 2, pp. 58–65.

28. Leikola M. The Influence of Environmental Factors on the Diameter Growth of Forest Trees. Auxanometric Study. *Acta Forestalia Fennica*, 1969, vol. 92. 144 p.

Received on April 18, 2018



ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*311+519.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ
ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ**

*К.П. Рукомойников¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: N-6961-2019,
ORCID: 0000-0002-9956-5081*

*А.П. Мохирев², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: N-9961-2019,
ORCID: 0000-0002-1692-3323*

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

²Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru

В ходе лесозаготовительного процесса технологическую схему возможно выстроить, используя разные варианты. При транспортировке древесины с лесосеки на разных этапах применяется водный или сухопутный транспорт в разное время года. Наличие лесных складов и обработка на них древесины также увеличивают многовариантность технологического процесса. Выполнение операций в различных природно-производственных условиях отличается производительностью и материальными затратами. Эффективность производства зависит от эффективного обоснования технологии реализации лесозаготовительных операций с учетом динамических природно-производственных условий функционирования предприятия. Цель исследования – совершенствование технологической схемы транспортных, погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций лесозаготовительного процесса в динамических природно-производственных условиях. Решение поставленной задачи предложено выполнить с использованием графоаналитического моделирования. Переменные и постоянные материальные затраты на выполнение отдельных операций технологического процесса являются определяющими факторами при выборе технологической цепочки в динамических природно-производственных условиях. Разработаны подробные графические модели транспортировки древесины от лесосеки до потребителя, погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций, проходящих на промежуточном и нижнем лесных складах. Показаны возможные варианты технологической цепочки лесозаготовительного процесса. В качестве одного из видов ограничений, накладываемых на поток, протекающий по дугам графа, используются возможные объемы заготовки древесины на лесосеках и реализации продукции потребителям. Предложены математические зависимости, позволяющие осуществить поиск максимального потока минимальной стоимости в динамической структуре технологического процесса выполнения работ на предприятии. Они определяют условия решения поставленной задачи. Предложенная графоаналитическая модель даст возможность осуществить аналитический подход к обоснованию: последовательности транспортировки древесины с лесосек; использования в лесозаготовительном процессе лесных складов, рейдов; применения погрузочно-разгрузочных работ, обрабатывающих операций, вида транспорта; выбора потребителя и вида конечной товарной продукции в динамических природно-производственных условиях работы предприятия. Отличи-

тельной характеристикой модели является ее функционирование на основе учета производительности и трудозатрат, предложенных в качестве пропускных способностей дуг графа.

Для цитирования: Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта «Исследование и моделирование процессов развития экономики лесной промышленности региона в контексте природно-климатических условий и ресурсного потенциала», № 18-410-240003.

Ключевые слова: транспортировка древесины, графоаналитическая модель, технологический процесс, технологическая схема, динамические условия, сезон транспортировки древесины.

Введение

В последние годы вывозка древесины с лесосек до потребителя отличается многовариантностью технологического процесса с применением лесных складов. Большая их часть используется для хранения древесины между транспортными сезонами [23].

Перевалочные лесные склады организуются на границах между более дешевым и дорогим видом транспорта, промежуточные – на границах между временными и круглогодичными лесовозными дорогами для повышения пропускной способности дорог сезонного действия и круглогодичного использования имеющегося лесовозного автопарка. Для перевалки с автомобильного сухопутного транспорта на водный или железнодорожный организуют нижние береговые или прирельсовые лесные склады, которые при применении на складах операций по обработке древесины являются перевалочно-разделочными. На них доставляется древесина в виде деревьев или хлыстов, обрезка сучьев и раскряжевка производятся на складе.

От наличия и местоположения транспортно-складских и обрабатывающих операций зависят структура технологической схемы, система машин и оборудования [10], а значит и техническая, технологическая и транспортная доступность лесных ресурсов [20].

Для обеспечения возможности эффективного использования временных лесовозных дорог небольшой пропускной способности следует взвешенно подходить к выбору технологической схемы лесозаготовительных работ [5, 6, 14, 22].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что при организации транспортировки древесины от лесосеки до потребителя возникают инженерные задачи с разными вариантами их решения: очередности вывозки древесины с различных лесосек; применения или не применения складов; выбора вида транспорта (автомобильный, водный, железнодорожный); выбора технологической схемы транспортно-складских и обрабатывающих операций; выбора времени года для выполнения определенных технологических операций; выбора товарной продукции для реализации потребителю; выбора потребителя.

Существуют исследования по обоснованию сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесины на основе математических моделей, выполненные И.Р. Шегельманом [9, 11]. Использование графоаналитических моделей, предусматривающих построение связей между операциями, позволяет воспринимать технологическую схему отдельных видов работ в

виде логической последовательности, исключает дублирование отдельных технологических элементов, дает возможность оценивать различные системы машин и структуру потоков производства в разнообразных технологических процессах лесных работ [8].

Однако эти исследования не предусматривают возможности их использования для моделирования технологической схемы в динамических условиях, отличающихся необходимостью учета природно-производственных особенностей при транспортировке древесины с лесосеки потребителю.

Методы обоснования нахождения кратчайших путей между вершинами графа описаны в исследованиях Мура [21], Флойда [16], Дейкстры [15], Беллмана [12] и др. Они позволяют осуществить анализ статических элементов работы предприятий и служат базой для реализации стационарно-динамических задач потокового программирования при рационализации потоков в транспортных системах [1–4, 19]. Для решения подобных задач может быть использован симплекс-метод линейного программирования [18].

Перечисленные выше методики и алгоритмы могут применяться в процессе рассмотрения операций технологического процесса лесозаготовительных работ в динамике при представлении их в виде «растянутых во времени графов». Данные исследования достаточно подробно демонстрируют принципиальные схемы и возможности анализа операционной сети. Однако они характеризуют возможность прохождения по дугам каждого временного интервала лишь одного варианта потока и не учитывают специфику лесозаготовительной отрасли, предусматривающую при обосновании графика технологического процесса лесозаготовительных работ необходимость комплексного решения задач разработки нескольких лесосек в течение одного временного диапазона. Ввиду этого они не всегда могут быть использованы при решении вопросов обоснования технологической цепочки ведения работ на лесопромышленных предприятиях.

В условиях необходимости реализации подобного комплексного анализа становится очевидным, что задействование машин и механизмов при выполнении работ на одном из участков лесозаготовительного предприятия сокращает ресурсы их возможного применения в ходе выполнения одноименных операций на территории другого участка в принятом для анализа временном интервале. Отмеченные исследования, предусматривающие теоретическую возможность прохождения нескольких потоков по одноименным операциям технологического процесса каждого анализируемого периода, предоставляют ученому возможность анализа лишь графов с независимыми друг от друга пропускными способностями отдельных параллельных дуг анализируемых временных интервалов.

Цель исследования – совершенствование технологической схемы транспортных, погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций лесозаготовительного процесса в динамических природно-производственных условиях с использованием разрабатываемой графоаналитической модели.

Объекты и методы исследования

С учетом разнообразия существующих вариантов технологического процесса транспортно-складских работ возможно их представление в виде графа. На рис. 1 предложен граф, характеризующий технологический процесс транспортировки древесины от лесосеки до потребителя(ей) с выполнением всех погрузочно-разгрузочных, сплочных работ.

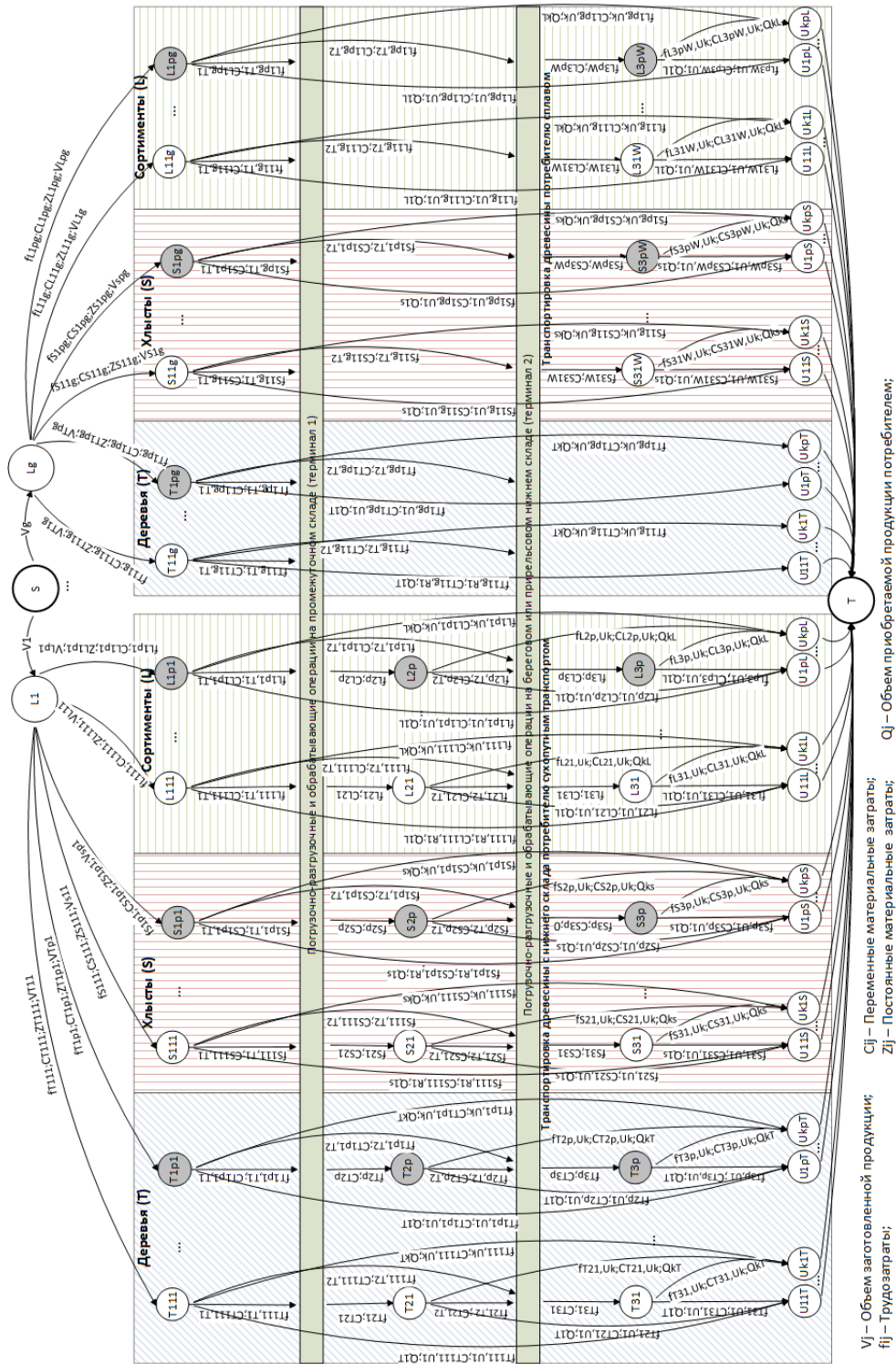


Рис. 1. Графическая модель транспортировки древесины от лесосеки до потребителя
 Fig. 1. Graphic model of wood transportation from cutting area to consumer

Данная графическая модель представляет собой растянутый во времени динамический граф и позволяет осуществить графоаналитический подход к обоснованию технологической схемы лесозаготовительного процесса, использованию лесных складов, рейдов погрузочно-разгрузочных работ, обрабатываемых операций, видов транспорта (водный, сухопутный), выбору потребителя и вида конечной товарной продукции в динамических природно-производственных условиях окружающей среды.

Граф включает несколько копий каждой рассматриваемой вершины в каждом анализируемом периоде $\theta \in T$. Число периодов может быть различным и зависит от объема и качества исходной информации и необходимой точности получаемых результатов. Множество вершин X_p графа G_p представлено в виде $X_p = \{(x_i, \theta): (x_i, \theta) \in X \times T\}$. Множество дуг \tilde{A}_p задается дугами, ведущими из каждой пары «вершина–время» $(x_i, \theta) \in X_p$ в каждую пару «вершина–время» (x_j, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$. Учитывается, что $x_j \in \Gamma(x_i)$, а $\theta + \tau_{ij}(\theta) \leq p$. Пропускные способности $\tilde{V}(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ для пар «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ составляют ∞ , а пропускные способности $\tilde{V}(x_i, x_j, \theta, \theta)$ для пар «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta) - \tilde{V}_{ij}(\theta)$ могут быть определены в результате анализа трудозатрат $\tilde{f}_{ij}(\theta)$ на выполнение различных видов работ технологического процесса.

Вершина S (рис. 1) представляет собой фиктивный источник, вершина T – фиктивный исток. С фиктивного истока дуги поступают в графы L_N , обозначающие лесосеки. Данные дуги характеризуют пропускную способность потока и определяются объемом вывозки древесины с соответствующей лесосеки V_N . Вся технологическая цепочка представлена на графе промежуточными вершинами, расположенными между вершинами, обозначающими лесосеки L и потребителей U . С вершин L_N дуги поступают в вершины $Mh\theta N$ (M – наименование объекта труда при выполнении операции (деревья – T , хлысты – S , сортименты – L); h – этап транспортировки; θ – номер периода; N – номер лесосеки). Например, вершины $T11, \dots, T1p1$ характеризуют операции транспортировки деревьев, выполняемые на первом этапе в каждом из p периодов для 1-й анализируемой лесосеки. На последующих этапах транспортировки номер лесосеки в обозначении вершины не указывается, так как не влияет на характеристику операции. Например, вершины $T21, \dots, T2p$ характеризуют операцию транспортировки сортиментов на втором этапе (после промежуточного склада) в каждом из p периодов. На третьем этапе, после нижнего склада, в характеристике вершин может появляться обозначение W , что символизирует транспортировку водным или железнодорожным транспортом. Дуги, входящие в вершину, определяют собой операцию погрузки, выходящие из вершины – операцию транспортировки древесины. Дуги характеризуются пропускной способностью, ограниченной трудозатратами f . Также дуги характеризуются переменными (C) и постоянными (Z) затратами. Постоянные затраты учитываются при хранении древесины между периодами. В дугах, выходящих из вершин, характеризующих лесосеки, $V_{M\theta N}$ обозначает объем анализируемого предмета труда в определенный период θ , перемещаемый с лесосеки N . В дугах, входящих в вершины потребителей, присутствует характеристика Q_{AM} , символизирующая максимальный объем продукции M , возможный для приобретения потребите-

лем A . Примеры обозначения дуг: дуга, находящаяся между вершиной L_g и вершиной $T11g$, $fT11g$; $CT11g$; $ZT11g$ символизирует поток с лесосеки g с трудозатратами, переменными и постоянными материальными затратами по погрузке деревьев на g -й лесосеке в первый период для транспортировки на первом этапе; $fS31W$, Uk ; $CS31W$, Uk ; Qks характеризует поток с трудозатратами и переменными затратами на транспортировку сортиментов на третьем этапе (после нижнего склада) в первый период водным (железнодорожным) транспортом k -му потребителю с ограниченным объемом приобретения древесины в виде сортиментов.

Фон на графах ограничивает область операций с определенным предметом труда: диагональная штриховка – операции с деревьями, вертикальная – с хлыстами, горизонтальная – с сортиментами.

Операции по разгрузке, погрузке и обработке древесины на лесных складах или рейдах приведены на рис. 2, 3.

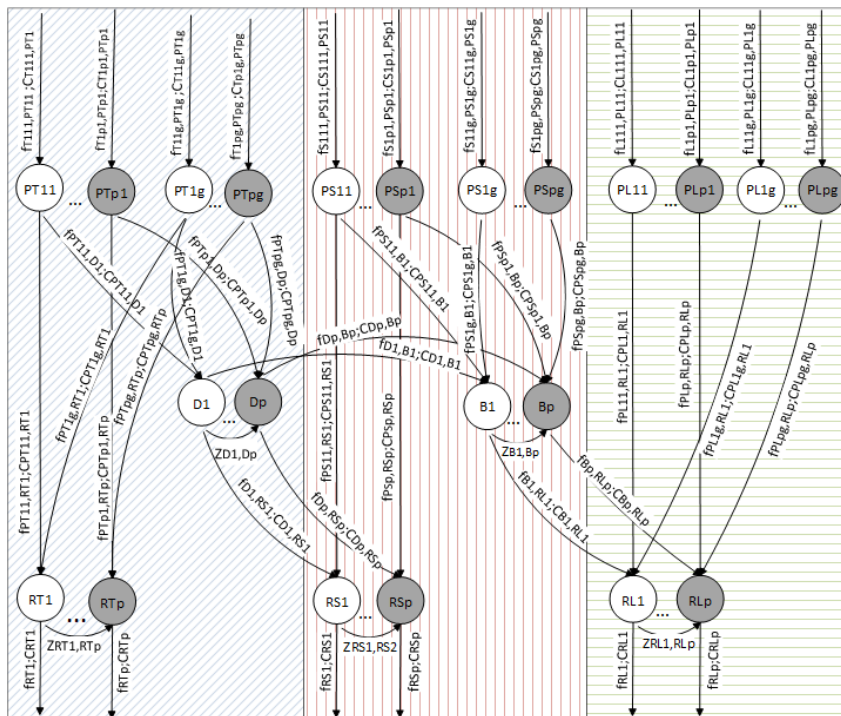


Рис. 2. Графическая модель погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций на промежуточном лесном складе (терминал 1)

Fig. 2. Graphic model of handling and processing operations at the intermediate wood depot (terminal 1)

На графе (рис. 2) представлены вершины, характеризующие четыре вида операций: разгрузку древесины (P), обрезку сучьев (D), раскряжевку (B) и погрузку в автолесовозы (R). Входящие на промежуточный склад дуги символизируют транспортировку древесины с определенными трудозатратами и переменными затратами с различных лесосек. Дуги поступают в вершины $XM\theta N$. Здесь X описывает вид анализируемой операции. Вершины, характеризующие обрабатывающие операции (обрезка сучьев и раскряжевка) обозначаются двумя

символами $X\theta$, а вершины, характеризующие операцию погрузки, – тремя символами $XM\theta$. Обозначения дуг на данном графе аналогичны обозначениям на графе транспортировки древесины от лесосеки до потребителя.

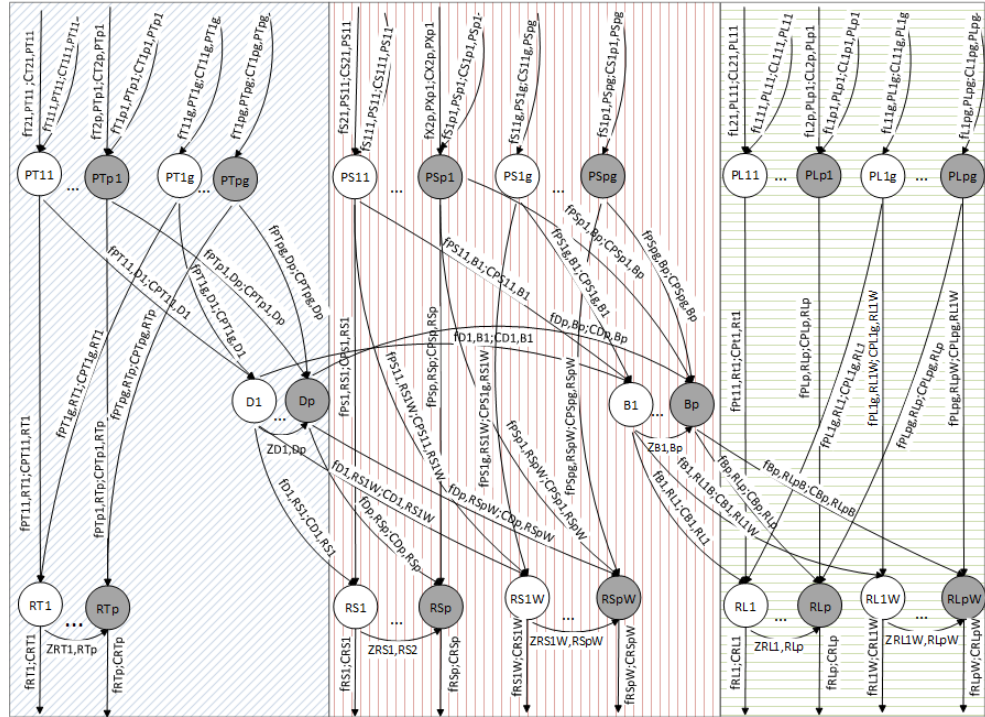


Рис. 3. Графическая модель погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций на береговом или прирельсовом складе (терминал 2)

Fig. 3. Graphic model of handling and processing operations at the coastal or railway depot (terminal 2)

На представленном графе (рис. 3) обозначение вершин графов и дуг, соединяющих их, аналогично графу погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций промежуточного склада. Входящие в граф потоки поступают как с лесосек, так и промежуточного склада (терминал 1). На нижнем складе также присутствуют дополнительные вершины по отгрузке на альтернативный вид транспорта: водный или железнодорожный. Вершины и дуги таких операций обозначаются дополнительной буквой W .

Производительность машин и оборудования находится в прямой зависимости от трудозатрат (f) на выполнение каждой операции, которые указываются на дугах графа. Кроме того, на дугах приведены переменные материальные затраты. К ним можно отнести затраты на топливо и горюче-смазочные материалы, сдельную оплату труда и др. Стоимость перемещения единицы потока по дугам графа $C(x_i, x_j, \theta, \theta)$, соединяющим пару «вершина–время» (x_i, θ) и (x_j, θ) , равны $C_{ij}(\theta)$.

Дуги между вершинами, описывающими одноименные операции различных периодов, характеризуют запасы лесоматериалов, не прошедшие следующую стадию технологической схемы в предыдущем периоде и требующие

обработки в последующих периодах. На таких участках графа при переходе потока между периодами учитываются постоянные затраты (Z). Здесь можно принять во внимание амортизационные отчисления, плановые затраты на техническое обслуживание и ремонт техники, повременную оплату труда, арендную плату за площади, используемые под размещение площадок лесных складов и др. Стоимость перемещения $Z(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ единицы потока по дугам графа между парами «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ равна $Z_{ij}(\theta)$. При таком построении графа появляется возможность принимать во внимание постоянные и переменные затраты на реализацию всех учитываемых в графоаналитической модели операций технологической схемы лесозаготовительных работ.

Результаты исследования и их обсуждение

Математические зависимости для обоснования максимального потока минимальной стоимости [1, 7, 13, 17] в графоаналитической модели операционной сети технологического процесса обработки лесоматериалов при их доставке с лесосек до потребителей могут быть представлены в следующем виде:

1. Необходимо определить рациональный маршрут перемещения заданного объема лесоматериалов по дугам динамической операционной сети в анализируемых на графе периодах:

$$\theta = 1p \sum_{(x_i, x_j) \in \bar{A}} (\tilde{C}_{ij} \tilde{\xi}_{ij}(\theta) + Z_{ij} \min\{1; \tilde{\xi}_{ij}(\theta)\}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

2. Максимальный объем потока \tilde{v} за p периодов равен потоку, выходящему из источника за p периодов:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{sj}(\theta) - \tilde{\xi}_{js}(\theta - \tau_{js}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0}. \quad (2)$$

3. Объем потока $\tilde{\xi}_{ji}$, вошедшего в вершину x_i в момент времени $(\theta - \tau_{ji})$, равен числу единиц потока $\tilde{\xi}_{ij}$, выходящего из вершины x_i в момент θ :

$$\sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = \tilde{0}, \quad x_i \neq s, t; \quad \theta \in T. \quad (3)$$

Эта зависимость должна соблюдаться для всех вершин x_i без учета фиктивного источника и стока.

4. Максимальный объем потока \tilde{v} , перемещенного по дугам графа за p периодов, равен потоку, входящему в фиктивный сток за тот же период:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{tj}(\theta) - \tilde{\xi}_{jt}(\theta - \tau_{jt}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0}. \quad (4)$$

5. Итоговые трудозатраты на реализацию одноименных операций технологической цепочки каждого (θ) периода не могут превышать максимальной продолжительности (m) периода. Следовательно, объем потока $(\tilde{\xi}_{(i=b)j}^X(\theta))$, протекающего по дуге $(x_{i=b}, x_j)$ в рассматриваемом периоде (θ), должен соответствовать следующему неравенству:

$$\tilde{\theta} \leq \tilde{\xi}_{(i=b)j}^X(\theta) \leq \frac{m(\theta) - \sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} \tilde{f}_{ij}^X(\theta) \tilde{\xi}_{ij}^X(\theta)}{\tilde{f}_{(i=b)j}^X(\theta)}, \quad (5)$$

где b – порядковый номер анализируемой дуги ($1 \leq b \leq g$); m – максимальная продолжительность рабочего времени в периоде, ч; $\tilde{f}_{ij}^X(\theta)$ – трудозатраты на обработку или перемещение единицы лесоматериалов при выполнении X -й операции технологического процесса на протяжении θ -го периода, ч/м³; $\tilde{\xi}_{ij}^X(\theta)$ – величина потока, перемещаемого с вершины i в θ -й период при выполнении X -й операции технологического процесса, м³.

Эта зависимость должна соблюдаться для всех периодов и вершин графа, кроме фиктивного источника и дуг, соединяющих между собой периоды:

$$\forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}(\theta); \theta \in T; x_i \neq s; (x_i, x_j) \neq (x_{x_h \ell \theta}; x_{x_h \ell (\theta+1)}). \quad (6)$$

Одним из основных параметров, ограничивающих пропускную способность дуг, является производительность $P(\theta)$. В данном случае под этим показателем понимается объем работы, который может быть выполнен до завершения анализируемого периода. По мере расчета, в результате перемещения по дугам графа того или иного грузопотока, происходит уменьшение времени $m^*(\theta)$, оставшегося до завершения этапа:

$$m^*(\theta) = m(\theta) - \sum_{i=1}^g \sum_{x_j \in X} \tilde{f}_{ij}^X(\theta) \tilde{\xi}_{ij}^X(\theta). \quad (7)$$

При этом трудозатраты на выполнение той или иной операции технологического процесса лесозаготовительных работ и производительность машин и механизмов связаны друг с другом следующей математической зависимостью:

$$P_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^X(\theta)}, \quad (8)$$

и наоборот

$$f_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{P_{ij}^X(\theta)}. \quad (9)$$

6. При обосновании величины потока, протекающего по дугам графа, следует учитывать, что сумма объемов всех видов транспортируемой древесины, вывезенных с лесосеки L_N за все время ее освоения, не должна превышать максимального объема V_N заготовленной на ней древесины:

$$V_N \geq V_{wN} + V_{sN} + V_{tN}. \quad (10)$$

Таким образом, величина потока ($\tilde{\xi}_{L_N(j=b)}(\theta)$), протекающего по дуге $(L_N, x_{j=b})$ от вершины L_N в анализируемом периоде (θ), должна соответствовать следующему неравенству:

$$\tilde{\theta} \leq \tilde{\xi}_{L_N(j=b)}(\theta) \leq V_N - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{j \in [1;b) \cup (b;g]} \tilde{\xi}_{L_N j}(\theta) - \tilde{\xi}_{L_N b}(\theta - \tau_{L_N b}(\theta)) - \tilde{\xi}_{L_N b}(\theta + \tau_{L_N b}(\theta)) \right). \quad (11)$$

7. Сумма объемов каждого вида реализованной потребителю (U) древесины за все периоды освоения лесосек не должна превышать максимально желаемого этим потребителем объема данного вида приобретаемой продукции. Таким образом, величина потока ($\tilde{\xi}_{(i=b)(j=U)}^k(\theta)$) реализуемой потребителю (U) продукции, протекающего по дуге ($x_{(i=b)}, x_{j=U}$) от вершины ($i = b$) в анализируемом периоде (θ), должна соответствовать следующему неравенству:

$$\tilde{\theta} \leq \tilde{\xi}_{(i=b)(j=U)}^y(\theta) \leq Q_U^y - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \tilde{\xi}_{iU}^y(\theta) - \tilde{\xi}_{bU}^y(\theta - \tau_{bU}(\theta)) - \tilde{\xi}_{bU}^y(\theta + \tau_{bU}(\theta)) \right). \quad (12)$$

Заключение

Предложенная динамическая модель позволит осуществить графоаналитический подход к обоснованию: последовательности транспортировки древесины с различных лесосек; использования в лесозаготовительном процессе лесных складов, рейдов; применения погрузочно-разгрузочных работ, обрабатывающих операций, вида транспорта (водный, сухопутный); выбора потребителя и вида конечной товарной продукции в динамических природно-производственных условиях окружающей среды.

При решении данной задачи можно получить рациональный вариант технологического процесса лесозаготовительных работ в динамических природно-производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Божениук А.В., Савельева М.Н.* Оптимизация потоков в транспортных системах // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 5(154). С. 161–167.
2. *Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Божениук А.В.* Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012. № 1(126). С. 121–127.
3. *Божениук А.В., Герасименко Е.М.* Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети // Инж. вестн. Дона. 2013. № 1. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1583> (дата обращения: 25.05.2019).
4. *Божениук А.В., Розенберг И.Н.* Размещение центров обслуживания в ГИС на основе интервальных графов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2007. Т. 14, № 4. С. 682–683.
5. *Борисов Г.А., Кукин В.Д., Кузина В.И.* Методы поиска наивыгоднейшего варианта сети лесовозных дорог // Лесн. журн. 2001. № 3. С. 63–70.
6. *Бурмистрова О.Н., Сушков С.И., Пильник Ю.Н.* Оптимизация параметров транспортных процессов на предприятиях лесопромышленного комплекса // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-2. С. 237–241. Режим доступа: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39317> (дата обращения: 25.02.2019).
7. *Рукомойников К.П.* Графоаналитическое моделирование технологии поквартального освоения лесосек в нечетких динамических природно-производственных

условиях // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/120-16417> (дата обращения: 25.05.2019).

8. Сазонова Е.А. Исследование и обоснование технологических процессов лесосечных работ на основе сквозного энергетического анализа: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2005. 145 с.

9. Шегельман И.П. Анализ сквозных процессов заготовки биомассы дерева и ее переработки на щепу // Современные проблемы развития лесопромышленных производств: науч. тр. 2001. № 6. Петрозаводск: Карел. регион. инж. акад., 2001. С. 13–23.

10. Шегельман И.П., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Учен. зап. ПетрГУ. Сер.: Естественные и технические науки. 2010. № 4(109). С. 66–75.

11. Шегельман И.П., Щеголева Л.В., Пономарев А.Ю. Математическая модель выбора сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесного сырья // Изв. СПбЛТА. 2005. № 172. С. 32–37.

12. Bellman R. On a Routing Problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1958. Vol. 16. Pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435

13. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The Methods of Maximum Flow and Minimum Cost Flow Finding in Fuzzy Network // Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Concept Discovery in Unstructured Data Workshop (CDUD 2012), Leuven, Belgium, May 6–10, 2012. Belgium: Leuven Katholieke Universiteit, 2012. Pp. 1–12.

14. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and Methodology for Planning the Wood Fiber Flow in the Forest Supply Chain // Recent Developments in Supply Chain Management / ed by R. Koster, W. Delfmann. Helsinki: University Press, 2008. Pp. 11–39.

15. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1. Pp. 269–271.

16. Floyd R.W. Algorithm 97: Shortest Path // Communications of the ACM. 1962. Vol. 5, no. 6. Pp. 345. DOI: 10.1145/367766.368168

17. Kovács P. Minimum-Cost Flow Algorithms: An Experimental Evaluation. EGRES Technical Report no. 2013-04. Budapest: Egervary Research Group, 2015. 40 p.

18. Kumar A., Kaur M. A Fuzzy Linear Programming Approach to Solve Fuzzy Maximal Flow Problems // International Journal of Physical and Mathematical Sciences. 2010. Vol. 1, no. 1. Pp. 6–12.

19. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 226, conference 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053

20. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammadov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (The Krasnoyarsk Territory as a Case Study) // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16. Pp. 313–319. DOI: 10.5937/jaes16-16908

21. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze // Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching, April 2–5, 1957. Part II. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1959. Pp. 285–292.

22. Pentek T., Nevečeral H., Ećimović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti // Nova Mehanizacija Šumarstva. 2014. Vol. 35, no. 1. Pp. 63–78.

23. Rukomojnikov K.P. Structuring of Loading Points and Main Skid Road in Conditions of Existing Road Network in Forest Compartment // Journal of Applied Engineering Science. 2015. No. 13. Pp. 167–174. DOI: 10.5937/jaes13-8866

UDC 630*311+519.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning

K.P. Rukomojnikov¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](#), ORCID: [0000-0002-9956-5081](#)

A.P. Mokhitev², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-9961-2019](#), ORCID: [0000-0002-1692-3323](#)

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

²Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, 662543, Russian Federation; e-mail: ale-mokhitev@yandex.ru

It is possible to build a technological scheme using various options in the process of logging. Water or land transport is used in different seasons during wood transportation from the cutting area at different stages. The presence of wood depots and wood processing at them also increase the multivariance of the technological process. The operation flow in various natural and industrial conditions differs in productivity and material expenses. Production efficiency depends on the effective validation of the technology of logging operations' implementation with regard to the dynamic natural and industrial conditions of the enterprise functioning. The research purpose is improving of the technological scheme of transport, handling and processing operations of logging in dynamic natural production conditions. The solution of the issue is proposed to perform using semi-graphical modeling. Variable and constant material expenses for the individual operations flow of the technological process define the technological scheme in the dynamic natural and industrial conditions. As a result detailed graphic models of wood transportation from the cutting area to the consumer, handling and processing operations taking place in the intermediate and lower wood depots have been developed. The possible variants of the logging technological scheme are shown. Possible volumes of timber harvesting in cutting areas and consumer sales of products are used as one of the restrictions imposed on the flow running through the graph arcs. Mathematical functions allowing searching for the maximum flow of the minimum cost in the dynamic structure of the technological process of work flow at the enterprise are proposed. They define the conditions for problem solving. The proposed semi-graphical model will enable the analytical approach to validation the sequence of wood transportation from the cutting area and usage of wood depots and raids in logging, using of handling and processing operations, choosing the transport type, consumer and type of final commodity products in the dynamic natural production conditions of the enterprise working. A distinctive feature of the proposed model is its functioning based on the performance and labor costs proposed as the throughput of the graph arcs.

For citation: Rukomojnikov K.P., Mokhitev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 94–107. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR, Government of Krasnoyarsk Krai and Krasnoyarsk Regional Fund of support scientific and technical activities, KSAU within the framework of the scientific project “Research and Modeling of the Economic Development Processes of the Region’s Timber Industry in the Context of Natural and Climatic Conditions and Resource Potential”, no. 18-410-240003.

Keywords: wood transportation, graphic-analytical model, technological process, technological scheme, dynamic conditions, season of wood transportation.

REFERENCES

1. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savelyeva M.N. Optimization of Flows in Transport Systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], 2014, no. 5(154), pp. 161–167.
2. Bershtein L.S., Beliakov S.L., Bozhenyuk A.V. The Using of Fuzzy Temporal Graphs for Modeling in GIS. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], 2012, no. 1(126), pp. 121–127.
3. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M. Developing of the Algorithm of Maximum Flow of Minimum Cost Finding in a Fuzzy Dynamic Network. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2013, iss. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1583> (Accessed 25.05.2019).
4. Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N. Placement of Service Centers in GIS Based on Interval Graphs. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 682–683.
5. Borisov G.A., Kukin V.D., Kuzina V.I. Methods of Searching the Best Profitable Variant for the Forest Road Network. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2001, no. 3, pp. 63–70.
6. Burmistrova O.N., Sushkov S.I., Pilnik Y.N. Optimization Parameters of Transport Processes on Forestry Enterprises. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, iss. 11 (part 2), pp. 237–241. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39317> (Accessed 25.02.2019).
7. Rukomoynikov K.P. Graphic-Analytical Modeling of Technology of Forest Harvesting in Forest Compartment with Fuzzy Dynamic Natural Production Conditions. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/120-16417> (Accessed 25.05.2019).
8. Sazonova E.A. *Research and Validation of Technological Processes of Logging Operations Based on End-to-End Energy-Dispersive Analysis*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2005. 135 p.
9. Shegelman I.R. Analysis of End-to-End Processes of Harvesting Tree Biomass and Its Processing into Wood Chips. *Current Issues of Timber Industry Development: Scientific Works*. Petrozavodsk, Karel'skaya regional'naya inzhenernaya akademiya Publ., 2001, pp. 13–23.
10. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V. Performance Analysis and Evaluation of the Effectiveness of Logging Machines in Various Natural and Industrial Conditions. *Uchenye zapiski PetrGU. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Series: Natural & Engineering Sciences], 2010, no. 4(109), pp. 66–75.
11. Shegelman I.R., Shchegoleva L.V., Ponomarev A.Yu. Mathematical Model of the Choice of Through Flows of Procurement, Transportation and Processing of Wood Raw Materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2005, no. 172, pp. 32–37.
12. Bellman R. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, vol. 16, pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435
13. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The Methods of Maximum Flow and Minimum Cost Flow Finding in Fuzzy Network. *Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Concept Discovery in Unstructured Data Workshop (CDUD 2012), Leuven, Belgium, May 6–10, 2012*. Belgium, Leuven Katholieke Universiteit, 2012, pp. 1–12.
14. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and Methodology for Planning the Wood Fiber Flow in the Forest Supply Chain. *Recent Developments in Supply Chain Management*. Ed by R. Koster, W. Delfmann. Helsinki, University Press, 2008, pp. 11–39.

-
15. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, pp. 269–271.
 16. Floyd R.W. Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the ACM*, 1962, vol. 5, no. 6, pp. 345. DOI: 10.1145/367766.368168
 17. Kovács P. *Minimum-Cost Flow Algorithms: An Experimental Evaluation*. EGRES Technical Report no. 2013-04. Budapest, Egervary Research Group, 2015. 40 p.
 18. Kumar A., Kaur M. A Fuzzy Linear Programming Approach to Solve Fuzzy Maximal Flow Problems. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 6–12.
 19. Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, conference 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053
 20. Mokhiev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (The Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, pp. 313–319. DOI: 10.5937/jaes16-16908
 21. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze. *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching, April 2–5, 1957, Part II*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1959, pp. 285–292.
 22. Pentek T., Nevečerel H., Ećimović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti. *Nova Mehanizacija Šumarstva*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 63–78.
 23. Rukomojnikov K.P. Structuring of Loading Points and Main Skid Road in Conditions of Existing Road Network in Forest Compartment. *Journal of Applied Engineering Science*, 2015, no. 13, pp. 167–174. DOI: 10.5937/jaes13-8866
-

Received on March 13, 2019

УДК 629.11.02/.098

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЯГОВО-СЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА ЛЕСОВОЗНОГО АВТОМОБИЛЯ С ПРИЦЕПОМ

*В.И. Посметьев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: Q-1411-2015,
ORCID: 0000-0001-9878-7451*

В.О. Никонов, канд. техн. наук, доц.; ORCID: 0000-0002-7380-9180

В.В. Посметьев, канд. физ.-мат. наук, доц.; ORCID: 0000-0001-6622-5358

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru, victorvpo@mail.ru

Одним из перспективных и реализуемых способов снижения расхода топлива лесовозного автомобиля с прицепом является разработка и обеспечение функционирования в его конструкции рекуперативного тягово-сцепного устройства. На основании ранее проведенных исследований предложена принципиально новая схема подобного устройства. Для оценки возможности его применения в лесовозном автомобиле с прицепом, нахождения диапазона рекуперлируемой мощности, определения оптимальных конструктивных параметров гидроцилиндра рекуперативного тягово-сцепного устройства разработана основанная на методах классической механики трехмерная математическая модель движения лесовозного автомобиля с прицепом по неровной опорной поверхности. На основе этой модели создана компьютерная программа, с помощью которой получены зависимости влияния скорости лесовозного автомобиля с прицепом, высоты неровностей опорной поверхности, диаметра гидроцилиндра рекуперативного тягово-сцепного устройства на средние значения рекуперативной мощности и продольного ускорения. Выявлено, что эксплуатация лесовозного автомобиля с прицепом, оснащенный подобным устройством, по лесным дорогам с грунтовым покрытием позволяет рекуперировать мощность 4,0 кВт. Установлено, что рекуперлируемая мощность с увеличением скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом по лесной дороге с грунтовым покрытием изменяется по квадратичному закону. Обнаружено, что при увеличении средней высоты неровностей опорной поверхности до 0,4 м возрастание средних значений рекуперлируемой мощности и продольного ускорения прицепа происходит по закону, близкому к квадратичному, однако дальнейшее увеличение высоты неровностей опорной поверхности не приводит к значительному росту этих показателей. Определен оптимальный диаметр гидроцилиндра для устройства, позволяющего рекуперировать наибольшую мощность при высокой эффективности демпфирующих свойств гидросистемы. Результаты работы могут быть использованы научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями при разработке и совершенствовании рекуперативных тягово-сцепных устройств лесовозных автомобилей с прицепом.

Для цитирования: Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 108–123. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108

Ключевые слова: лесовозный автомобиль, прицеп, тягово-сцепное устройство, рекуперация, гидравлическая энергия, рабочая жидкость, пневмогидравлический аккумулятор, математическая модель, имитационное моделирование.

Введение

Ежегодно в Российской Федерации заготавливается не менее 200 млн м³ древесины. Такие значительные объемы заставляют лесозаготовительные предприятия максимально снижать расходы на транспортирование вывозимого леса, на долю которых приходится около 30 % от общих затрат. Современные технологии и лесозаготовительное оборудование позволяют очищать от сучьев спиленные деревья, разделять их непосредственно на делянках и перевозить уже в виде сортиментов на нижний склад или потребителю, минуя верхний склад. В настоящее время в стране основным видом транспорта при вывозке древесины является автомобильный, с помощью которого перевозится примерно 85 % от общего объема транспортируемого леса [10].

Лесовозные автомобили с прицепами эксплуатируются в крайне тяжелых условиях, обусловленных сложным рельефом местности и, как правило, плохо обустроенными временными грунтовыми дорогами. На эффективное использование лесовозных автомобилей с прицепами большой грузоподъемности оказывает существенное влияние несовершенство конструкций тягово-сцепных устройств (ТСУ), обеспечивающих безопасность и плавность движения на повышенных скоростях. В процессе движения лесовозного автомобиля с прицепом по неровной поверхности лесовозной дороги при максимальной загрузке в ТСУ возникают большие динамические нагрузки, приводящие к повреждениям и поломкам самого устройства и автомобиля с прицепом. Кроме того, недостаточно совершенная конструкция ТСУ ведет к снижению скорости движения автомобиля с прицепом, повышению расхода топлива и, как следствие, к сокращению его производительности. Совершенствование ТСУ лесовозных автомобилей с прицепом требует более глубокого изучения и обобщения имеющегося фактического материала по их конструкциям, накопленного как у нас в стране, так и за рубежом.

Результаты многочисленных исследований подтверждают перспективность направления по сокращению расхода топлива лесовозными автомобилями с прицепами путем использования в их конструкции различных рекуперативных механизмов, включая ТСУ [13–20].

Несмотря на кажущуюся простоту применяемых в транспортных средствах рекуперативных механизмов в настоящее время все еще отсутствуют удовлетворительные схемы этих устройств для лесовозных автомобилей с прицепами. Поэтому для повышения их эффективности представляется важным разработка и исследование ТСУ, обеспечивающего накопление и последующее полезное использование в рабочем процессе неизменно производительно рассеиваемой в окружающую среду энергии [6–8].

На основании исследований, проводимых на кафедре производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, и с учетом основных недостатков, выявленных в результате анализа существующих конструкций ТСУ, авторами предложена принципиально новая схема рекуперативного ТСУ (рис. 1).

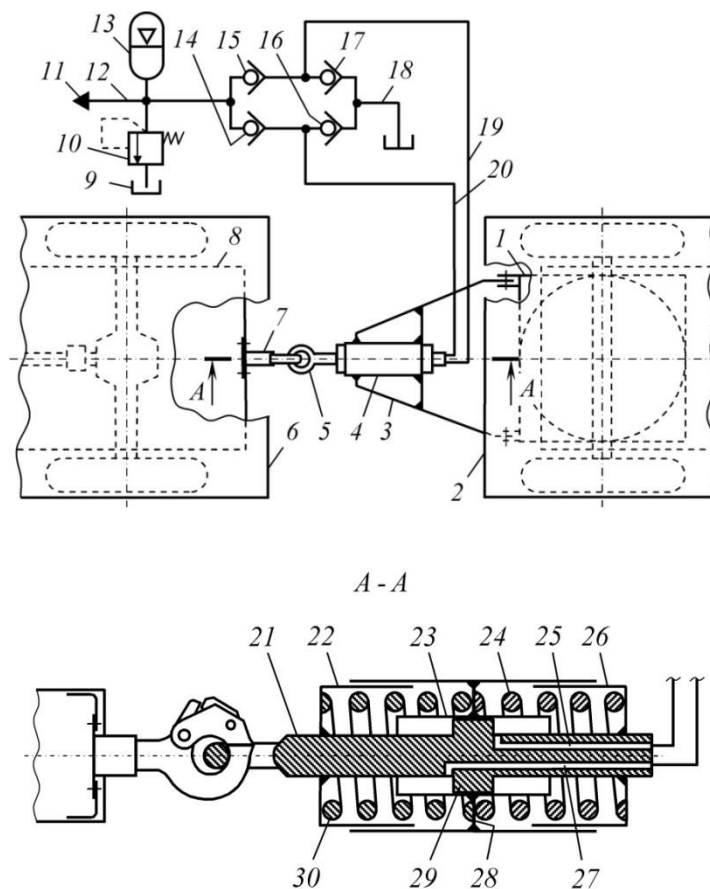


Рис. 1. Схема предлагаемой конструкции рекуперативного ТСУ: 1 – поворотная рама передней колесной пары прицепа; 2 – прицеп; 3 – дышло; 4 – корпус рекуперативного механизма; 5 – соединительное кольцо; 6 – лесовозный автомобиль; 7 – крюк; 8 – рама; 9 – гидробак; 10 – предохранительный клапан; 11 – порт подключения к потребителю рекупируемой рабочей жидкости; 12 – всасывающий трубопровод; 13 – пневмогидравлический аккумулятор; 14–17 – обратные клапаны; 18 – напорный трубопровод; 19, 20 – гибкие трубопроводы; 21 – шток гидроцилиндра; 22, 26 – кожухи; 23 – гидроцилиндр; 24, 30 – пружины; 25, 27 – каналы; 28 – перегородка крепления гидроцилиндра; 29 – поршень

Fig. 1. The scheme of the proposed design of the recuperative towing coupler: 1 – revolving frame of the front wheel pair of the trailer; 2 – trailer; 3 – pole; 4 – body of the recuperative mechanism; 5 – coupling ring; 6 – forest truck; 7 – hook; 8 – frame; 9 – hydraulic tank; 10 – safety valve; 11 – consumer connection port of the recoverable working fluid; 12 – suction pipeline; 13 – hydropneumatic accumulator; 14–17 – check valves; 18 – pressure pipeline; 19, 20 – flexible pipelines; 21 – hydraulic cylinder rod; 22, 26 – coverings; 23 – hydraulic cylinder; 24, 30 – springs; 25, 27 – channels; 28 – mounting bulkhead of the hydraulic cylinder; 29 – piston

Работа рекуперативного ТСУ лесовозного автомобиля с прицепом основана на использовании кинетической энергии от силы инерции, возникающей в сцепке «лесовозный автомобиль–прицеп» при их трогании, разгоне, торможении, поворотах, движении по неровностям поверхности дороги, и преобразовании этой энергии в потенциальную для ее дальнейшего полезного использования, например в технологическом оборудовании лесовозного автомобиля (манипулятор, пильные и сучкорезные рабочие органы, ауриггеры и др.).

Для ускорения работ по созданию и комплексному исследованию предлагаемой конструкции рекуперативного ТСУ необходимо разработать математическую модель, позволяющую изучить влияние параметров и условий работы этого устройства на эффективность и динамические характеристики лесовозного автомобиля с прицепом. На основании имитационного моделирования нужно выполнить оптимизацию конструктивных параметров гидроцилиндра рекуперативного ТСУ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является лесовозный автомобиль с прицепом, а предметом исследования – рекуперативное ТСУ. Для оценки возможности оснащения лесовозного автомобиля с прицепом рекуперативным ТСУ, определения количества рекуперированной гидравлической энергии, установления его оптимальных параметров разработана и исследована математическая модель трехмерного движения лесовозного автомобиля с прицепом по неровной опорной поверхности. Моделирование основано на методах классической механики [1–4].

В рамках модели лесовозный автомобиль с прицепом представлен как два движущихся в трехмерном пространстве абсолютно твердых тела, взаимодействующих с опорной поверхностью упруго-вязким образом в 10 точках (количество колес и сдвоенных колес). При этом тела взаимодействуют между собой через рекуперативное ТСУ в точках A , B , C (рис. 2).

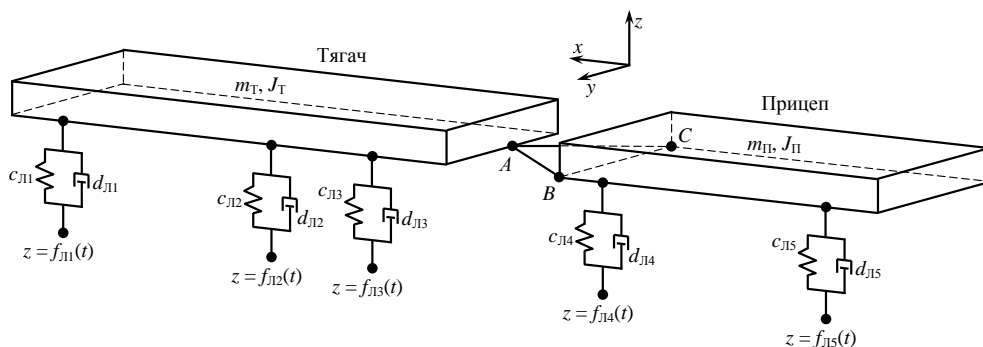


Рис. 2. Расчетная схема для построения динамической модели лесовозного автомобиля с прицепом (показаны только колеса левого борта)

Fig. 2. The scheme for designing a dynamic model of a forest truck with a trailer (only the left-side wheels are shown)

Лесовозный автомобиль и прицеп имеют соответственно массы m_T и m_{II} и моменты инерции J_T и J_{II} , которые рассчитываются для заданного момента времени относительно текущей оси вращения тела.

Положение лесовозного автомобиля и прицепа в пространстве характеризуется декартовыми координатами их центров тяжести (x_T, y_T, z_T) и (x_{II}, y_{II}, z_{II}) , а также углами отклонения локальной системы координат от общей базовой $(\varphi_{xT}, \varphi_{yT}, \varphi_{zT})$ и $(\varphi_{xII}, \varphi_{yII}, \varphi_{zII})$. В модели движение лесовозного автомобиля с прицепом описывается системой дифференциальных уравнений, составленной на базе основных законов динамики поступательного и вращательного движения:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_T \frac{\partial^2 x_T}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{Jli}^x + \sum_{i=1}^3 F_{Pi}^x + F_{Ax}; \\ m_T \frac{\partial^2 y_T}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{Jli}^y + \sum_{i=1}^3 F_{Pi}^y + F_{Ay}; \\ m_T \frac{\partial^2 z_T}{\partial t^2} = -m_T g + \sum_{i=1}^3 F_{Jli}^z + \sum_{i=1}^3 F_{Pi}^z + F_{Az}; \\ J_{Tx} \frac{\partial^2 \varphi_{xT}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^x(F_{Jli}) + \sum_{i=1}^3 M^x(F_{Pi}) + M^x(F_A); \\ J_{Ty} \frac{\partial^2 \varphi_{yT}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^y(F_{Jli}) + \sum_{i=1}^3 M^y(F_{Pi}) + M^y(F_A); \\ J_{Tz} \frac{\partial^2 \varphi_{zT}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^z(F_{Jli}) + \sum_{i=1}^3 M^z(F_{Pi}) + M^z(F_A), \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{II} \frac{\partial^2 x_{II}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 F_{Jli}^x + \sum_{i=4}^5 F_{Pi}^x + F_{Bx} + F_{Cx}; \\ m_{II} \frac{\partial^2 y_{II}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 F_{Jli}^y + \sum_{i=4}^5 F_{Pi}^y + F_{By} + F_{Cy}; \\ m_{II} \frac{\partial^2 z_{II}}{\partial t^2} = -m_{II} g + \sum_{i=4}^5 F_{Jli}^z + \sum_{i=4}^5 F_{Pi}^z + F_{Bz} + F_{Cz}; \\ J_{IIx} \frac{\partial^2 \varphi_{xII}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 M^x(F_{Jli}) + \sum_{i=4}^5 M^x(F_{Pi}) + M^x(F_B) + M^x(F_C); \\ J_{IIy} \frac{\partial^2 \varphi_{yII}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 M^y(F_{Jli}) + \sum_{i=4}^5 M^y(F_{Pi}) + M^y(F_B) + M^y(F_C); \\ J_{IIz} \frac{\partial^2 \varphi_{zII}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 M^z(F_{Jli}) + \sum_{i=4}^5 M^z(F_{Pi}) + M^z(F_B) + M^z(F_C), \end{array} \right. \quad (2)$$

где t – время, с; F_{Jli} и F_{Pi} – силы, передаваемые от колес i -й оси через подвеску по левому (индекс «Л») и правому (индекс «Р») бортам, Н; F_{Ax}, F_{Ay}, F_{Az} – компоненты силы, действующей на лесовозный автомобиль со стороны ТСУ в т. А, Н; $F_{Bx}, F_{By}, F_{Bz}, F_{Cx}, F_{Cy}, F_{Cz}$ – компоненты сил, действующих на прицеп со стороны ТСУ в точках В и С, Н; M^i – моменты рассматриваемых сил относительно оси i , Н·м.

Для задания взаимодействия между телами и опорной поверхностью использовали упрощенную упруго-вязкую модель колеса, сводя упругие системы колеса и подвески к одной обобщенной системе, характеризующейся коэффициентами жесткости и демпфирования. Сила со стороны колеса на корпус лесовозного автомобиля

$$F_i^z = c_i(z_i(x_i, y_i) + R_k - z_{ki}) - d_i \left(\frac{\partial z_i(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{ki}}{\partial t} \right), \quad (3)$$

где i – индекс колеса; c_i , d_i – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия, $c_i = 10^5$ Н/м; $d_i = 10^3$ Н·с/м² (приняты по [8]); $z_i(x_i, y_i)$ – вертикальная координата поверхности под колесом, равная координате нижней точки колеса; R_k – радиус колеса, мм; z_{ki} – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу.

В модели также рассматриваются горизонтальные составляющие сил сцепления с покрытием дороги. Действуя в комплексе, вертикальные и горизонтальные составляющие силы приводят к перемещению модельного лесовозного автомобиля с прицепом в трехмерном пространстве. Система уравнений движения лесовозного автомобиля с прицепом представляет собой систему дифференциальных уравнений 2-го порядка и в общем случае не имеет аналитического решения из-за характера возмущающих функций, отражающих воздействие со стороны опорной поверхности. Поэтому для решения данной системы дифференциальных уравнений используется численный метод Рунге–Кутты 2-го порядка, обладающий высокой универсальностью и позволяющий решать такие задачи с необходимой точностью [5, 9, 11, 12].

Численное решение дифференциальных уравнений заключается в дискретизации времени t на равные шаги, нумеруемые переменной τ , с длительностью шага Δt . На каждом шаге интегрирования рассчитываются силы и моменты, действующие на корпуса лесовозного автомобиля и прицепа. После этого по известным координатам и скоростям движения тел на текущем шаге интегрирования определяются координаты и скорости тел. Например, для декартовой составляющей x численное интегрирование движения условного тела в рамках рассматриваемого метода производится по следующим формулам:

$$\begin{cases} x_{\tau+1} = x_{\tau} + v_{x\tau} \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \Delta t, \end{cases} \quad (4)$$

где $x_{\tau+1}$ и $v_{x\tau+1}$ – координата и скорость движения тела массой m вдоль декартового направления x на последующем шаге интегрирования по времени $\tau + 1$; x_{τ} и $v_{x\tau}$ – то же на предыдущем шаге интегрирования по времени τ .

Таким же образом численное интегрирование производится для остальных декартовых составляющих (y и z) как для корпуса лесовозного автомобиля, так и прицепа.

По мере пересчета предыдущих координат и скоростей в последующие получают таблично заданные функции зависимости от времени координат и углов ориентации лесовозного автомобиля и прицепа. Эти функции анализируются далее для оценки ускорений частот колебаний корпусов лесовоз-

ного автомобиля и прицепа и оценки качества демпфирования рекуперативного ТСУ.

Разработанная модель обладает достаточно высокой универсальностью и позволяет исследовать движение лесовозного автомобиля с прицепом по существенно неровной опорной поверхности. Для исследования движения лесовозного автомобиля с прицепом в прямолинейном направлении по сложному рельефу (в частности, грунтовой или лесной дороге) в модели считали, что рельеф опорной поверхности состоит из набора выступов гауссовой формы, высота и протяженность которых задаются случайным образом и изменяются в широких пределах: от «препятствий» (имитирующих пни, камни, выступающие корни), имеющих малую протяженность (порядка 0,2...0,5 м), до «холмов» большой протяженности (порядка 2,0...5,0 м) (рис. 3).

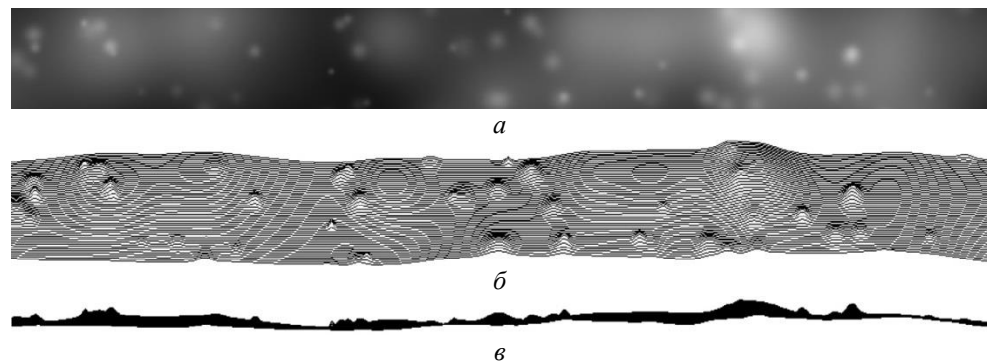


Рис. 3. Изображения участка опорной поверхности размером $50 \times 5 \text{ м}^2$, сгенерированного в модели: *a* – вид сверху; *б* – вид под углом; *в* – вид сбоку

Fig. 3. Images of a section of the bearing surface with the dimension of $50 \times 5 \text{ m}^2$, generated in the simulation: *a* – top view; *б* – angle view; *в* – side view

В рамках модели задавалась функция высоты поверхности от координат точки контакта $z(x, y)$ как суперпозиция гауссовых пиков с параметрами (x_i, y_i) (положение выступа), H_i (высота выступа) и σ_i (среднеквадратическое отклонение, задающее ширину выступа):

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{N_B} H_i \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

где N_B – количество выступов.

Гауссовые пики распределялись по длине и ширине контрольного участка ($50 \times 5 \text{ м}^2$) случайным образом по равномерному закону. При этом параметры H_i и σ_i также выбирались случайным образом по равномерному закону из интервалов: 0...0,1 м – для H_i ; 0,05...0,15 м – для σ_i . Число гауссовых пиков, имитирующих препятствия, рассчитывалось в соответствии со статистическими таблицами параметров для различных типов поверхностей (так называемых дорожно-грунтовых условий).

В данной статье исследуется возможность рекуперации энергии колебаний расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом. Поэтому оценка

рекуперированной мощности производится в модели тягово-сцепного устройства в точках A, B, C (см. рис. 2). Устройство упрощено до двух невесомых тяг: AB и AC . Взаимодействие корпусов лесовозного автомобиля и прицепа через тяги считается упруго-вязким и описывается формулами, аналогичными (3). В процессе движения лесовозного автомобиля с прицепом по сложному рельефу длины тяг изменяются, из-за чего прицеп совершает колебательное движение по отношению к лесовозному автомобилю, который в модели движется с постоянной заданной скоростью. Изменение длин тяг приводит к модельной «накачке» системы рекуперации. При этом оснащение ТСУ системой рекуперации может ухудшить его демпфирующие свойства и привести к движению прицепа с высокими ускорениями по отношению к лесовозному автомобилю. Поэтому в данной модели наряду с рекуперированной мощностью оценивается среднее ускорение прицепа в продольном направлении.

Характеристики системы рекуперации, рассчитываемые в процессе моделирования, должны оценивать рекуперативный эффект и неблагоприятные последствия оснащения системой рекуперации. Соответственно, основными выходными характеристиками являются рекуперированная мощность (мгновенная и средняя) и продольное ускорение прицепа (мгновенное и среднее).

На каждом шаге численного интегрирования вычислялось мгновенное значение рекуперированной мощности через изменение длин условных тяг ТСУ:

$$N_p(t) = d_0 \left(\frac{D_{ГЦ}}{D_{ГЦ0}} \right)^2 \left(\left(\frac{dL_{AB}(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dL_{AC}(t)}{dt} \right)^2 \right), \quad (6)$$

где d_0 – эффективный коэффициент демпфирования от эталонного рекуперативного гидроцилиндра диаметром $D_{ГЦ0}$, мм (в большинстве расчетов использовалось значение 50 мм); $D_{ГЦ}$ – диаметр используемых рекуперативных гидроцилиндров, мм; L_{AB} и L_{AC} – длины тяг ТСУ в текущий момент времени, мм.

Мгновенное продольное ускорение прицепа

$$a_{П}(t) = \frac{d^2 x_{П}(t)}{dt^2}, \quad (7)$$

где $x_{П}$ – координата центра тяжести прицепа вдоль продольной декартовой оси OX .

После проведения компьютерного эксперимента по функциям $N_p(t)$ и $a_{П}(t)$ определялись два усредненных показателя:

$$N_{pc} = \frac{1}{t_{кy} - t_{нy}} \int_{t_{нy}}^{t_{кy}} N_p(t) dt; \quad (8)$$

$$a_{Пс} = \frac{1}{t_{кy} - t_{нy}} \int_{t_{нy}}^{t_{кy}} a_{П}(t) dt, \quad (9)$$

где N_{pc} и $a_{Пс}$ – средние за интервал времени рекуперированная мощность и продольное ускорение прицепа, кВт и м/с²; $t_{нy}$ и $t_{кy}$ – моменты времени, в которые начинается и заканчивается усреднение, производимое не от начала компьютерного эксперимента, так как в первые моменты времени механическая система приходит в состояние равновесия, с.

Данные показатели ниже используются в качестве критериев оптимизации параметров рекуперативной ТСУ.

Для эффективного исследования разработанной математической модели и проведения экспериментов по движению лесовозного автомобиля с прицепом на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7 создана компьютерная программа для моделирования движения лесовозного автомобиля с прицепом, оснащенный рекуперативным ТСУ. Она предназначена для моделирования движения лесовозного автомобиля с прицепом по неровной опорной поверхности в целях определения колебаний прицепа относительно лесовозного автомобиля и расчета мощности, которую можно получить в ТСУ за счет установки рекуперированных элементов, сглаживающих колебания.

Разработанная математическая модель и соответствующая компьютерная программа позволяют исследовать влияние большого количества параметров на эффективность системы рекуперации лесовозного автомобиля с прицепом.

Первая группа входных переменных модели представляет собой параметры системы рекуперации: $D_{ГЦ}$ – диаметр рекуперативного гидроцилиндра ТСУ, мм; $V_{пга}$ – объем пневмогидравлического аккумулятора, л. Ко второй группе входных переменных относятся условия движения лесовозного автомобиля с прицепом, основным из которых является v – скорость движения, км/ч. Третья группа входных переменных включает параметры рельефа опорной поверхности: h_{\min} и h_{\max} – минимальная и максимальная высота неровностей, м; σ_{\min} и σ_{\max} – минимальная и максимальная длина неровностей, м. К показателям эффективности системы рекуперации относятся два показателя: N_{pc} – среднее за время компьютерного эксперимента значение рекуперированной мощности, кВт; $a_{Пс}$ – среднее за время компьютерного эксперимента значение продольного ускорения прицепа, м/с².

Ниже предлагается следующая задача оптимизации: $D_{ГЦ}$ в ТСУ должен обеспечивать максимум средней рекуперированной мощности в процессе движения лесовозного автомобиля с прицепом и одновременно минимум среднего ускорения:

$$\begin{cases} N_{pc}(D_{ГЦ}) \rightarrow \max; \\ a_{Пс}(D_{ГЦ}) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (10)$$

Дальнейшее теоретическое исследование сводится к изучению влияния параметров системы рекуперации, условий движения и параметров рельефа опорной поверхности на показатели эффективности системы рекуперации.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование системы рекуперации проводилось на основе множества компьютерных экспериментов. Прежде всего был выполнен базовый компьютерный эксперимент с наиболее типичными параметрами лесовозного автомобиля с прицепом и системы рекуперации. Перед началом компьютерного эксперимента проводилась подготовка рельефа опорной поверхности для ко-

лес левого и правого бортов. В данном исследовании рельеф соответствовал значительно неровной лесовозной дороге с грунтовым покрытием. В начальный момент времени лесовозный автомобиль и прицеп помещались в начало координат, на некоторой незначительной высоте над опорной поверхностью. После старта численного интегрирования уравнений движения лесовозный автомобиль и прицеп опускались на поверхность под действием силы тяжести и приходили в устойчивое положение примерно за 5 с.

Лесовозному автомобилю с момента моделирования сообщалась заданная скорость движения в направлении оси OX (для приведенных ниже расчетов – 30 км/ч), которая выдерживалась постоянной в течение всего компьютерного эксперимента. В процессе движения по неровной опорной поверхности лесовозный автомобиль и прицеп совершали сложное поступательно-вращательное движение, оставаясь связанными между собой через рекуперативное ТСУ. Изменение длины ТСУ вызывало условное накачивание рабочей жидкости в рекуперативную гидросистему, программа рассчитывала мгновенную рекуперированную мощность для каждого шага интегрирования (рис. 4, *а*). Несмотря на то, что в отдельные моменты времени мгновенные значения рекуперированной мощности могли достигать 34,00 кВт, средняя рекуперированная мощность составляла около 4,28 кВт. Для расчета средней рекуперированной мощности лесовозный автомобиль с прицепом двигался 100 м по опорной поверхности.

Для контроля плавности хода прицепа рассчитывались мгновенное $a_{пл}$ и среднее продольное $a_{лс}$ ускорение прицепа (рис. 4, *б*). Для базового компьютерного эксперимента мгновенное значение ускорения могло достигать около $3,5 \text{ м/с}^2$ при наиболее неблагоприятных комбинациях холмов опорной поверхности. Однако на пути 100 м усредненное продольное ускорение имело значительно меньшее значение – $0,975 \text{ м/с}^2$.

Дальнейшее теоретическое исследование заключалось в изменении скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом, средней высоты неровностей поверхности и диаметра гидроцилиндра рекуперативного ТСУ по отношению к базовым значениям данных параметров и в анализе изменений в показателях эффективности системы рекуперации ($N_{рс}$ и $a_{лс}$).

Для изучения влияния скорости движения (v) лесовозного автомобиля с прицепом в повороте на рекуперированную мощность проведена серия компьютерных экспериментов, в которых изменяли v на уровнях 20, 30, 45 и 60 км/ч. Данная продольная скорость поддерживалась постоянной для центра тяжести лесовозного автомобиля, но продольная скорость прицепа рассчитывалась по уравнениям движения механической системы.

Обнаружено, что с увеличением скорости средняя рекуперированная мощность возрастает приблизительно по квадратичному закону (рис. 4, *в*), а при увеличении скорости движения по неровной поверхности среднее продольное ускорение прицепа – приблизительно по линейному закону (рис. 4, *г*).

Если принять $a_{лс} = 1,0 \text{ м/с}^2$, то максимально допустимая скорость движения по данной неровной поверхности составит около 30 км/ч, рекуперированная мощность – около 4,3 кВт (рис. 4, *в*).

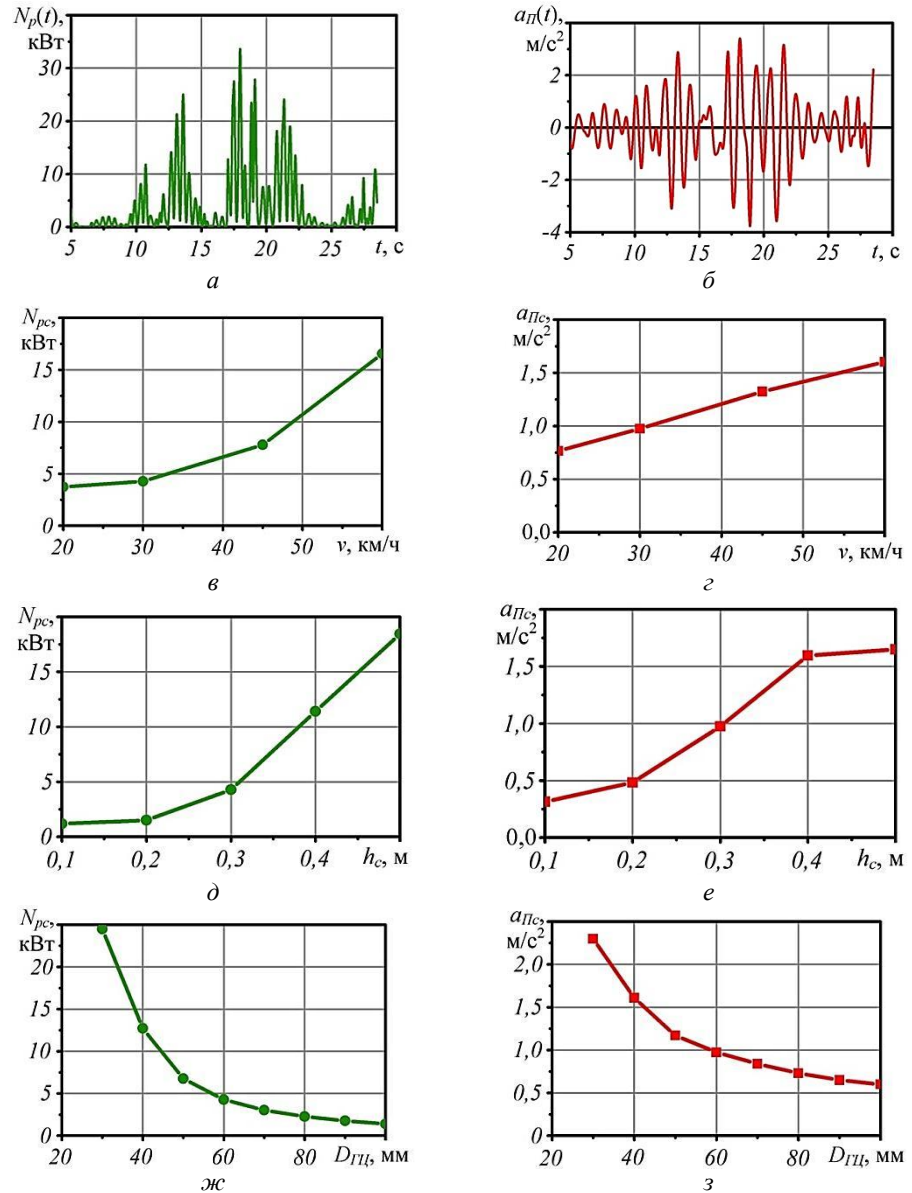


Рис. 4. Результаты компьютерного эксперимента: *a* – зависимость от времени t мгновенной рекуперированной мощности N_p ; *б* – зависимость от времени t мгновенного продольного ускорения $a_{П}$; *в* – влияние скорости v движения лесовозного автомобиля с прицепом на среднюю рекуперированную мощность $N_{рс}$; *г* – влияние скорости v на среднее продольное ускорение прицепа $a_{Пс}$; *д* – влияние средней высоты неровностей h_c на $N_{рс}$; *е* – влияние h_c на $a_{Пс}$; *ж* – влияние диаметра гидроцилиндра $D_{ГЦ}$ на $N_{рс}$; *з* – влияние $D_{ГЦ}$ на $a_{Пс}$

Fig. 4. The computer experiment results: *a* – dependence of the instantaneous recoverable power (N_p) on time (t); *б* – dependence of the instantaneous longitudinal acceleration ($a_{П}$) on time (t); *в* – influence of the movement speed of a truck with a trailer (v) on the average recoverable power ($N_{рс}$); *г* – influence of the speed (v) on the average longitudinal acceleration of the trailer ($a_{Пс}$); *д* – influence of the average height of irregularities (h_c) on the average recoverable power ($N_{рс}$); *е* – influence of the average height of the irregularities (h_c) on the average longitudinal acceleration of the trailer ($a_{Пс}$); *ж* – influence of the hydraulic cylinder diameter ($D_{ГЦ}$) on the average recoverable power ($N_{рс}$); *з* – influence of the hydraulic cylinder diameter ($D_{ГЦ}$) on the average longitudinal acceleration of the trailer ($a_{Пс}$)

Чем более неровной является опорная поверхность, тем большие колебания прицепа происходят относительно лесовозного автомобиля и тем большая мощность может быть рекуперирована. Для исследования влияния высоты неровностей проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли среднюю высоту неровности опорной поверхности h_c от 0,1 до 0,5 м с шагом 0,1 м. При изменении высоты неровностей использовали одни и те же исходные функции рельефа поверхности $z_л(t)$ и $z_п(t)$, умноженные на соответствующие коэффициенты. Установлено, что с увеличением h_c средняя рекуперлируемая мощность N_{pc} возрастает по квадратичному закону в интервале h_c от 0,1 до 0,4 м (рис. 4, *д*). В этом же диапазоне среднее продольное ускорение прицепа растет также по закону, близкому к квадратичному (рис. 4, *е*). Однако при дальнейшем увеличении h_c практически не повышаются колебания механической системы, так как они уже достигли максимума. Это приводит к изменению характера графиков (рис. 4, *д* и *е*): N_{pc} продолжает расти по линейному закону, а $a_{пс}$ практически не увеличивается.

От диаметра гидроцилиндра рекуперативного ТСУ зависит, с одной стороны, интенсивность накачивания рабочей жидкости в рекуперативную гидросистему, с другой – эффективность гашения неблагоприятных колебаний прицепа относительно лесовозного автомобиля. В целях изучения влияния $D_{гц}$ проведена серия компьютерных экспериментов, в которых этот параметр варьировал на уровнях 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 мм.

Как свидетельствует рис. 4, *ж*, с уменьшением диаметра гидроцилиндра рекуперлируемая мощность существенно увеличивается. При уменьшении диаметра от 60 до 40 мм она повышается от 4,3 до 12,7 кВт. Однако необходимо учитывать, что снижение диаметра гидроцилиндра при сохранении им демпфирующих свойств приведет к возрастанию его длины. Поэтому оптимальное значение $D_{гц} = 40...50$ мм, при котором длина гидроцилиндра обеспечивает необходимые демпфирующие свойства. Другим фактором, не позволяющим существенно снизить диаметр гидроцилиндра, является резкое увеличение неблагоприятного продольного ускорения прицепа $a_{пс}$ при уменьшении $D_{гц}$ (рис. 4, *з*). Если принять $a_{пс} = 1 \text{ м/с}^2$, то минимальное значение $D_{гц}$ составит 57 мм.

Заключение

Результаты теоретического исследования показали: эксплуатация лесовозного автомобиля с прицепом, оснащенным рекуперативным ТСУ, по лесовозным дорогам с грунтовым покрытием позволяет рекуперировать мощность 4,0 кВт; рекуперлируемая мощность с увеличением скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге с грунтовым покрытием изменяется по квадратичному закону; при увеличении средней высоты неровностей опорной поверхности до 0,4 м возрастание средней рекуперлируемой мощности и среднего продольного ускорения прицепа происходит по закону, близкому к квадратичному. Имитационное моделирование позволило определить значение оптимального диаметра гидроцилиндра для рекуперативного ТСУ, позволяющее рекуперировать наибольшую мощность при высокой эффективности демпфирующих свойств гидросистемы.

Предлагаемая конструкция рекуперативного ТСУ лесовозного автомобиля с прицепом дает возможность не только снизить расход топлива благодаря рекуперации энергии рабочей жидкости, но и повысить надежность вследствие улучшения демпфирующих свойств его гидросистемы, уменьшить

динамические нагрузки на лесовозный автомобиль и прицеп, улучшить плавность хода при движении лесовозного автомобиля с прицепом по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам, обеспечить более благоприятные условия труда для водителей, упростить и удешевить конструкцию сцепного прибора лесовозного автомобиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
3. Инженерные расчеты на ЭВМ: Справочное пособие / [В.А. Троицкий, И.М. Иванова, И.А. Старостин, В.Д. Шелест]; под ред. В.А. Троицкого. Л.: Машиностроение, 1979. 288 с.
4. Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований: учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 392 с.
5. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: МП «РАСКО», 1991. 272 с.
6. Никонов В.О., Посметьев В.И., Журавлев Р.В. Анализ конструктивных особенностей тягово-сцепных устройств грузовых автомобилей с прицепами // Воронеж. науч.-техн. вестн. 2018. Т. 4, № 4(26). С. 13–24. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36759935> (дата обращения: 25.02.2019).
7. Никонов В.О., Посметьев В.И., Посметьев В.В. Оценка эффективности лесовозного автопоезда с накопителями энергии в гидромоторах колес на основе компьютерного моделирования // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 3(62). С. 46–54.
8. Никонов В.О., Посметьев В.И., Яковлев К.А. Рекуперация гидравлической энергии в тягово-сцепном устройстве лесовозного автомобиля с прицепом // Лесо-техн. журн. 2018. № 4. С. 230–239. DOI: 10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845
9. Новиков Е.А., Кнауб Л.В. Численные методы для обыкновенных дифференциальных уравнений и динамических систем: учеб. пособие. Красноярск: СибФУ, 2010. 112 с.
10. Посметьев В.И., Никонов В.О. Обоснование схемы лесовозного автомобиля, оснащенного перспективной конструкцией колесного модуля с гидроприводом // Мир транспорта и технологических машин. 2017. № 3(58). С. 27–34.
11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.
12. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. 319 с.
13. Abu-Hamdeh N.H., Al-Jalil H.F. Computer Simulation of Stability and Control of Tractor-Trailed Implement Combinations under Different Operating Conditions // Bragantia, Campinas. 2004. Vol. 63, no. 1. Pp. 149–162.
14. Dindorf R., Woś P. Development of Energy Efficient Hydrostatic Drives with Energy Recovery // Mechanik. 2017. No. 8-9. Pp. 776–782. DOI: 10.17814/mechanik.2017.8-9.114
15. Fang Z., Guo X., Xu L., Zhang H. Experimental Study of Damping and Energy Regeneration Characteristics of a Hydraulic Electromagnetic Shock Absorber // Advances in Mechanical Engineering. 2013. Vol. 2013, art. 943528. DOI: 10.1155/2013/943528
16. Heikkilä M., Linjama M. Hydraulic Energy Recovery in Displacement Controlled Digital Hydraulic System // Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping, Sweden, June 3–5, 2013. Linköping: Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2013. Pp. 1–7.

17. *Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V.* Investigation of the Energy-Saving Hydraulic Drive of a Multifunctional Automobile with a Subsystem of Accumulation of Compressed Air Energy // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 441, art. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012041

18. *Wang R., Jiang Q., Ye Q., Chen L., Meng X.* Characteristics Analysis and Experiment of Hydraulic Interconnected Energy-Regenerative Suspension // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2017. Vol. 48(8). Pp. 350–357. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.042

19. *Zhang H., Guo X., Xu L., Hu S., Fang Z.* Parameters Analysis of Hydraulic-Electrical Energy Regenerative Absorber on Suspension Performance // Advances in Mechanical Engineering. 2014. Vol. 2014, art. 836502. DOI: 10.1155/2014/836502

20. *Zou J., Guo X., Xu L., Abdelkareem M.A.A., Gong B., Zhang J., Tan G.* Simulation Research of a Hydraulic Interconnected Suspension Based on a Hydraulic Energy Regenerative Shock Absorber // SAE Technical Paper 2018-01-0582. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0582

Поступила 01.03.19

UDC 629.11.02/.098

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108

Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer

V.I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](#),

ORCID: [0000-0001-9878-7451](#)

V.O. Nikonov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-7380-9180](#)

V.V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ORCID: [0000-0001-6622-5358](#)

Voronezh State University of Forestry and Technologies named G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru, 8888nike@mail.ru, victorvpo@mail.ru

One of the most promising and feasible ways to reduce the fuel consumption of a forest truck with a trailer is the development and support of the operation of its recuperative towing coupler. A fundamentally new scheme of the device was proposed based on the previous studies. In order to assess the possibility of its usage in a forest truck with a trailer, find the range of recoverable power, determine the optimal design parameters of the hydraulic cylinder of the coupler a three-dimensional mathematical model of a forest truck with a trailer movement along uneven support surface has been created based on the classical mechanics methods. A computer program was created based on this model. The program allowed to obtain the dependences of speed of a forest truck with a trailer, height of the supporting surface irregularities and hydraulic cylinder diameter of the recuperative towing coupler on the mean values of the average recoverable power and longitudinal acceleration. It is found that the operation of a forest truck with a trailer, equipped with a recuperative towing coupler, on forest roads with ground coating allows recuperating the power of 4 kW. The recoverable power changes with the increase of the movement speed of a forest truck with a trailer along the forest road with ground coating according to a quadratic law. It has been found that with the increase of the average height of the supporting surface irregularities to 0.4 m, the increase of the mean values of the recoverable power and longitudinal acceleration of the trailer occurs according to a law close to quadratic, however, a further increase of the height of the supporting surface irregularities does not lead to the significant growth of the parameters. The optimal diameter of the hydraulic cylinder for the recuperative towing coupler, which allows recuperating the highest power value at a high efficiency of the damping properties of the hy-

draulic system, is determined. The research results can be used by research and development organizations in the development and improvement of recuperative towing couplers of forest trucks with a trailer.

For citation: Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V. Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 108–123. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108

Keywords: forest truck, trailer, towing coupler, recovery, hydraulic power, working fluid, hydropneumatic accumulator, mathematical model, simulation modeling.

REFERENCES

1. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planning an Experiment in the Search of Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.
2. Granovskiy V.A., Siraya T.N. *Methods of Processing Experimental Data in Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p.
3. Troitskiy V.A., Ivanova I.M., Starostin I.A., Shelest V.D. *Engineering Calculations on a Computer*. Ed. by V.A. Troitskiy. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 288 p.
4. Kuz'michev D.A., Radkevich I.A., Smirnov A.D. *Automation of Experimental Studies: Educational Textbook*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 392 p.
5. Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Terms of Basic, Fortran and Pascal*. Tomsk, MP "RASKO" Publ., 1991. 272 p.
6. Nikonov V.O., Posmetev V.I., Juravlev R.V. Analysis of Constructive Features of Tractor-Clutch Devices of Cargo Vehicles with Trailers. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2018, vol. 4, no. 4(26), pp. 13–24.
7. Nikonov V.O., Posmetev V.I., Posmetev V.V. Estimation of the Efficiency of the Forest Vehicle with Energy Energy in the Wheel Hydromotors on the Basis of Computer Modeling. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [The world of transport and technological machinery], 2018, no. 3(62), pp. 46–54.
8. Nikonov V.O., Posmetev V.I., Yakovlev K.A. Hydraulic Energy Recovery in a Tractor-Clutch Device of Timber Truck with a Trailer. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, no. 4, pp. 230–239. DOI: 10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845
9. Novikov E.A., Knaub L.V. *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations and Dynamic Systems: Educational Textbook*. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2010. 112 p.
10. Posmetev V.I., Nikonov V.O. Substantiation of the Scheme of a Forest Vehicle Equipped with the Perspective Design of the Wheel Module with a Hydraulic Drive. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [The world of transport and technological machinery], 2017, no. 3(58), pp. 27–34.
11. Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Numerical Methods: Educational Textbook for Universities*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 432 p.
12. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *System Modeling: Textbook for Universities*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998. 319 p.
13. Abu-Hamdeh N.H., Al-Jalil H.F. Computer Simulation of Stability and Control of Tractor-Trailed Implement Combinations under Different Operating Conditions. *Bragantia, Campinas*, 2004, vol. 63, no. 1, pp. 149–162.
14. Dindorf R., Woś P. Development of Energy Efficient Hydrostatic Drives with Energy Recovery. *Mechanik*, 2017, no. 8-9, pp. 776–782. DOI: 10.17814/mechanik.2017.8-9.114
15. Fang Z., Guo X., Xu L., Zhang H. Experimental Study of Damping and Energy Regeneration Characteristics of a Hydraulic Electromagnetic Shock Absorber. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, vol. 2013, art. 943528. DOI: 10.1155/2013/943528

16. Heikkilä M., Linjama M. Hydraulic Energy Recovery in Displacement Controlled Digital Hydraulic System. *Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping, Sweden, June 3–5, 2013*. Linköping, Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2013, pp. 1–7.

17. Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. Investigation of the Energy-Saving Hydraulic Drive of a Multifunctional Automobile with a Subsystem of Accumulation of Compressed Air Energy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 441, art. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012041

18. Wang R., Jiang Q., Ye Q., Chen L., Meng X. Characteristics Analysis and Experiment of Hydraulic Interconnected Energy-Regenerative Suspension. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, vol. 48(8), pp. 350–357. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.042

19. Zhang H., Guo X., Xu L., Hu S., Fang Z. Parameters Analysis of Hydraulic-Electrical Energy Regenerative Absorber on Suspension Performance. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 2014, art. 836502. DOI: 10.1155/2014/836502

20. Zou J., Guo X., Xu L., Abdelkareem M.A.A., Gong B., Zhang J., Tan G. Simulation Research of a Hydraulic Interconnected Suspension Based on a Hydraulic Energy Regenerative Shock Absorber. *SAE Technical Paper 2018-01-0582*, 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0582

Received on March 01, 2019



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

UDC 674.817-14

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.124

THE EFFECT OF SEASONAL TEMPERATURE VARIATIONS ON THE PRODUCTION EFFICIENCY OF MEDIUM DENSITY FIBERBOARD (CASE STUDY OF ARIAN SINA COMPANY)

V. Moazami, Master of Wood Composite Products, Responsible for Research and Development; ORCID: [0000-0002-3879-3785](https://orcid.org/0000-0002-3879-3785)

M. Khodadadi, Expert in Power Engineering, Managing Director; ORCID: [0000-0002-3453-6386](https://orcid.org/0000-0002-3453-6386)

F. Afsooni, Master of Management, Managing Director; ORCID: [0000-0002-0999-094X](https://orcid.org/0000-0002-0999-094X)

H. Hatefnia, Ph.D., Wood and Paper Science, Expert in Company Production Process; ORCID: [0000-0001-6583-4776](https://orcid.org/0000-0001-6583-4776)

Arian Sina Company, 18 km Farah Abad Road, Sari City, Mazandaran Province, 4847191376, Iran; e-mail: Moazami_vahid@yahoo.com

Production efficiency should be uniformed throughout the whole year in order to prevent material, energy, finance, and time losses. Due to the internal bond strength loss during the cold season and, as a result, the reduction of production efficiency, this study investigated the effect of different seasons on the efficiency of medium density fiberboard (MDF) production at Arian Sina Company. For these purposes 200 fiberboards were produced by the Company in different seasons of 2017. The following parameters have been adopted for the fiberboards production: pressure time – 200 s; amount of glue – 10 % of dry fiber, humidity of the fiber mat – 7 %; hardener – 0.8 % of dry glue weight. The species composition consisted of 70 % of poplar species and 30 % of river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*). The results showed that decreasing of temperature in cold seasons and even the difference in day and night temperatures reduces the internal bond strength and thus the speed of production line due to the need for more pressure time. The results obtained from the X-ray analysis of the vertical density profiles showed that the core layer density of the mat, when its temperature is 18 °C and 40 °C, is 561 and 634 kg/m³, respectively.

For citation: Moazami V., Khodadadi M., Afsooni F., Hatefnia H. The Effect of Seasonal Temperature Variations on the Production Efficiency of Medium Density Fiberboard (Case Study of Arian Sina Company). *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 124–132. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.124

Acknowledgments: We thank Mr. Ali Saeedi, chairman of the board of the Arian Saeed Industrial Group, for financial and spiritual support.

Keywords: mat temperature, production efficiency, medium density fiberboard, vertical density profile.

Introduction

In recent years, the use of composite wood panels has been expanded considerably. The main reasons for this are the variety of design and the increased costs of timber cutting because of the increase in the price of logs and labor costs. These costs have fallen dramatically in the continuous production process that converts

wood into wood particles or fibers. Medium Density Fiberboard is one of the products of wooden composites; its production, import and consumption have been welcomed in Iran in recent years. Arian Saeed Industrial Group has a significant share of Iran's domestic markets with its four active lines of medium density fiberboard production and two lines of the production with current capacity of about 1 mln m³. The production efficiency is affected by the production variables, including production line machines, especially press (and pre-press), raw materials, humidity of fiber mat. However, one of the key factors in improving the production efficiency, that is not considered, is the fiber temperature. Wood chips are converted into fibers and passed through the blow line to be mixed with glue. Then the fibers enter the dryer where the humidity of the fiber reaches 7–10 %. Also, the fibers temperature at the end of the dryer reaches about 42 °C. When the fibers reach the forming machine, the fiber temperature is the same with the temperature of production site. In winter, the temperature of the fiber decreases due to cold weather, which reduces the production efficiency. The initial temperature of the mat affects the production efficiency more than any other factor in the fiberboard industry based on the role of temperature in acceleration of reaction, reduction of reaction time and uniforming the distribution of acetyl groups on cell wall polymers. The final structure of the board is formed due to the heat transfer and pressure in hot press [2]. The enormous potential of fiberboard consumption requires the study of production efficiency in different seasons. Thus, the main research goal for the Arian Sina Company is to study the difference in temperatures of mat during different seasons, and even the difference in day and night temperatures, in order to maintain the production efficiency in cold seasons according to the results of effective solutions.

Materials and Methods

The Arian Sina Company had produced 200 raw fiberboards in different seasons of 2017. They had the following production conditions and parameters: pressure time of 200 s, glue – 10 % of dry fiber, humidity of fiber mat – 7 %, hardener – 0.8 % of dry glue weight. The species composition included 70 % of poplar species and 30 % of *Eucalyptus camaldulensis*.

The ambient temperature was obtained from the measurements of the American Meteorological Society in 2017 (Fig. 1). The temperature of fiber mat was obtained by the infrared thermometer Testo 830-T2 with the ability to measure temperatures between –50 to 500 °C (from –58 to 932 °F); temperature resolution sensor of –0.1 °C (–0.1 °F); temperature sensor accuracy was ±0.5 °C; temperature measurement rate was 1.75 s. Testo 925 thermocouple with the range of temperature sensor measurement from 50 to 1000 °C (58 to 1832 °F) and accuracy of ±1 unit was used in order to analyze the core layer temperature in medium density boards (Fig. 2).

Test samples were tested with a mechanical test machine in the Arian Saeed Laboratory in order to determine the Tensile Strength Perpendicular to Plane of the Board (internal bond strength) in accordance with the EN 622-5 and EN-319 standards [3, 4].

To measure the vertical density distributions, all panels were scanned using the X-ray density scanning system (with SicoScan model). Then ANOVA was used to determine the significance of board production with the same production conditions compared to different mats in different seasons.

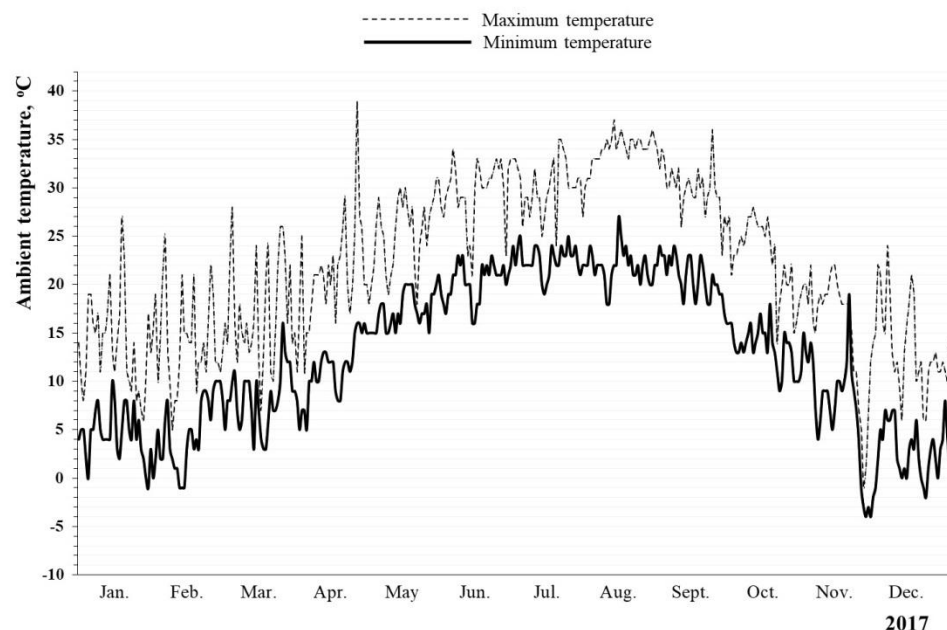


Fig. 1. Minimum and maximum ambient temperature in 2017, Sari, Iran



Fig. 2. Testo 830-T2 infrared thermometer and Testo 925 thermocouple

Results and Discussion

As seen in Table 1 and Fig. 3, when the fiber mat has temperatures of 18, 20, 24, 26, 30, 32, 34, 36, 38 and 40 °C, it takes 200, 185, 180, 170, 140, 130, 110, 108, 105 and 100 s, respectively, to reach the fiber mat temperature to 100 °C in the core layer. By increasing the temperature of the fiber mat from 18 to 40 °C, the time for reaching the core layer temperature 100 °C is significant. When the fiber mat temperature is 18 °C, the temperature of the core layer reaches 100 °C after 200 s; whereas the fiber mat temperature is 40 °C, the temperature of the core layer reaches 100 °C after 100 s. In other words when the temperature of the fiber mat is 40 °C, the polymerization of glue in the core layer is much faster than the temperature of fiber mat reaches 18 °C, so it saves 100 s of the pressure time. The

temperature of the core layer of the fiber mat during pressing depends on the heat transfer in the mat from surface layers to core layers and the heat released in the resin curing process [1]. So, with the increase of the fiber mat temperature, heat transfer to the core layer begins at a higher temperature and the temperature of core layer rises faster.

Table 1

Effect of mat temperature on production efficiency and internal bond

Sample no.	Mat temperature, °C	Reaching the temperature of the core layer at 100 °C	IB, N/mm ²	Core layer density, kg/m ³
1	18	200	0.46	561
2	20	185	0.54	578
3	24	180	0.58	581
4	26	170	0.64	589
5	30	140	0.66	597
6	32	130	0.69	601
7	34	110	0.74	615
8	36	108	0.79	621
9	38	105	0.84	625
10	40	100	0.91	634

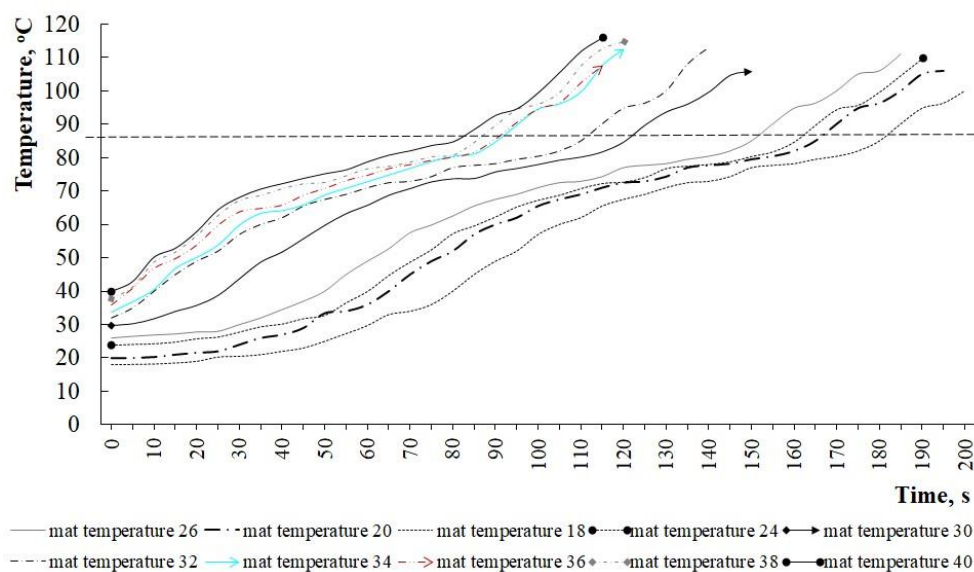


Fig. 3. The effect of the mat temperature on the core layer temperature

The results obtained from the X-ray Vertical Density Profile are shown in Table 1 and Fig. 4. The core layer has the density from 561 to 634 kg/m³, according to the results of analysis of boards manufactured at different temperatures. As well as mats with temperatures of 18, 20, 24, 26, 30, 32, 34, 36, 38 and 40 °C have the core layer density of 561, 578, 581, 589, 597, 601, 615, 621, 625 and 634 kg/m³, respectively. The results showed that there is a strong correlation between the mat density of the primary temperature and the internal bonds of the boards. Vertical density profile is an important parameter affecting the medium density fiberboard resistance [9], which is influenced by production variables, including production

line machines, especially presses (and pre-presses), as well as pressing schedules and mat shaping. The vertical density profiles of the fiberboard are mainly influenced by three factors: step-closing schedule for fiberboard pressing, heat and moisture distribution in mat, and interaction of these factors during hot pressing [5]. The closing time of the press is the time from the moment of contact with the top plate of the press with the surface of the mat until the fiberboard reaches the final thickness. The high temperature of the mat causes the temperature to rise faster to the core layer of the board and polymerization will occur more quickly and in constant time, it improves the internal bond strength of fiberboard. In this case, the density of the core layer is increased too; the warmth of the mat increases the flexibility of the mat. As the pressing is slowly, there is enough time for water steam to penetrate from the surface layers to the core layers and cause more compression of the fiber in the core layer. As a result, the density of the core layer increases and the density of the boards becomes more uniform. According to [6] and [10], the moisture and dimensions of fibers or particles have the greatest impact on achieving the final thickness. However, according to the results, it was found that the initial temperature of the mat, moisture and dimensions of fiber or particles have a significant effect on the vertical density profile and internal bond strength.

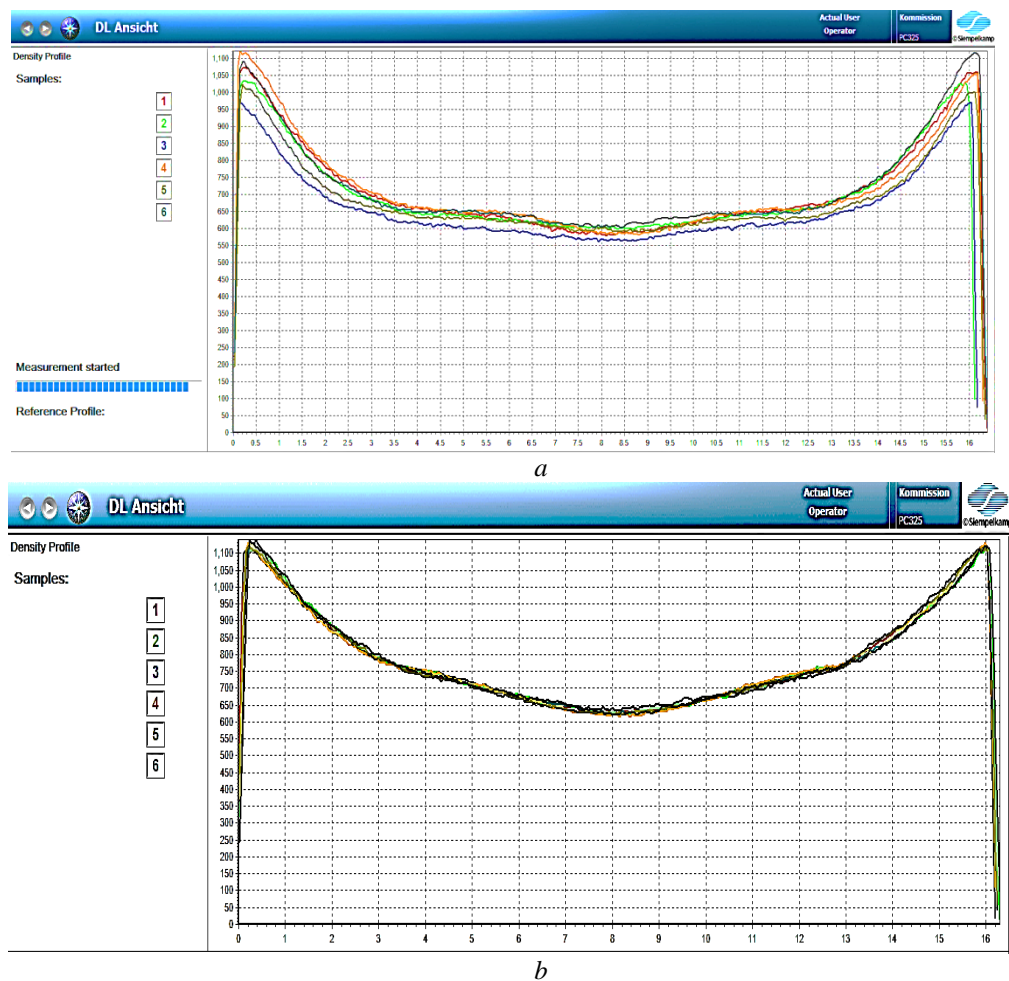


Fig. 4. Vertical Density Profile (*a* – in cold season; *b* – in warm season)

ANOVA analysis of the effect of the mat temperature on internal bond strength and the mean and Duncan grouping are also presented in Table 2 and Fig 5. The results showed that the effect of the mat temperature on internal bond was considerable at 95 % level. As seen in Table 1 and Fig. 5, internal bond strength in boards made with mat temperatures of 18, 20, 24, 26, 30, 32, 34, 36, 38 and 40 °C was 0.46, 0.54, 0.58, 0.64, 0.66, 0.69, 0.74, 0.79, 0.84 and 0.91 N/mm². The internal bond of boards manufactured with the mat temperature of 40 °C has increased by 95 % in comparison with boards manufactured with the mat temperature of 18 °C. Heat transfer inside the core layer depends on to the steam of the surface layers and contact with hot press plates [1]. Thus, the higher the temperature of mat contacting the press plate, the faster the surface temperature reaches the necessary value for water evaporation. As a result, the heat transfer by water steam from surface layers to middle layers is faster, which improves the density of the core layer of the board and, in meanwhile, increases the internal bond.

Table 2

ANOVA analysis of effect of mat temperature on internal bond strength

Effect	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.000	9	0.000	2195.000	0.000
Within Groups	0.033	190	0.000		0.000
Total	3.000	199	0.000		0.000

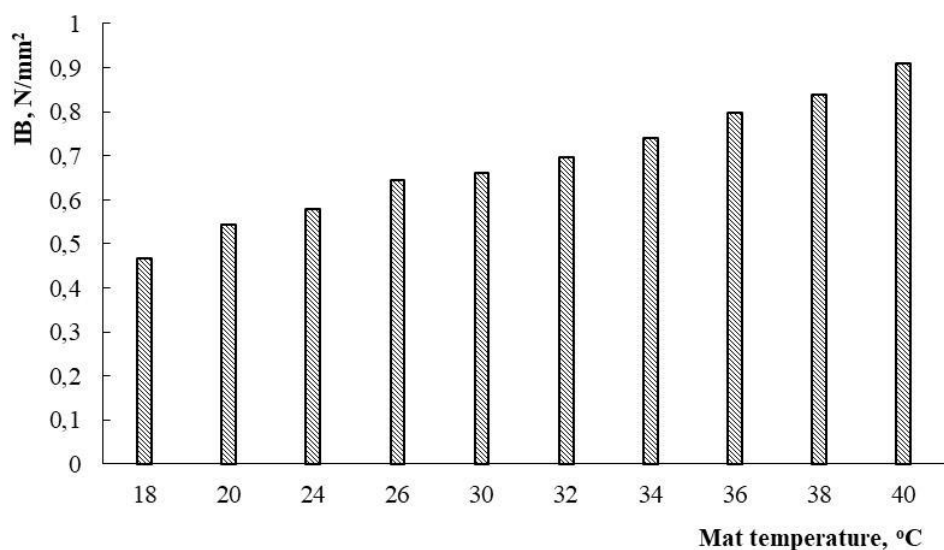


Fig. 5. Effect of mat temperature on internal bond

According to the meteorological data, the weather temperature decreases in winter. The reduction of air temperature directly affects the temperature of the fiber. So that the temperature of the fiber, which is 42 °C after the dryer, is reduced to 23 °C (Fig. 2).

In the production lines of MDF, the fibers transfer path is usually isolated from the blow line to the fibers bunker, but when the fibers were placed on the forming table, due to the contact with surrounding cold air, its temperature is reduced and decreasing the temperature of the fiber causes the decrease of internal bond strength. Therefore, in order to prevent the loss of internal bond strength, the line speed should be reduced. Thus, the efficiency of production is reduced.

It took us one year to complete the research; after getting the results we started to look for the right solution of the problem. In order to heat the mat you can use infrared preheater and microwave preheater [7]. Suchsland and Woodson [8] showed in their research that the use of radio frequency (RF) and high frequency (HF) presses have many advantages. So, from the production point of view, the pressure time reduction should be accomplished using the RF and HF rays. Thus, the sides of the board become stronger and the density is improved. Although, the primary investment cost and the cost of producing these types of presses are higher than ordinary hot presses [8]. In this press, RF electrodes that are made of copper are placed between the press plates and the fiber mat. By 2018, the Microwave Preheater system was not well adopted due to the high price, high energy cost (600 kW) and various regional laws and regulations. The infrared rays are further installed in Mende presses near the steel belt and between the rollers. But it can also be used in infrared at multi-daylight presses and ContiWave systems in production line. Before the pre-press, especially for the production of high-thickness boards, one or more hot water pipes can be heated to the core layer. Also, using saturated steam or hot dry air is another way to increase the temperature of the mat [11]. One of the most efficient possible is maintaining the temperature of the mat to install plastic curtains and roller doors in cold seasons.

Conclusions

Due to the internal bond loss in cold seasons and the consequent reduction in production efficiency, this study investigated the effect of different seasons on the efficiency of medium density fiberboard production in the industry. After measuring the mat temperature and internal bond strength during one year, the following results were obtained:

- In different seasons, the mat temperature is influenced by the temperature of the environment; in winter even the difference in day and night temperature (during one day), strongly reduces the mat temperature.

The temperature of the fiber mat has a significant effect on the time when the core layer of mat temperature reaches 100 °C. In other words, the polymerization time of the core layer is much lower when the mat temperature is 40 °C and this is better result in comparison with the mat temperature of 18 °C.

The results showed that there is a strong correlation between the initial mat temperature, the density profile and the internal bond strength of the boards. Thus, the increase in the mat temperature will lead to the increase of the core density and improvement of the internal bond strength.

- According to the research there are several ways to heat the mat in the industry. One of the suitable methods can be selected and used in the production process according to the type of production line and types of presses (multi-daylight, ContiWave and Mende presses).

- If you use any method to increase the mat temperature, you must isolate the production site.

REFERENCES

1. Cai Z., Muehl J.H., Winandy J.E. Effects of Panel Density and Mat Moisture Content on Processing Medium Density Fiberboard. *Forest Products Journal*, 2006, vol. 56, no. 10, pp. 20–25.
2. Doosthoseini K. *Textbook of Wood Compressed Panels Production Technology and Application*. 2nd edition. Tehran University Press, 2007. 708 p.
3. *European Standard EN 319. "Wood Based Panels, Determination of Tensile Strength Perpendicular to Plane of the Board."* Brussell, European Standardization Committee, 1996.
4. *European Standard EN 622-5. "Fiberboard-Specifications-Part 5. Requirements for Dry Process Board (MDF), TES."* Brussell, European Standardization Committee, 1998.
5. Jahanilomer Z., Farrokhpayam S.R. Vertical Density Profile, a Key Parameter for Evaluating of Particleboard Quality. *Iranian Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 2015, vol. 24(4), pp. 1–21.
6. Moazami V., Afsoni F., Dadashi S., Dadashi E. Evaluation the Mechanical Strength of Medium Density Fiber Board of Domestic Production and Imported with Help of Vertical Density Profile, Infrared Rays, Spectroscopy and Imagine Analyses (Case Study of Arian Sina Co). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2017, vol. 32, iss. 1, pp. 145–156. DOI: 10.22092/ijwpr.2017.107595
7. Pereira C.M.C., Blanchard C., Carvalho L.M.H., Costa C.A.V. High Frequency Heating of Medium Density Fiberboard (MDF): Theory and Experiment. *Chemical Engineering Science*, 2004, vol. 59, iss. 4, pp. 735–745. DOI: 10.1016/j.ces.2003.09.038
8. Suchsland O., Woodson G.E. Effect of Press Cycle Variables on Density Gradient of Medium Density Fiberboard. *Management of Lodgepole Pine Ecosystems; Symposium Proceedings*, 1975, pp. 375–396.
9. Winistorfer P.M., Moschler W.W.Jr., Wang S., DePaula E., Bledsoe B.L. Fundamentals of Vertical Density Profile Formation in Wood Composites. Part I. *In-Situ* Density Measurement of the Consolidation Process. *Wood and Fiber Science*, 2000, vol. 32(2), pp. 209–219.
10. Wong E.-D., Zhang M., Wang Q., Kawai S. Formation of the Density Profile and Its Effects on the Properties of Particleboard. *Wood Science and Technology*, 1999, vol. 33, iss. 4, pp. 327–340.
11. *Wood-Based Panels – An Introduction for Specialists*. Ed. by H. Thoemen, M. Irle, M. Sernek. London, Brunel University Press, 2010. 283 p.

Received on April 22, 2019

УДК 674.817-14

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.124

Влияние сезонных температурных изменений на эффективность производства древесноволокнистых плит средней плотности (на примере компании «Ариан Сина»)

Моаземи В., магистр в области композитных древесных материалов, ответственный по вопросам исследований и развития компании; ORCID: [0000-0002-3879-3785](https://orcid.org/0000-0002-3879-3785)

Ходадади М., эксперт по энергетике, директор; ORCID: [0000-0002-3453-6386](https://orcid.org/0000-0002-3453-6386)

Афсуни Ф., магистр менеджмента, директор; ORCID: [0000-0002-0999-094X](https://orcid.org/0000-0002-0999-094X)

Хатефния Х., д-р наук в области деревообработки и производства бумаги, эксперт по технологическим процессам; ORCID: [0000-0001-6583-4776](https://orcid.org/0000-0001-6583-4776)

Компания «Ариан Сина», 18-й км., ул. Фарах Абад, г. Сари, провинция Мазендеран, 4847191376, Иран; e-mail: Moazami_vahid@yahoo.com

В целях предотвращения потерь материалов, энергии, финансовых средств и времени эффективность производства должна быть одинаковой в течение всего года. В связи с потерей материалами внутренней адгезионной прочности в холодное время года и, как следствие, ввиду снижения эффективности производства, в этом исследовании изучалось влияние различных сезонов на эффективность производства древесноволокнистых плит средней плотности на примере компании «Ариан Сина». Для этих целей в течение 2017 г. компанией были изготовлены 200 древесноволокнистых плит. При производстве плит были приняты следующие параметры: время выдержки под давлением – 200 с, количество использованного клея – 10 % от массы сухого волокна, влажность древесного волокна – 7 %, содержание отвердителя – 0,8 % от массы сухого клея. Породный состав плит: сосна – 70 % и эвкалипт – 30 %. Результаты показали, что снижение температуры в холодное время года и даже разница в температуре днем и ночью в течение суток уменьшает внутреннюю адгезионную прочность и, как следствие, сокращает скорость производственной линии из-за необходимости большего времени для достижения требуемой температуры в среднем слое волокна. Результаты, полученные в ходе рентгенографического анализа профилей вертикальной плотности, показали, что при температуре волокна в пределах от 18 до 40 °С в среднем слое плотность изменяется от 561 до 634 кг/м³ соответственно.

Для цитирования: Моаземи В., Хоодади М., Афсуни Ф., Хатефния Х. Влияние сезонных температурных изменений на эффективность производства древесноволокнистых плит средней плотности (на примере компании «Ариан Сина»). // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 124–132. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.124

Благодарность: Авторы статьи выражают благодарность господину Али Саеди, председателю правления компании «Ариан Сина», за финансовую и моральную поддержку в ходе исследования.

Ключевые слова: температура древесноволокнистой плиты, эффективность производства, древесноволокнистая плита средней плотности, профиль вертикальной плотности.

Поступила 22.04.19

УДК 691.113

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.133

ПРОИЗВОДСТВО ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ИЗ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ С ЯДРОВОЙ ГНИЛЬЮ

А.С. Торопов¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: 0000-0003-4414-2505

В.Е. Бызов², канд. техн. наук, доц.; ORCID: 0000-0002-2078-5226

С.А. Торопов¹, соискатель

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

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: marana@inbox.ru

Пиломатериалы хвойных пород широко применяются в малоэтажном деревянном домостроении. Однако в последнее время качество круглых лесоматериалов для изготовления пиломатериалов ухудшается. Часто встречаются лесоматериалы, в которых присутствует ядровая гниль. Как правило, удаление гнили происходит на этапе заготовки круглых лесоматериалов. При этом вместе с древесиной, пораженной гнилью, в процессе раскря и получения пилопродукции удаляется и здоровая заболонная часть, а большое количество качественной древесины остается в лесу. Раскря лесоматериалов с гнилью снижает выход пилопродукции для строительства, так как ее наличие в строительных конструкциях не допускается. Предлагается способ раскря круглых лесоматериалов с ядровой сердцевинной гнилью в целях получения двугавровых балок из цельной древесины. Для качественного продольного раскря круглых лесоматериалов с ядровой гнилью необходимо знать форму и размеры гнили. Взаимосвязь размеров поперечного сечения круглых лесоматериалов и ядровой гнили по длине сортиментов достаточно точно описывается уравнениями соотносительного (аллометрического) роста. С учетом этих зависимостей разработаны схемы раскря круглых лесоматериалов с ядровой гнилью. Раскря производили по брусоторазвальной схеме: вначале получали два четырехкантных бруса с ядровой гнилью в центральной части одной из пластей поперечного сечения, затем брусья продольно разделяли на две части, из которых путем фрезерования удаляли гниль. В результате условного раскря круглых лесоматериалов из древесины сосны получали уголкового элементы для изготовления двугавровых балок. Проведены исследования двугавровой балки, изготовленной из уголкового элементов. Расчетные напряжения при изгибе балки не превышают допустимых значений. Рассчитан полезный выход таких элементов из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью. Установлено, что способ изготовления элементов строительных конструкций из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью позволит использовать их в малоэтажном деревянном домостроении. Это расширит ресурсы древесины для строительства.

Для цитирования: Торопов А.С., Бызов В.Е., Торопов С.А. Производство пиломатериалов для строительства из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 133–145. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.133

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, сердцевинная ядровая гниль, уравнения аллометрического роста, двугавровая балка из цельной древесины, уголкового элементы, полезный выход пилопродукции для строительных конструкций.

Введение

В малоэтажном деревянном домостроении для изготовления элементов несущих конструкций применяют пиломатериалы хвойных пород. Согласно требованиям нормативно-технической документации, присутствие гнили в пиломатериалах не допускается. В то же время качество круглых лесоматериалов хвойных пород постоянно ухудшается: до 85 % сортиментов из этой древесины попадают в разряд низкокачественных из-за наличия напенной гнили, которая поражает ядровую древесину и выходит на один или оба торца сортимента. Такие лесоматериалы используют для производства технологической щепы или дров.

В круглых лесоматериалах, пораженных напенной ядровой гнилью, вокруг зоны поражения находится заболонная древесина, обладающая высокими прочностными характеристиками. Она используется нерационально. В условиях увеличения объемов малоэтажного деревянного домостроения появляется необходимость привлечения дополнительных объемов древесины высокой прочности. Для этого требуется разработка новых технологических процессов изготовления элементов строительных конструкций из древесины, пораженной сердцевинной ядровой гнилью.

Цель исследования – разработка способа получения пиломатериалов для изготовления строительных конструкций из круглых лесоматериалов с сердцевинной ядровой гнилью.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования решались следующие задачи.

1. Обоснование целесообразности изготовления из круглых лесоматериалов с сердцевинной ядровой гнилью двутавровых балок для применения в малоэтажном деревянном домостроении.

2. Определение взаимосвязи диаметра круглых лесоматериалов с диаметром сердцевинной ядровой гнили по длине сортиментов.

3. Проведение условного раскроя круглых лесоматериалов, пораженных сердцевинной ядровой гнилью, в целях получения элементов для изготовления двутавровой балки из цельной древесины.

4. Проверка прочностных характеристик двутавровых балок из цельных элементов в процессе эксплуатации.

5. Расчет выхода пиломатериалов для изготовления элементов двутавровых балок из цельной древесины.

В малоэтажном деревянном домостроении применяются различные несущие конструкции. Наиболее востребованными являются двутавровые балки из древесины. Они используются для устройства перекрытий, стропильной системы, обвязки по фундаменту и при монтаже полов. Форма поперечного сечения балки обеспечивает хорошую работу конструкции на изгиб в условиях эксплуатации. По рабочим характеристикам деревянные балки не уступают металлическим и железобетонным конструкциям, но имеют меньший вес и выдерживают расчетные нагрузки как на малых, так и на больших (до 12 м) пролетах. Однако современный опыт строительства показывает целесообразность применения двутавровых балок для пролетов от 2 до 6 м [1]. Двутавровые балки обладают малым весом, большим запасом прочности, легкостью

транспортировки и монтажа, экономичностью. Небольшая масса (около 0,005 т/пог. м), позволяет вести работы без применения тяжелой техники. Высокая скорость монтажа и простота сборки повышают технологичность возведения зданий и сооружений. После обработки специальными составами древесина балок отличается необходимой огнестойкостью, противодействием загниванию и поражению насекомыми. Большая потребность в таком материале имеется в сейсмически опасных районах. Экологические свойства балок из древесины не подвергаются сомнению. Их розничная цена невысока. Например, цена для балки высотой 200 мм и размерами поперечного сечения поясов 42×85 мм составляет около 300 р./пог. м. В балках, сделанных по канадской технологии, для изготовления полок применяют калиброванный брус из клееной древесины, а для стен домов используют ориентированные стружечные плиты OSB-3 и OSB-4. В российских условиях чаще всего стенки изготавливают из фанеры, реже – из однонаправленного слоеного клееного шпона (LVL).

Исследованиям особенностей двутавровых балок посвящено большое количество работ. В частности, в публикации [5] приведены результаты испытаний двутавровой балки со стенкой из OSB. В работе [10] рассматриваются прочность и деформативность составных балок со стенкой из ориентированной стружечной плиты. В исследованиях [3, 4, 6, 12, 14, 16–23] изучались вопросы влияния анизотропии свойств древесины и различных способов крепления и усиления на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Проблемам получения пиломатериалов из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью также посвящено множество исследований. В частности, под руководством А.С. Торопова разработан способ переработки лесоматериалов с гнилью, который предусматривает раскрой сортиментов развальным способом и дальнейшую обработку пиломатериалов, содержащих гниль. Как правило, ядровая напенная гниль в сортиментах близка по форме к конусу или усеченному конусу. Поэтому после удаления гнили остаются участки здоровой древесины, имеющие треугольную форму. В дальнейшем эти пиломатериалы без гнили сушат и подвергают обработке. Их разворачивают относительно друг друга на 180° в горизонтальной плоскости, склеивают между собой и получают пиломатериалы прямоугольной формы, которые можно применять для изготовления строительных конструкций.

Нами предложен принципиально новый способ получения элементов строительных конструкций из круглых лесоматериалов с ядровой гнилью. Раскрой производят по брусовой схеме. На первом проходе получают двухкантный брус с сердцевинной гнилью и боковые необрезные тонкие пиломатериалы, на втором проходе – 2 бруска с сердцевинной гнилью, а также боковые необрезные пиломатериалы. Затем бруски подвергают камерной сушке мягкими режимами и доводят их влажность до (14 ± 2) %. Посредством фрезерования удаляют гниль, после фрезерования бруски имеют уголкового профиля. Бруски сортируют таким образом, чтобы качество древесины оценивалось 2-м сортом по ГОСТ 8486–86 [2], что примерно соответствует классу прочности С24 по европейскому стандарту EN 338:2003 «Древесина конструкционная. Классы прочности» [15]. Бруски склеивают так, чтобы получить балку двутаврового профиля. Приоритет на оба способа зафиксирован патентами РФ на изобретения.

Рассмотрим способ получения элементов двутавровых балок из круглых лесоматериалов с ядровой напенной гнилью. Для того, чтобы наиболее рационально произвести раскрой круглых лесоматериалов в целях получения максимального объемного выхода элементов для изготовления балок, необходимо знать характер распространения гнили по длине лесоматериалов. Поэтому проанализируем основные принципы формирования ствола дерева и развития в нем сердцевинной гнили. В ходе роста дерева происходит одновременное развитие различных его органов. Установлено, что при одновременном росте двух или нескольких органов изменение скоростей их роста происходит синхронно, а отношение скоростей роста остается примерно постоянной величиной. Скорости роста коррелируют между собой, что является биологической сущностью соотносительного (аллометрического) роста [10]. Связь является нелинейной и обычно хорошо описывается аллометрической функцией:

$$d_r = d_{r0} + al_r^b, \quad (1)$$

где d_r – диаметр ядровой гнили в произвольном сечении, м; d_{r0} – диаметр гнили в комле круглого лесоматериала, м; l_r – длина от комля до расположения сердцевинной гнили, м; a, b – константы начального состояния и равновесия соответственно.

Согласно исследованиям [11] распределение гнили по длине ствола в еловых лесоматериалах имеет следующий вид:

$$d_r = 0,44 - 0,0576l_r^{1,0346}. \quad (2)$$

Применим эту зависимость для исследования способа получения элементов двутавровых балок из круглых лесоматериалов с ядровой напенной гнилью. Для этого проведем условный раскрой круглых лесоматериалов с сердцевинной гнилью из древесины ели диаметром в вершине 30 см и длиной 6,5 м. Сбег лесоматериалов примем равным 0,8. Тогда диаметр сортимента в комле составит 35,2 см. Максимальный теоретический выход пиломатериалов получается при выпилке на первом проходе двухкантного бруса толщиной, равной 0,707 вершинного диаметра. На втором проходе суммарная ширина центральных лесоматериалов также должна быть близка к данному размеру. Исходя из этих положений, при раскросе сортиментов диаметром в вершине 30 см на первом проходе получается двухкантный брус толщиной 217 мм с шириной пласти 108 мм, гниль на комлевой части бруса имеет диаметр 156 мм. Кроме того, получают боковые необрезные доски толщиной 25 мм и длиной, равной или менее длины сортимента (рис. 1). Ширину пропила принимаем равной 3 мм.

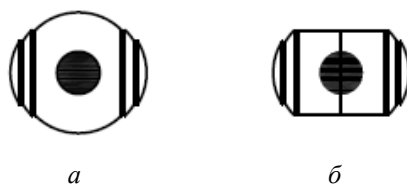


Рис. 1. Схема раскроя круглых лесоматериалов: *a* – выпилка двухкантного бруса и боковых необрезных пиломатериалов; *б* – распиловка двухкантного бруса

Fig. 1. Round timber cutting plan: *a* – sawing out of two-edged cant and unedged side lumber; *б* – sawing up of two-edged cant

На втором проходе из центральной части двухкантного бруса имеем 2 бруска поперечного сечения 102×217 мм. Из периферийной части двухкантного бруса получаем боковые необрезные доски толщиной 25 мм и длиной, равной длине сортимента или менее. Бруски укладывают в сушильные штабеля и сушат до влажности (14 ± 2) %. Затем их фрезеруют и продольно раскраивают на 2 бруска углового профиля 98×103 мм с толщиной стенок 21 и 27 мм (рис. 2).

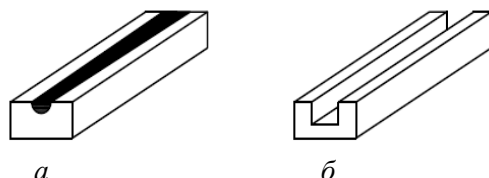


Рис. 2. Фрезерование и распиловка брусков: *a* – бруски с ядровой гнилью; *б* – элементы углового профиля

Fig. 2. Milling and sawing up of bars: *a* – bar with heart rot; *б* – angle bars

Бруски попарно склеивают, полученные в виде швеллеров заготовки также склеивают между собой для изготовления двутавровой балки (рис. 3).

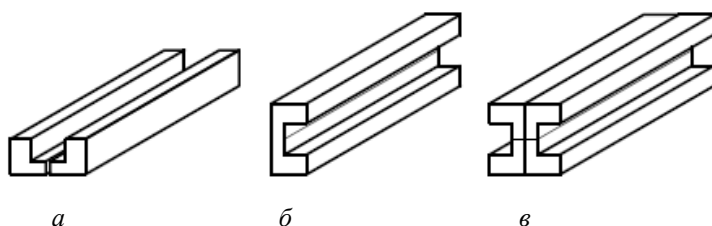


Рис. 3. Схема склеивания двутавровой балки: *a* – элементы углового профиля; *б* – угловые элементы, склеенные в швеллер; *в* – склеенные между собой швеллеры

Fig. 3. I-beam bonding: *a* – angle bars; *б* – angle bars glued together in channel; *в* – channels glued together

Склеивание производят двухкомпонентным полимеризоцианатным клеем: эмульсия клея марки AUS-100E, отвердитель марки АУН-5Е. Клей и отвердитель смешивают в пропорции 100:15. Время прессования – 20 мин, давление прессования – 1 Н/мм^2 .

Балка имеет высоту 207 мм, ширину 196 мм, толщину поясов 27 мм, толщину стенки 43 мм (рис. 4).

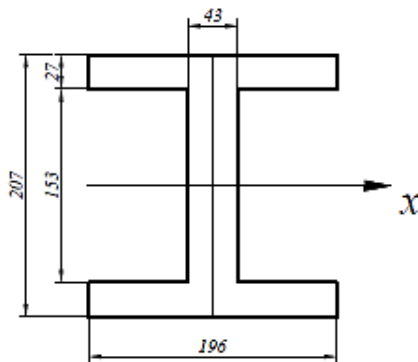


Рис. 4. Поперечное сечение балки
Fig. 4. Beam cross section

Расчетная схема для определения прочности и прогибов балки представляет собой статически-определимую шарнирно опертую балку, нагруженную равномерно-распределенной нагрузкой. Расчетный пролет конструкции принят 6 м. Под действием расчетной нагрузки 1,5 кН/м балка испытывает напряженно-деформированное состояние поперечного изгиба. Нормативная нагрузка составляет 1,25 кН/м. Прочностные и деформативные расчетные характеристики древесины, принятые согласно СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» [9], приведены в табл. 1, коэффициенты для определения расчетных сопротивлений – в табл. 2.

Таблица 1

**Характеристика древесины 2-го сорта (класса С24)
по нормативно-технической документации**

Показатель	Обозначение	Значение
Расчетное сопротивление, Мпа: изгибу	$R_{и}^A$	22,5
скалыванию вдоль волокон древесины	$R_{ск}^A$	2,4
Средний модуль упругости при изгибе для расчета по прогибу, ГПа	$E_{ср}$	11,0

Таблица 2

Коэффициенты для определения расчетных сопротивлений

Коэффициент	Обозначение	Значение
Длительной прочности древесины	$m_{дл}$	0,66
Длительной прочности древесины для упругих характеристик	$m_{длЕ}$	1,0
Учитывающий породу древесины	$m_{п}$	1,0
Учитывающий условия эксплуатации конструкций	$m_{в}$	1,0
Учитывающий температуру воздуха, при которой эксплуатируется конструкция	$m_{т}$	1,0

Результаты исследования и их обсуждение

Проверена прочность балки по нормальным напряжениям, возникающим в ней:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_{и}^p, \quad (3)$$

где M – максимальный изгибающий момент, кН·м; W – момент сопротивления поперечного сечения балки, м³; $R_{и}^p$ – допускаемое расчетное сопротивление при изгибе древесины 2-го сорта.

Максимальный изгибающий момент (M , кН·м):

$$M = \frac{q^p l^2}{8}, \quad (4)$$

где q^p – расчетная нагрузка, кН/м; l – пролет балки, м.

Допускаемое расчетное сопротивление при изгибе

$$R^p = R^A m_{\text{дл}} \prod m_i, \quad (5)$$

где R^A – расчетное сопротивление древесины при изгибе, МПа (табл. 1); $m_{\text{дл}}$ – коэффициент длительной прочности (табл. 2); $\prod m_i$ – произведение коэффициентов условий работы: $m_{\text{п}}$, $m_{\text{в}}$, $m_{\text{т}}$ (табл. 2).

Результаты расчетов нормальных напряжений, возникающих в балке при изгибе, и допускаемого расчетного сопротивления при изгибе приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Нормальные напряжения в балке при изгибе

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расчетная нагрузка на балку	q^p	кН/м	1,5
Пролет балки	l	м	6,0
Максимальный изгибающий момент	M	кН·м	6,75
Момент сопротивления поперечного сечения балки	W	м ³	0,0011
Нормальные напряжения в балке при изгибе	σ	МПа	6,14

Таблица 4

Допускаемое расчетное сопротивление при изгибе

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расчетное сопротивление древесины при изгибе	R^A	МПа	22,5
Коэффициент:			
длительной прочности	$m_{\text{дл}}$	–	0,66
учитывающий породу древесины	$m_{\text{п}}$	–	1,0
учитывающий условия эксплуатации конструкции	$m_{\text{в}}$	–	1,0
учитывающий температуру воздуха, при которой эксплуатируется конструкция	$m_{\text{т}}$	–	1,0
Допускаемое расчетное сопротивление при изгибе	R^p	МПа	14,85

Сравнение значений нормальных напряжений в балке и допускаемого расчетного сопротивления при изгибе показывает, что величина нормальных напряжений в балке, возникающих при изгибе под нагрузкой, составляет 41 % от допускаемого расчетного сопротивления.

Прогиб балки

$$f = \frac{5q^n l^4}{384E^n I}, \quad (6)$$

где q^n – нормативная нагрузка, кН/м; E^n – расчетный модуль упругости древесины при расчете по предельным состояниям 2-й группы, ГПа; I – момент инерции поперечного сечения балки, м⁴.

Расчетный модуль упругости древесины при расчете по предельным состояниям 2-й группы:

$$E^{\text{II}} = E_{\text{ср}} m_{\text{длЕ}} \prod m_i, \quad (7)$$

где $E_{\text{ср}}$ – средний модуль упругости при изгибе, ГПа (табл. 1); $m_{\text{длЕ}}$ – коэффициент для упругих характеристик (см. табл. 2); $\prod m_i$ – произведение коэффициентов условий работы (см. табл. 2).

Результаты расчета прогиба балки приведены в табл. 5.

Таблица 5

Расчет прогиба балки

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Нормативная нагрузка на балку	q^{II}	кН/м	1,25
Пролет балки	l	м	6,0
Средний модуль упругости при изгибе	$E_{\text{ср}}$	ГПа	11,0
Коэффициент:			
учитывающий длительность воздействия нагрузки для упругих характеристик	$m_{\text{длЕ}}$	–	1,0
учитывающий породу древесины	$m_{\text{п}}$	–	1,0
учитывающий условия эксплуатации конструкции	$m_{\text{в}}$	–	1,0
учитывающий температуру воздуха при которой эксплуатируется конструкция	$m_{\text{т}}$	–	1,0
Расчетный модуль упругости древесины при расчете по предельным состояниям 2-й группы	E^{II}	ГПа	11,0
Момент инерции поперечного сечения балки	I	м ⁴	$99,2 \cdot 10^{-6}$
Прогиб балки:			
расчетный	f	мм	19,4
допускаемый	$f_{\text{и}}$	мм	24,0

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что прогиб в балке, возникающий при изгибе под нагрузкой, составляет 80 % от допускаемого прогиба. Прогиб не превышает максимально допустимого значения прогиба.

В стенке балки возникают касательные напряжения. Наибольшее значение они имеют в приопорных зонах, где поперечная нагрузка достигает максимального значения. В связи с этим балку необходимо проверить по скалывающим касательным напряжениям в приопорной зоне.

Балку рассчитываем на прочность по скалыванию:

$$\tau = \frac{QS}{Ib_{\text{ст}}} \leq R_{\text{ск}}, \quad (8)$$

где Q – расчетная поперечная сила, кН; S – статический момент сдвигаемой части поперечного сечения балки, м³; $b_{\text{ст}}$ – ширина стенки балки, м.

Допускаемое расчетное сопротивление при изгибе

$$R_{и} = R_{ск}^A m_{дл} \prod m_i, \quad (9)$$

где $R_{ск}^A$ – расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон, МПа (см. табл. 1);

Результаты расчета касательных напряжений и допускаемого расчетного сопротивления приведены в табл. 6, 7.

Таблица 6

Касательные напряжения в балке

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расчетное сопротивление древесины при изгибе	q^p	кН/м	1,5
Пролет балки	l	м	6,0
Расчетная поперечная сила	Q	кН	4,5
Статический момент сдвигаемой части поперечного сечения балки	S	м ³	$4,9 \cdot 10^{-3}$
Момент инерции поперечного сечения балки	I	м ⁴	$99,2 \cdot 10^{-6}$
Ширина сечения балки	$b_{ст}$	м	0,043
Касательные напряжения в балке	τ	МПа	0,05

Таблица 7

Допускаемое расчетное сопротивление древесины скалыванию

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон	$R_{ск}^A$	МПа	2,4
Коэффициент: длительной прочности	$m_{дл}$	–	0,66
учитывающий породу древесины	$m_{п}$	–	1,0
учитывающий условия эксплуатации конструкции	$m_{в}$	–	1,0
учитывающий температуру воздуха при которой эксплуатируется конструкция	$m_{т}$	–	1,0
Допускаемое расчетное сопротивление древесины скалыванию	R^p	МПа	1,58

Сравнение значений касательных напряжений и допускаемого расчетного сопротивления древесины скалыванию показывает, что касательные напряжения, возникающие при изгибе под нагрузкой, составляют только 3 % от допускаемого расчетного сопротивления древесины скалыванию.

В настоящее время круглые лесоматериалы, поступающие на лесопильные предприятия, имеют диаметр в вершине от 20 до 26 см, длину – 4 или 6 м. В целях определения выхода элементов двутавровой балки из этих лесоматериалов проведен их условный раскрой, определен полезный выход элементов для изготовления балки.

Полученные результаты показывают, что выход элементов для изготовления двутавровой балки в зависимости от размеров гнили составляет 20...40 % от объема круглых лесоматериалов. Ранее установлено [7], что общий выход пиломатериалов (вместе с объемом боковых необрезных пиломатериалов) – 57 %. Однако следует иметь в виду, что в нашем случае 20...40 % – это уже выход заготовок для склеивания двутавровых балок. Кроме того, раскрою подлежат лесоматериалы, которые в настоящее время не допускаются нормативно-технической документацией для изготовления пиломатериалов, предназначенных для строительства, а используемая при этом древесина обычно остается в лесу или применяется для выработки топливной щепы.

Выводы

1. Балки двутаврового сечения, полученные из круглых лесоматериалов с сердцевинной гнилью, можно применять в качестве несущих строительных конструкций.

2. Расчетные характеристики балок, склеенных из уголковых элементов, соответствуют эксплуатационным нагрузкам.

3. Фактические напряжения в балках, полученные в результате расчетов, в 1,25–2,50 раза меньше допускаемых.

4. Результаты исследований можно использовать при разработке нормативно-технических требований к несущим строительным конструкциям.

5. Применение круглых лесоматериалов с сердцевинной гнилью расширяет ресурсы древесины для строительства.

6. Принятый в работе метод расчетов не учитывает анизотропные свойства древесины балки. Для более точного установления прочностных характеристик балок двутаврового поперечного сечения из уголковых элементов требуется проведение дальнейших исследований и испытаний балок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронцова Н.А., Филатов Н.В., Шестопалов Е.Г.* Использование клефанерных элементов с перфорированными стенками в конструкциях малоэтажных деревянных зданий // Вологодские чтения. 2012. № 80. С. 74–76.

2. ГОСТ 8486–86. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. Введ. 1988–01–01. М.: Стандартинформ, 2007. 7 с.

3. *Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В.* Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой // Инж.-строит. журн. 2015. № 2(54). С. 77–85. DOI: 10.5862/MCE.54.9

4. *Кузнецов И.Л., Крайнов И.В., Гимранов Л.Р.* Усиление клефанерных двутавровых балок // Изв. Казан. ГАСУ. 2015. № 4(34). С. 166–170.

5. *Литовченко П., Молошный В., Елькина И., Литовченко С.* Экспериментальное исследование двутавровых деревянных балок // MOTROL. 2009. 11В. С. 145–151.

6. *Михайленко О.А., Кожевникова М.С.* О влиянии анизотропии упругих свойств древесины и фанеры на напряженно-деформированное состояние комбинированных конструкций // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам LXIII междунар. научн.-практ. конф. № 10(58). Новосибирск: СибАК, 2016. С. 118–126.

7. Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С. Зависимость объемного выхода пиломатериалов от дробности сортировки бревен по толщине // Хвойные бореальной зоны. 2013. № 5-6. С. 71–75.

8. Синцов А.В., Синцов В.П. Прочность и деформативность составной деревянной балки со стенкой из ориентированной стружечной плиты // Строительство и технологическая безопасность. 2014. № 50. С. 152–158.

9. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80. Введ. 2017–08–28. М.: Минстрой России, 2017. 97 с.

10. Торопов А.С. Исследование предмета труда лесозаготовки: метод. указания. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1995. 16 с.

11. Торопов А.С., Торопов С.А., Микрюкова Е.В. Исследование пораженности древесины напеченной гнилью // Лесн. журн. 2009. № 4. С. 95–100. (Изв. высш. учеб. заведений).

12. Туснин А.Р., Прокич М. Экспериментальные исследования работы балок двуглавого сечения при действии изгиба и кручения // Инж.-строит. журн. 2015. № 1(53). С. 24–31. DOI: 10.5862/МСЕ.53.3

13. Aro M., Brashaw B.K., Donahue P.K. Mechanical and Physical Properties of Thermally Modified Plywood and Oriented Strand Board Panels // Forest Products Journal. 2014. Vol. 64, iss. 7-8. Pp. 281–289. DOI: 10.13073/FPJ-D-14-00037

14. Benjeddou O., Limam O., Oueddou M.B. Experimental and Theoretical Study of a Foldable Composite Beam // Engineering Structures. 2012. Vol. 44. Pp. 312–321. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.06.011

15. BS EN 338:2003. Structural Timber. Strength Classes. BSI, 2003. 14 p.

16. Challamel N., Girhammar U.A. Lateral-Torsional Buckling of Vertically Layered Composite Beams with Interlayer Slip under Uniform Moment // Engineering Structures. 2012. Vol. 34. Pp. 505–513. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.10.004

17. Davis P.M., Gupta R., Sinha A. Revisiting the Neutral Axis in Wood Beams // Holzforschung. 2012. Vol. 66. Pp. 497–503. DOI: 10.1515/HF.2011.180

18. Fernando D., Frangi A., Kobel P. Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Strengthened Timber Laminates under Tensile Load // Engineering Structures. 2016. Vol. 117. Pp. 437–456. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.009

19. Harte A.M., Baylor G. Structural Evaluation of Castellated Timber I-Joists // Engineering Structures. 2011. Vol. 33, iss. 12. Pp. 3748–3754. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.08.011

20. Hu C., Xiao M., Zhou H., Wen W., Yun H. Damage Detection of Wood Beams Using the Differences in Local Modal Flexibility // Journal of Wood Science. 2011. Vol. 57. Pp. 479–483. DOI: 10.1007/s10086-011-1200-3

21. Khorsandnia N., Valipour H.R., Crews K. Nonlinear Finite Element Analysis of Timber Beams and Joints Using the Layered Approach and Hypoelastic Constitutive Law // Engineering Structures. 2013. Vol. 46. Pp. 606–614. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.08.017

22. O’Loinsigh C., Oudjene M., Shotton E., Pizzi A., Fanning P. Mechanical Behavior and 3D Stress Analysis of Multi-Layered Wooden Beams Made with Welded-Through Wood Dowels // Composite Structures. 2012. Vol. 94, iss. 2. Pp. 313–321. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.08.029

23. Yoshihara H. Bending Properties of Medium-Density Fiberboard and Plywood Obtained by Compression Bending Test // Forest Products Journal. 2011. Vol. 61, no. 1. Pp. 56–63. DOI: 10.13073/0015-7473-61.1.56

Поступила 25.02.19

UDC 691.113

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.133

Lumber Production for Construction from Round Timber with Heart Rot*A.S. Toropov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: 0000-0003-4414-2505**V.E. Byzov², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: 0000-0002-2078-5226**S.A. Toropov¹, External PhD Student*¹Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: Toropov_A_S@mail.ru²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: mapana@inbox.ru

Coniferous lumber is popular in low-rise wooden house construction. However, the condition of round timber for lumber production has been going down in recent years. Timber with heart rot is very common nowadays. As a rule, the heart rot removal occurs in harvesting of round timber. At the same time, disease-free sap wood is removed together with the wood affected by the rot in timber cutting. Therefore, a large amount of sound timber remains in forest. Cutting of timber with rot reduces the yield of lumber for construction, as far as rot's presence in building structures is not allowed. A method of cutting round timber with heart rot is proposed for the purposes of production I-beams from solid wood. It is necessary to know the form and sizes of rot for high-quality rough ripping of round timber with heart rot. The relationship between the cross-sectional dimensions of round timber and heart rot along the length of assortments is quite accurately described by the equations of correlative (allometric) growth. The schemes of cutting round timber with heart rot have been developed taking into account these dependencies. Cutting was carried out by split-pith sawing scheme. Firstly, two four-side edged cants with heart rot in the central part of one of the cross-section layers were produced. Then the beams were longitudinally divided into two parts. Rot was removed from these parts by milling. Angle bars for I-beams production were obtained as a result of conditional cutting of pine round timber. The studies of the I-beam made of angle bars were carried out. The calculated stresses of beam bending do not exceed the accepted values. The useful output of such bars made of round timber with heart rot is calculated. It has been found that the method of manufacturing elements of building constructions from round timber with heart rot will allow to use them in low-rise wooden house construction. This will expand the wood resources for construction.

For citation: Toropov A.S., Byzov V.E., Toropov S.A. Lumber Production for Construction from Round Timber with Heart Rot. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 133–145. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.133

Keywords: round timber, heart rot, allometric growth equations, solid wood I-beam, angle bars, lumber useful output for building structures.

REFERENCES

1. Vorontsova N.A., Filatov N.V., Shestopalov E.G. Use of Cell Kleefanernyh with Perforated Walls in Building Structures Low-Rise Wooden. *Vologdinskie chteniya*, 2012, no. 80, pp. 74–76.
2. *GOST 8486–86. Coniferous Sawn Timber. Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 7 p.
3. Karelskiy A.V., Zhuravleva T.P., Labudin B.V. Load-to-Failure Bending Test of Wood Composite Beams Connected by Gang Nail. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2015, no. 2, pp. 77–127. DOI: 10.5862/MCE.54.9
4. Kuznetsov I.L., Kraynov I.V., Gimranov L.R. Reinforcement of a Glue-Laminated Plywood I-Joist. *Izvestiya KGASU* [News of the KSUAE], 2015, no. 4, pp. 166–170.

5. Litovchenko P., Moloshnyy V., El'kina I., Litovchenko S. Experimental Research of Wooden J-Beams. *MOTROL*, 2009, vol. 11V, pp. 145–151.
6. Mikhailenko O.A., Kozhevnikova M.S. About the Influence of the Anisotropy of the Elastic Properties of Wood and Plywood to the Stress-Strain State Combined Structure. *Engineering Sciences – From Theory to Practice: Collection of Academic Papers on the Proc. of the LXIII Int. Sci.-Pract. Conf. No. 10(58)*. Novosibirsk. SibAK Publ., 2016, pp. 118–126.
7. Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Matveeva I.S. Dependence of Lumber Output on Sort Groups of Logs by Thickness. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2013, vol. 31, no. 5-6, pp. 71–75.
8. Sintsov A.V., Sintsov V.P. Strength and Deformability of a Composite Wooden Beam with Wall Made of Oriented Strand Board. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and industrial safety], 2014, no. 50, pp. 152–158.
9. *SP 64.13330.2017. Timber Structures*. Updated Version of SNiP II-25–80. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2017. 97 p.
10. Toropov A.S. *Study of the Subject of Labor of Wood Exploitation: Laboratory Operations Manual*. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 1995. 16 p.
11. Toropov A.S., Toropov S.A., Mikryukova E.V. Investigation of Wood Affected by Stump Rot. *Lesnoy Zhurnal*. [Forestry Journal], 2009, no. 4, pp. 95–100.
12. Tusnin A.R., Prokic M. Experimental Research of I-Beams under Bending and Torsion Actions. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2015, no. 1(53), pp. 24–31. DOI: 10.5862/MCE.53.3
13. Aro M., Brashaw B.K., Donahue P.K. Mechanical and Physical Properties of Thermally Modified Plywood and Oriented Strand Board Panels. *Forest Products Journal*, 2014, vol. 64, iss. 7-8, pp. 281–289. DOI: 10.13073/FPJ-D-14-00037
14. Benjeddou O., Limam O., Ouezdou M.B. Experimental and Theoretical Study of a Foldable Composite Beam. *Engineering Structures*, 2012, vol. 44, pp. 312–321. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.06.011
15. *BS EN 338:2003. Structural Timber. Strength Classes*. BSI, 2003. 14 p.
16. Challamel N., Girhammar U.A. Lateral-Torsional Buckling of Vertically Layered Composite Beams with Interlayer Slip under Uniform Moment. *Engineering Structures*, 2012, vol. 34, pp. 505–513. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.10.004
17. Davis P.M., Gupta R., Sinha A. Revisiting the Neutral Axis in Wood Beams. *Holzforschung*, 2012, vol. 66, pp. 497–503. DOI: 10.1515/HF.2011.180
18. Fernando D., Frangi A., Kobel P. Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Strengthened Timber Laminates under Tensile Load. *Engineering Structures*, 2016, vol. 117, pp. 437–456. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.009
19. Harte A.M., Baylor G. Structural Evaluation of Castellated Timber I-Joists. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, iss. 12, pp. 3748–3754. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.08.011
20. Hu C., Xiao M., Zhou H., Wen W., Yun H. Damage Detection of Wood Beams Using the Differences in Local Modal Flexibility. *Journal of Wood Science*, 2011, vol. 57, pp. 479–483. DOI: 10.1007/s10086-011-1200-3
21. Khorsandnia N., Valipour H.R., Crews K. Nonlinear Finite Element Analysis of Timber Beams and Joints Using the Layered Approach and Hypoelastic Constitutive Law. *Engineering Structures*, 2013, vol. 46, pp. 606–614. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.08.017
22. O'Loinsigh C., Oudjene M., Shotton E., Pizzi A., Fanning P. Mechanical Behavior and 3D Stress Analysis of Multi-Layered Wooden Beams Made with Welded-Through Wood Dowels. *Composite Structures*, 2012, vol. 94, iss. 2, pp. 313–321. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.08.029
23. Yoshihara H. Bending Properties of Medium-Density Fiberboard and Plywood Obtained by Compression Bending Test. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, no. 1, pp. 56–63. DOI: 10.13073/0015-7473-61.1.56

Received on February 25, 2019

УДК 674.023

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.146

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

В.И. Мелехов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: Q-1051-2019, ORCID: 0000-0002-2583-3012

Л.В. Кремлева¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: T-5916-2018, ORCID: 0000-0002-8982-2603

Т.В. Тюрикова¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: P-8991-2019, ORCID: 0000-0002-3592-310X

Е.В. Сазанова¹, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: G-8650-2019, ORCID: 0000-0001-5731-7517

Д.А. Лужанский², инж.; ResearcherID: P-9154-2019, ORCID: 0000-0001-9347-3306

В.А. Слуцков², инж.; ResearcherID: P-7597-2019, ORCID: 0000-0003-4032-4635

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

²АО «Производственное объединение «Севмаш», ш. Архангельское, д. 58, г. Северодвинск, Архангельская область, Россия, 164500; e-mail: arov-dm@mail.ru

Эффективная эксплуатация современных многофункциональных деревообрабатывающих центров с числовым программным управлением связана с созданием рациональных конструкций концевых фрез для многокоординатной обработки. Цель работы – экспериментальное исследование динамических параметров процесса обработки древесины концевыми фрезами и их влияния на шероховатость поверхности в зависимости от конструктивных элементов инструмента. Варьируемыми конструктивными элементами фрез являются: угол наклона режущих кромок, число зубьев, неравномерность окружного шага и наличие стружкоделительных канавок на режущих кромках. В процессе исследования использовался комплект экспериментальных фрез с различными конструктивными элементами. Эксперименты с резанием выполнены в производственных условиях на виброизмерительном комплексе (фирма «Брюль и Кьер»). Приведены факторные планы исследований, методики виброизмерений и обработки виброакустических сигналов. Представлены качественные оценки степени влияния различных конструктивных элементов концевых фрез на виброактивность обработки древесины сосны и дуба. В среднем уровень вибраций при обработке заготовок из древесины дуба на 55...75 % выше, чем из сосны, при этом шероховатость обработанной поверхности различалась всего на 10...20 %. Установлена устойчивая корреляция между уровнем вибраций и шероховатостью обработанной поверхности. Увеличение угла наклона режущих кромок, числа зубьев, а также наличие стружкоделительных канавок снижает вибрации и способствует повышению качества обработанной поверхности для рассматриваемых пород древесины. Влияние неравномерного окружного шага зубьев на исследуемые показатели неоднозначно.

Для цитирования: Мелехов В.И., Кремлева Л.В., Тюрикова Т.В., Сазанова Е.В., Лужанский Д.А., Слуцков В.А. Экспериментальное исследование динамики процесса обработки древесины концевыми фрезами // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 146–158. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.146

Ключевые слова: фрезы с винтовыми стружечными канавками, виброактивность обработки, спектральные характеристики, среднеквадратичные значения виброускорений, качество поверхности.

Введение

Для обеспечения технологической гибкости, повышения точности и производительности обработки современные деревообрабатывающие производства активно оснащаются многофункциональными обрабатывающими центрами с числовым программным управлением (ЧПУ). Номенклатура фрез, выпускаемых отечественными и зарубежными фирмами-производителями режущего инструмента для станков с ЧПУ, довольно широка. Концевые фрезы, используемые для обработки на станках с ЧПУ, имеют много конструктивных особенностей: значительные углы наклона винтовых стружечных канавок, торцовые кромки, стружкоделительные канавки, различное число зубьев, фасонный профиль. Известно, что силы резания при фрезеровании носят переменный во времени характер [8, 13]. Это приводит к вибрациям элементов технологической системы и в целом отрицательно сказывается на качестве обработанной поверхности, стойкости инструмента, точности обработки [2, 6, 12]. Несмотря на то, что современные системы ЧПУ имеют программно-аппаратные средства управления динамикой фрезерования, развитые средства интерполяции криволинейных траекторий [10, 14], вопрос о выборе рациональной конструкции дереворежущего инструмента, позволяющей снизить уровень вибраций при обработке, исследован недостаточно.

Фрезерование – процесс обработки материала вращающимися лезвиями, в результате которого припуск снимается путем последовательного срезания отдельных стружек [1]. Современную технологическую машину принято рассматривать как технологическую систему взаимосвязанных элементов «станок–приспособление–инструмент–деталь» (СПИД). Циклические силы резания, действуя на элементы технологической системы, вызывают переменные во времени их виброперемещения. Анализ работ в области динамики станков показал [6, 9, 12], что все колебательные процессы, возникающие в технологической системе, можно разделить на две основные группы: не связанные с процессом резания и вызванные непосредственно процессом резания. К первой группе относят вынужденные колебания низкой частоты от неуравновешенности механизмов технологической системы и дисбаланса инструмента, ко второй – вынужденные колебания, обусловленные прерывистостью процесса резания и особенностями стружкообразования. При прерывистом резании преобладающими являются вибрации второй группы. Процесс резания при фрезеровании характеризуется прерывистым контактом взаимодействия режущих лезвий и заготовки, различным количеством лезвий, находящихся в контакте, наличием повторяющихся ударных нагрузок при входе и выходе резцов из контакта с заготовкой.

Нестационарность процесса фрезерования в теории механической обработки материалов принято оценивать степенью его неравномерности [1]. При проектировании технологической операции можно подобрать такие условия, при которых неравномерность фрезерования будет наименьшей. Однако при обработке древесины подобрать такие условия крайне сложно

из-за анизотропии ее физико-механических свойств. Одним из путей снижения вынужденной вибрации является повышение жесткостных и демпфирующих свойств элементов станочной системы [7]. Наряду с этим используются методы снижения вибраций за счет применения специального фрезерного инструмента и оптимизации режимов резания. К основным конструктивным особенностям таких фрез следует отнести: использование винтовых режущих кромок, «шахматное» расположение резцов на образующей поверхности инструмента и др. [8, 14, 15]. Значительный угол наклона режущих кромок в конструкции дереворежущих фрез для станков с ЧПУ предлагается различными фирмами-производителями. Например, в работе [6] приведены конструкции спиральных ножевых головок с винтовыми разнонаправленными зубьями. Для получения рациональной схемы срезания припуска при фрезеровании древесины применяются фрезы с шахматным расположением резцов, имеющие много модификаций. Фрезы используются для черновой обработки широких поверхностей и устранения возможности возникновения вибраций. Разделение длинных режущих кромок по ширине осуществляется с помощью нанесения на них стружкоделительных канавок в шахматном порядке или сдвига относительно друг друга режущих пластин [5].

Таковыми параметрами дереворежущего инструмента, как количество зубьев z , угол наклона режущих кромок ω , наличие стружкоделительных канавок при заданной глубине и ширине фрезерования, определяются длина, направление и расположение режущих кромок. От них зависит кинематическая схема срезания припуска и, следовательно, динамическая нестационарность процесса. Поэтому целью работы являлось установление зависимости влияния угла наклона режущих кромок, числа и схемы расположения лезвий на образующей поверхности инструмента на уровень вибраций и шероховатость обработанной поверхности. Это позволяет обоснованно принимать технологические решения при проектировании режущего инструмента еще на этапе создания операционных технологий обработки древесины фрезерованием.

Объекты и методы исследования

Эксперименты по определению уровня вибраций и шероховатости поверхности проводили на деревообрабатывающем центре с ЧПУ «BIESSE ROVER 20» (мощность главного привода $P = 6,6$ кВт) в условиях действующего производственного цеха. Использовали заготовки из древесины сосны и дуба размером $40 \times 140 \times 450$ мм с шероховатостью поверхности не более $Ra = 3,6$ мкм. Заготовки закрепляли на вакуумном столе станка, что обеспечивало стабильность усилия зажима. Для исследований была изготовлена партия инструмента, состоящая из 7 экспериментальных концевых фрез из стали P6M5 с твердостью рабочей части 61...63 HRCэ по ГОСТ 8994–80. Они соответствовали одному типоразмеру, имели одинаковую рабочую геометрию, но отличались отдельными конструктивно-геометрическими элементами. Параметры экспериментальных фрез и их общий вид приведены на рис. 1.

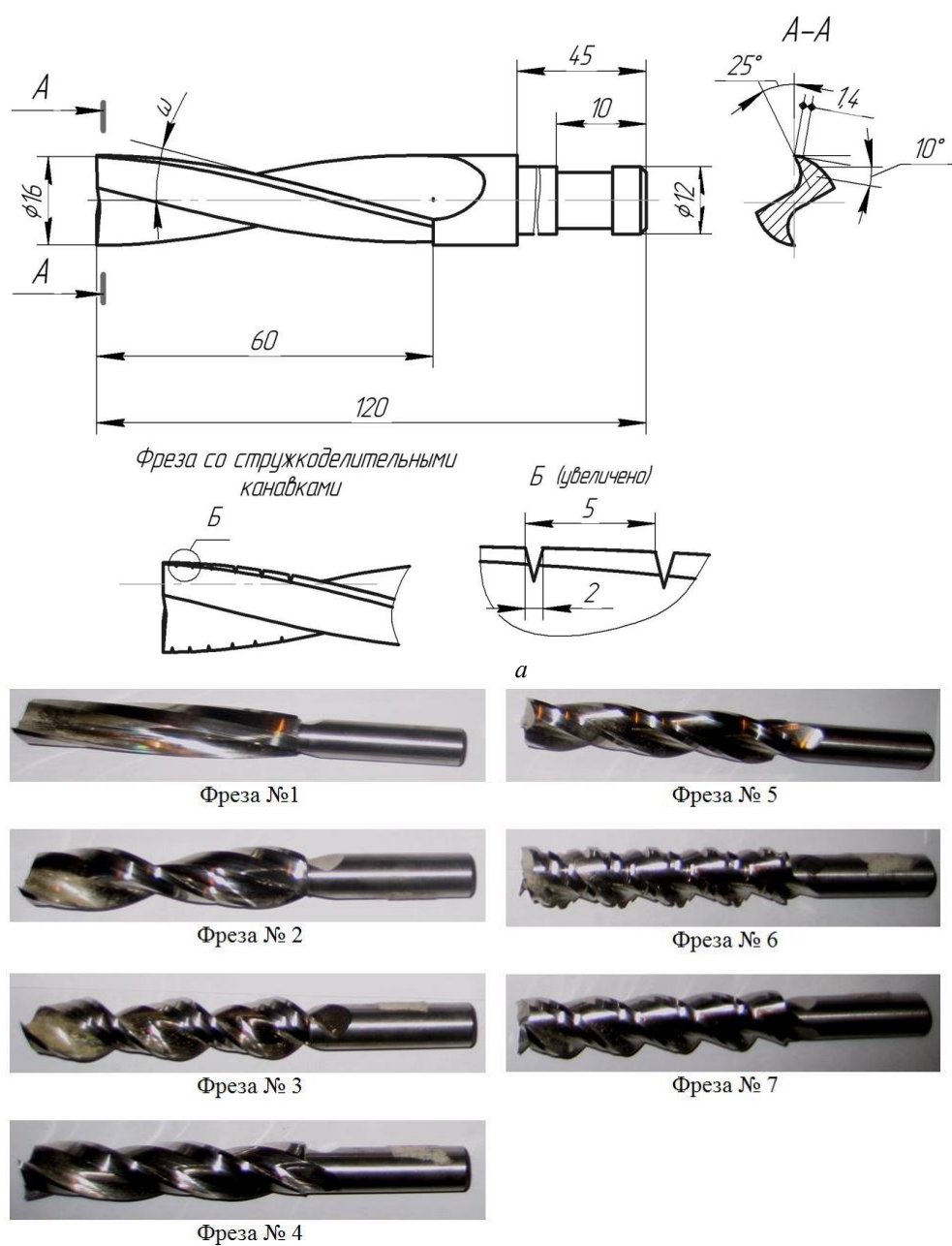


Рис. 1. Базовые размеры (а) и общий вид (б) экспериментальных фрез (размеры в миллиметрах)

Fig. 1. Basic dimensions (a) and general view (b) of experimental milling cutters (dimensions in mm)

В ходе экспериментов варьировались угол наклона режущей кромки ω ; наличие или отсутствие стружкоделительных канавок; количество зубьев z ; равномерность углового шага зубьев. Для фрезы с неравномерным окружным шагом углы между зубьями составляли 110, 120 и 130°.

Для удобства планирования экспериментов всем фрезам был присвоен код. Присвоенные числовые коды фрез и их варьируемые параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Переменные параметры экспериментальных фрез

Код (номер) фрезы	Число зубьев	Угол наклона режущей кромки, ...°	Шаг зубьев
1	2	12	Равномерный
2	2	30	«
3	2	45	«
4	3	30	«
5	3	30	Неравномерный
6	3	45	Равномерный
7	3	45	«

Примечание. Стружкоделительные канавки есть только у фрезы под кодовым номером 6.

Режимы резания во всех экспериментах оставались постоянными: скорость резания $v = 10$ м/с; подача $u = 2,4$ м/мин; глубина резания $t = 10$ мм. Для воспроизведения условий контурного фрезерования, при котором непрерывно происходит изменение угла перерезания волокон из-за анизотропии древесины, выполняли проходы вдоль и поперек волокон.

В качестве выходных показателей оценивали уровень возникающих вибраций и шероховатость обработанной поверхности. Измерение шероховатости поверхности осуществляли профилометром модели Surtronic 3 (фирма «Taylor-Hobson»). Для исследования виброакустических характеристик процесса фрезерования использовали оборудование фирмы «Брюль и Кьер» (Дания), в качестве первичных преобразователей вибрации – трехкомпонентные акселерометры модели 4321. Сигнал с первичных преобразователей подавался на усилитель модели 2647A, затем на многоканальный анализатор Pulse 3560-C, в состав которого входили измерительный модуль модели 3039 и интерфейсный модуль модели 7539.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2, а.

Фрезерованию подвергали закрытые прямоугольные пазы на полный проход фрезы (рис. 2, б). Выполняли 3 прохода фрезы на одной заготовке. После записи сигнала с акселерометров № 1 и 2 на жесткий диск осуществляли узкополосный спектральный анализ в диапазоне от 10 до 12 000 Гц. Указанный диапазон полностью перекрывал диапазон частот вращения шпинделя, частот врезания зубьев фрезы в заготовку и низшие собственные частоты шпиндельной группы.

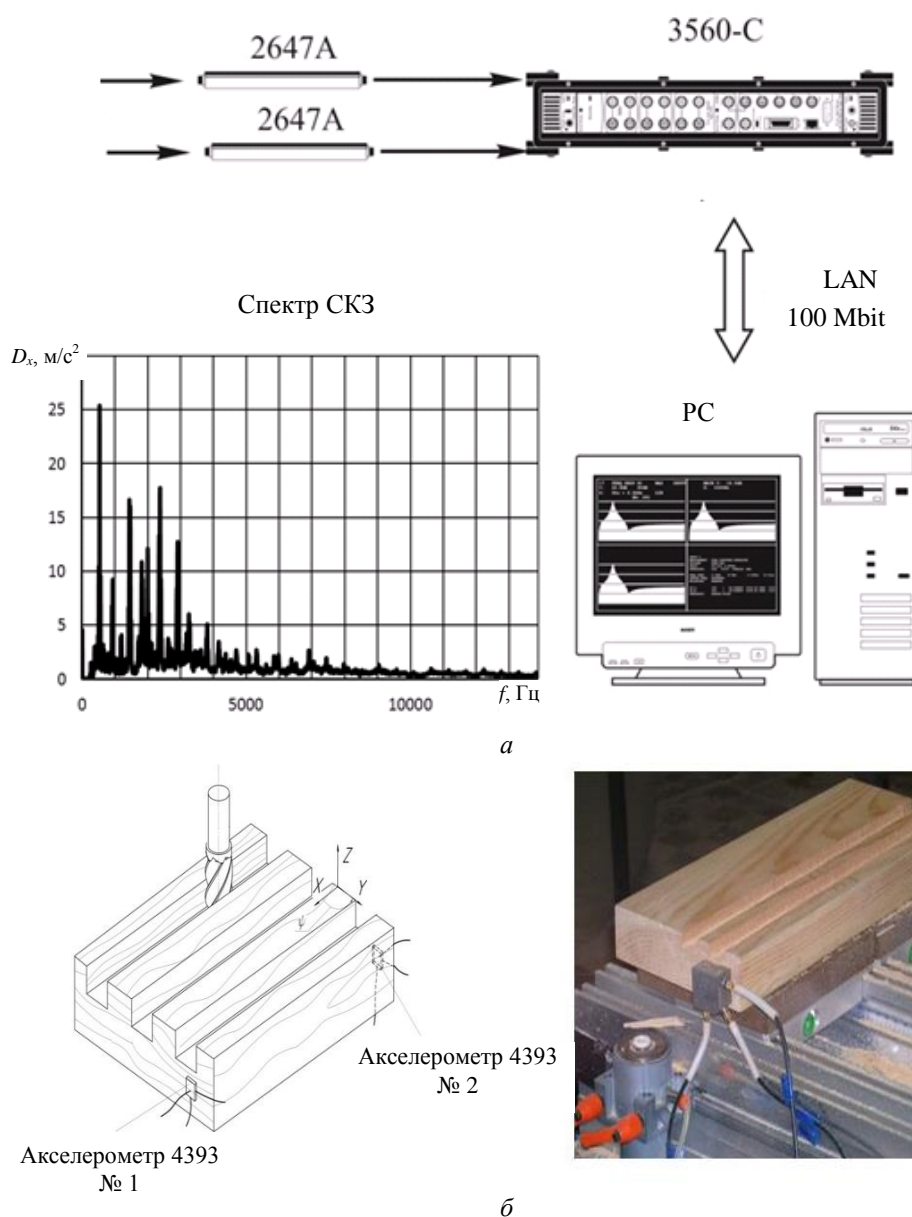


Рис. 2. Измерительный тракт при виброакустических измерениях: а – схема измерения вибраций; б – схема установки вибропреобразователей на заготовке (СКЗ – среднеквадратичные значения виброускорений, м/с^2 ; PC – персональный компьютер)

Fig. 2. Measuring track of vibroacoustic measurements: а – scheme for measuring vibrations; б – installation diagram of vibration inverter on a blank (СКЗ – mean square values of vibration acceleration, m/s^2 ; PC – personal computer)

Анализ выходного сигнала выполняли в следующем порядке:
 построение мгновенных спектров СКЗ с помощью быстрого преобразования Фурье [4];
 нахождение среднего значения спектра в рамках одного прохода фрезы;
 осреднение спектров по трем проходам и двум акселерометрам:

$$D_{x,y} = 1/6 \left(\sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^3 D_{i,k} \right),$$

где $D_{x,y}$ – среднее значение СКЗ по осям OX и OY ; $D_{i,k}$ – среднее значение СКЗ i -го прохода фрезы для k -го датчика;

нахождение дисперсии опытов в каждой точке планов;
определение однородности дисперсии.

Акселерометры, как первичные датчики регистрации сигнала, фиксируют шум от многих источников, имеющих в технологической системе станка (компрессорное оборудование, приводы основных движений и др.). В целях выявления вклада этих шумов были проведены предварительные эксперименты, суть которых заключалась в записи и анализе временных процессов в режиме холостого хода и при обработке. Поскольку уровень вибраций в режиме холостого хода при отключенном компрессоре не превышал 12...15 % от уровня вибраций при обработке, то был сделан вывод о нецелесообразности формирования опорного сигнала для аддитивного выделения помех.

Все эксперименты разбиты на четыре (I–IV) группы и выполнены для двух пород древесины (сосна и дуб). В группе I исследовали влияние угла наклона режущих кромок ω ($X1$) и направления подачи по отношению к волокнам ($X2$) на уровень вибраций и шероховатость обработанной поверхности по плану $3^1 2^1$. Использовались фрезы 1, 2, 3 (см. рис. 1). Нормированный параметр $X1$ принимал три значения (–1; 0,1; +1), что соответствовало фактическим параметрам фрез 1, 2, 3 и углам наклона режущих кромок: 12, 30, 45°. Нормированный параметр $X2$ принимал два значения (–1 и +1), что соответствовало фрезерованию вдоль ($\psi = 0^\circ$) и поперек ($\psi = 90^\circ$) волокон (ψ – угол между направлениями подачи фрезы и волокнами заготовки).

Группы экспериментов II–IV были проведены по планам 2^3 и 2^2 . В качестве варьируемых факторов для группы II использовали угол наклона кромки ω ($X3$), число режущих кромок z ($X4$) и направление подачи – фрезерования ($X2$). При выполнении экспериментов группы III исследовали влияние стружкоделительных канавок ($X5$) и направления подачи ($X2$) на виброактивность обработки и шероховатость поверхности. Цель экспериментов группы IV – определение влияния неравномерного окружного шага зубьев ($X6$) и направления подачи ($X2$) на исследуемые показатели. Нормированные значения параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интервалы варьирования независимых параметров экспериментов II–IV групп

Уровень фактора	Кромка	$X2$ (направление фрезерования)	$X3$ (ω)	$X4$ (z)	$X5$ (наличие канавок)	$X6$ (неравномерный шаг)
Верхний	+1	90° (поперек волокон)	45	3	+1 (есть)	+1 (есть)
Нижний	–1	0° (вдоль волокон)	30	2	–1 (нет)	–1 (нет)

При статистической обработке экспериментальных данных определяли средние значения спектра СКЗ в виброускорениях по двум осям ($X(D_X)$ и $Y(D_Y)$) по формуле (см. выше), среднее значение шероховатости (Ra_{cp}) на дне фрезерованных канавок – по 5 точкам. Коэффициенты линейных регрессион-

ных моделей вычислены в нормированных параметрах, что связано с наличием переменных нечислового характера. Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивали с помощью критерия Стьюдента. Адекватность модели определяли с использованием критерия Фишера при уровне значимости $p \leq 0,05$, частные коэффициенты корреляции между средним уровнем вибрации и средним значением показателя шероховатости поверхности – по всем группам экспериментов для двух направлений (r_x и r_y соответственно).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментов группы I представлены в табл. 3.

Таблица 3

Композиционный план и результаты экспериментов группы I

Код фрезы	X1(z)	X2(ψ)	D_x , м/с ²	D_y , м/с ²	Ra_{cp} , мкм
1	-1	+1	<u>24,0</u>	<u>15,6</u>	<u>25,7</u>
			42,0	23,4	30,8
2	0,1	+1	<u>20,5</u>	<u>18,5</u>	<u>21,3</u>
			35,9	27,8	25,6
3	+1	+1	<u>18,5</u>	<u>17,0</u>	<u>18,8</u>
			32,4	25,5	22,6
1	-1	-1	<u>15,3</u>	<u>25,6</u>	<u>21,7</u>
			26,8	38,4	26,0
2	0,1	-1	<u>13,8</u>	<u>15,1</u>	<u>16,3</u>
			24,2	22,7	19,6
3	+1	-1	<u>11,1</u>	<u>9,9</u>	<u>14,8</u>
			19,4	14,9	17,8

Примечание. В числителе приведены значения для древесины сосны, в знаменателе – для древесины дуба.

Композиционный план для экспериментов групп II–IV иллюстрирует табл. 4.

Таблица 4

Композиционный план и результаты экспериментов групп II–IV

Группа экспериментов	Код фрезы	X2(ψ)	X3(ω)	X4(z)	X5 (наличие канавок)	X6 (неравномерный шаг)	D_{x_2} , м/с ²	D_{y_2} , м/с ²	Ra_{cp} , мкм
II	2	+1	-1	-1	-1	-1	<u>20,5</u>	<u>18,5</u>	<u>21,3</u>
							32,4	26,5	23,0
III	3	+1	+1	-1	-1	-1	<u>18,5</u>	<u>17,0</u>	<u>18,8</u>
							29,2	24,3	20,3
II, III	4	+1	-1	+1	-1	-1	<u>18,0</u>	<u>19,5</u>	<u>19,6</u>
							28,4	27,9	21,2
IV	5	+1	-1	+1	-1	+1	<u>11,5</u>	<u>8,8</u>	<u>20,7</u>
							19,0	13,5	22,8
II, III	6	+1	+1	+1	-1	-1	<u>13,7</u>	<u>12,4</u>	<u>18,9</u>
							21,6	17,7	20,4

Окончание табл. 4

Группа экспериментов	Код фрезы	X2(ψ)	X3(ω)	X4(z)	X5 (наличие канавок)	X6 (неравномерный шаг)	D_X , м/с ²	D_Y , м/с ²	Ra_{cp} , мкм
III	7	+1	-1	+1	+1	-1	<u>11,6</u>	<u>8,9</u>	<u>17,9</u>
							19,1	13,6	19,7
II	2	-1	-1	-1	-1	-1	<u>13,8</u>	<u>15,1</u>	<u>16,3</u>
							21,8	21,6	17,6
II	3	-1	+1	-1	-1	-1	<u>11,1</u>	<u>9,9</u>	<u>14,8</u>
							17,5	14,2	16,0
II, IV	4	-1	-1	+1	-1	-1	<u>11,0</u>	<u>12,3</u>	<u>15,1</u>
							17,4	17,6	16,3
IV	5	-1	-1	+1	-	+1	<u>11,4</u>	<u>9,0</u>	<u>16,8</u>
							18,8	13,8	18,5
II, III	6	-1	+1	+1	-1	-1	<u>11,3</u>	<u>8,5</u>	<u>13,7</u>
							17,9	12,2	14,8
III	7	-1	-1	+1	+1	-1	<u>11,6</u>	<u>8,9</u>	<u>13,7</u>
							19,1	13,6	15,1

Примечание. В числителе приведены значения для древесины сосны, в знаменателе – для древесины дуба.

Результаты регрессионного и корреляционного анализа зависимостей между уровнем вибраций и шероховатостью поверхности приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты регрессионного анализа и коэффициенты корреляции между уровнем вибраций и шероховатостью поверхности по группам экспериментов

Группа экспериментов	Регрессионные модели		r_x	r_y
	Древесина сосны	Древесина дуба		
I	$D_X = 17,2 + 3,8 X_2 - 2,4 X_1$ $D_Y = 16,9 + 0,1 X_2 - 3,6 X_1$ $Ra_{cp} = 19,8 + 2,2 X_2 - 3,4 X_1$	$D_X = 28,6 - 3,8 X_1 + 6,2 X_2$ $D_Y = 25,6 - 5,4 X_1 + 0,13 X_2$ $Ra_{cp} = 23,7 - 3,4 X_1 + 2,7 X_2$	<u>0,88</u> 0,92	<u>0,52</u> 0,61
II	$D_X = 14,7 + 2,9 X_2 - 1,1 X_3 - 1,2 X_4$ $D_Y = 14,2 - 1,1 X_3 - 2,2 X_4 + 2,7 X_2$ $Ra_{cp} = 17,7 - 0,7 X_3 - 0,5 X_4 + 2,3 X_2$	$D_X = 23,4 + 4,5 X_2 - 1,6 X_3 - 1,8 X_4$ $D_Y = 20,3 + 3,9 X_2 - 3,1 X_3 - 1,5 X_4$ $Ra_{cp} = 18,5 + 2,4 X_2 - 0,74 X_3 - 0,35 X_4$	<u>0,92</u> 0,83	<u>0,86</u> 0,81
III	$D_X = 12,1 + 0,72 X_2 - 0,6 X_5$ $D_Y = 9,7 + 0,97 X_2 - 0,77 X_5$ $Ra_{cp} = 16,1 + 2,4 X_2 - 0,3 X_5$	$D_X = 19,8 + 0,9 X_2 - 0,7 X_5$ $D_Y = 14,8 + 1,48 X_2 - 1,1 X_5$ $Ra_{cp} = 17,6 + 2,5 X_2 - 0,3 X_5$	<u>0,72</u> 0,89	<u>0,71</u> 0,76
IV	$D_X = 13,1 + 1,8 X_2 - 1,5 X_6$ $D_Y = 12,4 + 1,8 X_2 - 3,5 X_6$	$D_X = 21,4 + 3,8 X_2 - 2,6 X_6$ $D_Y = 15,3 + 2,9 X_2 - 4,3 X_6$	He знач.	He знач.

Примечание. В числителе приведены значения для древесины сосны, в знаменателе – для древесины дуба.

Результаты обработки экспериментальных данных подтверждают, что увеличение угла наклона режущих кромок приводит к снижению уровня вибраций $D_{x,y}$ и шероховатости поверхности Ra_{cp} для рассматриваемых пород древесины. Это объясняется тем, что при увеличении угла наклона режущей кромки вход и выход зуба фрезы из контакта с заготовкой происходят более плавно, ударные нагрузки уменьшаются и, как следствие, сокращается уровень вибраций. Несмотря на то, что в настоящее время производители режущего инструмента предлагают в основном фрезы с углом наклона до 30° , увеличение угла до 45° благоприятно сказывается на снижении уровня вибраций и шероховатости поверхности. Рост числа зубьев при сохранении минутной подачи приводит к уменьшению подачи на зуб и сопровождается снижением уровня вибраций и шероховатости поверхности. Связано это с уменьшением степени неравномерности фрезерования. Стружкоделительные канавки на фрезе также способствуют снижению уровня вибраций и шероховатости поверхности. Значимые коэффициенты корреляции между величиной шероховатости поверхности и уровнем вибраций позволяют сделать вывод о том, что использование стружкоделительных канавок на фрезе вполне обоснованно. Наиболее рациональные области применения таких фрез необходимо уточнять при исследовании обработки древесины в зависимости от режимных параметров [11].

Следует отметить, что полученные коэффициенты корреляции между уровнем вибрации и шероховатостью поверхности являются значимыми и составляют от 0,52 до 0,91. Это хорошо согласуется с работами [3, 12], где предлагается проводить виброакустическую диагностику процесса резания для прогнозирования некоторых параметра обработки, например износа инструмента и шероховатости поверхности. Анализ коэффициентов в полученных регрессионных зависимостях для древесины сосны и дуба показал, что уровень вибраций при фрезеровании заготовок из дуба на 55...75 % выше. При этом шероховатость различается всего на 15...20 %. Влияние неравномерного окружного шага зубьев неоднозначно. При определении коэффициентов корреляции в этой группе экспериментов получены статистически не значимые величины. Следует также отметить, что во всех экспериментах уровень вибраций при фрезеровании заготовок из древесины поперек волокон был выше, чем вдоль волокон.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о том, что увеличение угла наклона режущих кромок, оснащение стружкоделительными канавками и рост числа зубьев концевых фрез благоприятно сказывается на общей виброактивности процесса резания и способствуют снижению шероховатости обрабатываемой поверхности.

Целесообразно продолжить исследования для уточнения области рационального применения таких фрез с учетом анизотропии, физико-механических свойств древесины, древесно-композитных материалов и режимных параметров процесса обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.Н. Совершенствование режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.

2. Воробьев А.А., Спицын И.Н., Филиппов Ю.А. Моделирование качества обработки и динамики работы дереворежущих станков // Справочник. Инж. журн. 2012. № 3. С. 37–41.
3. Воробьев А.А., Филиппов Ю.А. Установление зависимости шероховатости поверхности древесины от показателей вибрации станка // Деревообраб. пром-сть. 2010. № 2. С. 6–7.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
5. Глебов И.Т. Резание древесины: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТУ, 2007. 228 с.
6. Глебов И.Т. Зависимость высоты микронеровностей обработанной поверхности от некоторых факторов цилиндрического фрезерования // Лесн. журн. 2010. № 1. С. 99–104. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Ивановский Е.Г., Василевская П.В., Лаутнер Э.М. Фрезерование и пиление древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 96 с.
8. Кряжев Н.А. Фрезерование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 200 с.
9. Манжос Ф.М. Дереворежущие станки: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 454 с.
10. Iskra P., Hernández R.E. Toward a Process Monitoring and Control of a CNC Wood Router: Development of an Adaptive Control System for Routing White Birch // Wood and Fiber Science. 2010. Vol. 42, no. 4. Pp. 523–535.
11. Iskra P., Tanaka C. The Influence of Wood Fiber Direction, Feed Rate, and Cutting Width on Sound Intensity during Routing // Holz als Roh- und Werkstoff [European Journal of Wood and Wood Products]. 2005. Vol. 63, iss. 3. Pp. 167–172. DOI: 10.1007/s00107-004-0541-7
12. Li Z.Z., Zhang Z.H., Zheng L. Feedrate Optimization for Variant Milling Process Based on Cutting Force Prediction // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2004. Vol. 24, iss. 7-8. Pp. 541–552. DOI: 10.1007/s00170-003-1700-4
13. Palmqvist J., Lenner M., Gustafsson S.-I. Cutting-Forces When Up-Milling in Beech // Wood Science and Technology. 2005. Vol. 39, iss. 8. Pp. 674–684. DOI: 10.1007/s00226-005-0010-4
14. Raju K.V.M.K., Janardhana G.R., Kumar P.N., Rao V.D.P. Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness in CNC End Milling // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011. Vol. 12, iss. 3. Pp. 383–391. DOI: 10.1007/s12541-011-0050-7
15. Sun Y., Li D., Ren F., Guo D. Predictive Force Model Based Variable Feedrate Scheduling for High-Efficiency NC Machining // Proceedings of the ICIRA: International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Wuhan, China, October 15–17, 2008. Berlin: Springer, 2008. Pp. 1076–1085. DOI: 10.1007/978-3-540-88518-4_115

Поступила 28.09.18

UDC 674.023

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.146

Experimental Study of the Woodworking Dynamics with End Milling Cutters

*V.I. Melekhov*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](#),
ORCID: [0000-0002-2583-3012](#)

*L.V. Kremleva*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [T-5916-2018](#),
ORCID: [0000-0002-8982-2603](#)

*T.V. Tyurikova*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-8991-2019](#),
ORCID: [0000-0002-3592-310X](#)

*E.V. Sazanova*¹, Candidate of Economics, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-8650-2019](#), ORCID: [0000-0001-5731-7517](#)

*D.A. Luzhansky*², Engineer; ResearcherID: [P-9154-2019](#), ORCID: [0000-0001-9347-3306](#)

*V.A. Slutskov*², Engineer; ResearcherID: [P-7597-2019](#), ORCID: [0000-0003-4032-4635](#)

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

²JSC PO Sevmash, sh. Arkhangel'skoe, 58, Severodvinsk, Arkhangelsk region, 164500, Russian Federation; e-mail: arov-dm@mail.ru

Efficient operation of modern multifunctional woodworking centers with computer numerical control (CNC) is associated with the creation of rational designs of end milling cutters for multi-axis processing. The research purpose is an experimental study of the dynamic parameters of wood processing with end milling cutters and their influence on the surface roughness depending on the structural elements of the tool. The varying structural elements of the cutters are the cutting edge inclination, the teeth number, the circular pitch irregularity and the presence of chip separation grooves on the cutting edges. A set of experimental milling cutters with various structural elements was used in the research. Cutting experiments were performed under the production conditions with the use of vibration-measuring complex (Brüel & Kjær). Factorial designs of studies, methods of vibration measurements and processing of vibroacoustic signals are given. The article presents the qualitative assessment of the degree of influence of various structural elements of end milling cutters on the vibrativity of processing pine and oak wood. On average, the vibration level during the processing of oak blanks is higher by 60–75 % in comparison with pine blanks; while the roughness of the treated surface differs only by 10–20 %. A steady correlation between the level of vibrations and the roughness of the treated surface was found. Increasing the cutting edge inclination, the teeth number, as well as the presence of chip separation grooves reduces vibrations and helps to improve the condition of the treated surface for both wood species. The influence of circular tooth pitch irregularity on the studied parameters is ambiguous.

For citation: Melekhov V.I., Kremleva L.V., Tyurikova T.V., Sazanova E.V., Luzhansky D.V., Slutskov V.A. Experimental Study of the Woodworking Dynamics with End Milling Cutters. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 146–158. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.4.146](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.146)

Keywords: milling cutters with spiral leads, processing vibroactivity, spectral characteristics, mean square values of vibration acceleration, surface condition.

REFERENCES

1. Andreev V.N. *Cutting Tool Improvement*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 240 p.
2. Vorobjev A.A., Spitsyn I.N., Filippov J.A. Modeling of Quality of Processing and Dynamics of Work Woodcutting of Machine Tools. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2012, no. 3, pp. 37–41.
3. Vorobjev A.A., Filippov J.A. Dependence Determination of the Wood Surface Roughness on the Machine Vibration Parameters. *Derevoobrabatival'naya promishlennost'* [Woodworking industry], 2010, no. 2, pp. 6–7.
4. Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroacoustic Diagnostics of Vehicles and Machinery*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 288 p.
5. Glebov I.T. *Wood Cutting*: Educational Textbook. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2007. 228 p.

6. Glebov I.T. Dependencies of Micro-Roughness Height of Processed Surface on Some Factors of Cylinder Milling. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2010, no. 1, pp. 99–104.
7. Ivanovskiy E.G., Vasilevskaya P.V., Lautner E.M. *Milling and Sawing of Wood and Wood-Based Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 96 p.
8. Kryazhev N.A. *Wood Milling*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 200 p.
9. Manzhos F.M. *Wood Cutting Machines: Textbook for Universities*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 454 p.
10. Iskra P., Hernández R.E. Toward a Process Monitoring and Control of a CNC Wood Router: Development of an Adaptive Control System for Routing White Birch. *Wood and Fiber Science*, 2010, vol. 42, no. 4, pp. 523–535.
11. Iskra P., Tanaka C. The Influence of Wood Fiber Direction, Feed Rate, and Cutting Width on Sound Intensity during Routing. *Holz als Roh- und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 2005, vol. 63, iss. 3, pp. 167–172. DOI: 10.1007/s00107-004-0541-7
12. Li Z.Z., Zhang Z.H., Zheng L. Feedrate Optimization for Variant Milling Process Based on Cutting Force Prediction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 24, iss. 7-8, pp. 541–552. DOI: 10.1007/s00170-003-1700-4
13. Palmqvist J., Lenner M., Gustafsson S.-I. Cutting-Forces When Up-Milling in Beech. *Wood Science and Technology*, 2005, vol. 39, iss. 8, pp. 674–684. DOI: 10.1007/s00226-005-0010-4
14. Raju K.V.M.K., Janardhana G.R., Kumar P.N., Rao V.D.P. Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness in CNC End Milling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, vol. 12, iss. 3, pp. 383–391. DOI: 10.1007/s12541-011-0050-7
15. Sun Y., Li D., Ren F., Guo D. Predictive Force Model Based Variable Feedrate Scheduling for High-Efficiency NC Machining. *Proceedings of the ICIRA: International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Wuhan, China, October 15–17, 2008*. Berlin, Springer, 2008, pp. 1076–1085. DOI: 10.1007/978-3-540-88518-4_115

Received on September 28, 2018



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 628.31

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.159

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОАГУЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ЛИГНИНСОДЕРЖАЩЕЙ СТОЧНОЙ ВОДЫ ПО ДАННЫМ ПЛАНИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**Е.Л. Седова, аспирант; ORCID: 0000-0003-0903-7304**К.Б. Воронцов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: P-2313-2019, ORCID: 0000-0001-6369-7245**С.А. Буркова, магистрант; ORCID: 0000-0003-1710-8280*

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

e-mail: lelenasedova@mail.ru, k.vorontsov@narfu.ru, burkovasv@bk.ru

Эффективным способом удаления лигнинных веществ из стоков предприятий ЦБП является обработка коагулянтами. Согласно схеме локальной очистки лигнинсодержащая сточная вода обрабатывается отдельно, то есть до смешения с общим стоком предприятия. Для изучения эффективности процесса коагуляции лигнина алюмо- и железосодержащими реагентами предложено использовать метод планированного эксперимента, а именно ротатабельный центральный композиционный план второго порядка для трех факторов. Объектом исследований служила модельная вода с концентрацией сульфатного лигнина 400 мг/л. Исследовано влияние дозировки коагулянта, pH и продолжительности обработки сточной воды на степень ее очистки по лигнину и цветности. Все полученные модели оказались адекватными. Были построены поверхности отклика, демонстрирующие влияние режимных параметров на выходные характеристики. Установлено, что существенное влияние на эффективность удаления лигнина оказывают pH и дозировка коагулянта. Определены оптимальные интервалы pH и дозировок для исследуемых реагентов: сульфата и оксихлорида алюминия, алюмокалиевых квасцов и сульфата железа (III). Продолжительность обработки коагулянтom в интервале от 1 до 4 минут влияния на степень очистки практически не оказывает. Наилучшие результаты были получены при использовании оксихлорида алюминия: эффективность очистки по лигнину и цветности превысила 90 %. Определены оптимальные условия: pH 6,7...7,0, дозировка – 50...55 мг Al_2O_3 /л.

Для цитирования: Седова Е.Л., Воронцов К.Б., Буркова С.А. Влияние условий коагуляционной обработки на эффективность очистки лигнинсодержащей сточной воды по данным планированного эксперимента // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 159–167. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.159

Ключевые слова: коагуляция, коагулянт, очистка сточных вод, планированный эксперимент, целлюлозно-бумажная промышленность.

*Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 году.

Введение

Одной из наиболее серьезных и актуальных проблем современного мира следует считать загрязнение окружающей среды выбросами и сбросами промышленных предприятий. В частности, предприятия целлюлозно-бумажной промышленности являются источником постоянного загрязнения природных водоемов; сточные воды предприятий отрасли содержат в своем составе значительные количества высокомолекулярных и биорезистентных соединений, при недостаточной эффективности очистки стоков наносящие непоправимый вред биосфере.

К указанным соединениям относятся лигнинные вещества, которые могут попасть в общий сток предприятия на стадиях промывки, отбелки целлюлозы. Они вносят наиболее значительный вклад в загрязненность общего стока целлюлозно-бумажного предприятия: 35...40 % по показателю ХПК, при этом наиболее высокомолекулярная их фракция проходит через стадию биологической очистки, применяемую на большинстве предприятий отрасли, транзитом [9]. Отмечается, что именно сточные воды выпарных и отбельных цехов оказывают наиболее значительное влияние на окислительную способность активного ила и, соответственно, эффективность процесса биологической очистки [5]. Лигнинные соединения, содержащиеся в указанных стоках, также способны оказывать токсическое действие на водоемы [12, 17].

Учеными САФУ была предложена схема коагуляционной обработки для очистки лигнинсодержащих стоков [2, 3]. Данная схема подразумевает наличие стадии локальной очистки лигнинсодержащих сточных вод с использованием коагулянтов и флокулянтов с дальнейшей доочисткой биологическими методами. Сочетание биологических и физико-химических методов очистки может быть экологически и экономически предпочтительным для сведения к минимуму загрязнения окружающей среды [16].

В целом коагуляция как метод очистки воды применяется довольно широко и представлена как процессами водоподготовки, так и очистки производственных сточных вод [6, 8, 15]. Изучению коагуляционной очистки низкоконтрированных растворов сульфатного лигнина алюмосодержащими реагентами посвящены работы научного коллектива под руководством Ю.М. Чернобережского [7, 10, 14].

Локальная очистка подразумевает наличие более высоких концентраций лигнинных веществ в обрабатываемой воде и, вероятно, иные оптимальные условия очистки. Эффективность применения коагулянтов зависит от множества факторов, таких как рН, вид и дозировка коагулянта, состав и степень загрязненности сточных вод, условия перемешивания, температура.

Наличие большого числа факторов, каждый из которых способен в определенной степени повлиять на эффективность очистки, а также сложность и непостоянство состава сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий делают процесс экспериментальных исследований довольно трудоемким и продолжительным.

Помочь решить данную проблему может использование метода планированного эксперимента, который является достаточно информативным и позволяет повысить достоверность выводов по результатам экспериментальных исследований. В литературе имеются сведения об опыте применения данного метода для оценки эффективности процессов коагуляции [13, 18–20], однако следует отметить, что все эти работы проведены зарубежными исследователями и не касаются очистки сточных вод от лигнина.

Целью данной работы являлась оценка эффективности очистки лигнинсодержащей сточной воды алюминий- и железосодержащими коагулянтами с использованием метода планированного эксперимента.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований была лигнинсодержащая вода, приготовленная из сульфатного лигнина (модельная вода), с заданными параметрами: концентрация лигнина – 400 мг/л, цветность – 1800 °ПКШ. Сульфатный лигнин был выделен из упаренного черного щелока от делигнификации лиственной древесины, отобранного на АО «Архангельский ЦБК» по методике [1]. Модельную воду готовили путем растворения навески лигнина в растворе гидроксида натрия, с последующей нейтрализацией до pH 6,2.

Исследовали эффективность применения алюминийсодержащих коагулянтов: сульфата алюминия (СА), оксихлорида алюминия (ОХА), алюмокалиевых квасцов (АКК) и железосодержащий реагент – сульфат железа (III) (СЖ). Для повышения эффективности осветления обработанной воды после коагуляции в пробы вносили раствор низкокаатионного полиакриламидного флокулянта.

Исследования проводили с использованием метода планированного эксперимента с целью построения математической модели процесса и выявления оптимальных областей эффективности очистки. На основании литературных данных [13, 18–20] было решено использовать ротатбельный центральный композиционный план второго порядка для трех факторов, составление и расчет которого описаны в работе [4]. В качестве факторов использовали: pH после введения реагентов, дозировка коагулянта – Д (в расчете на Al_2O_3 или Fe_2O_3) и продолжительность обработки коагулянтом – τ . Интервалы варьирования факторов были выбраны на основании предварительных экспериментов. Уровни варьирования факторов для исследований с использованием алюмосодержащих коагулянтов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов				
	$-\alpha$	-1	0	1	A
pH (x_1)	4,5	5,0 (4,7)	5,8 (5,0)	6,5 (4,7)	7,0 (5,5)
Д, мг Al_2O_3 /л (x_2)	20,0 (30,0)	30,0 (40,0)	45,0 (55,0)	60,0 (70,0)	70,0 (80,0)
τ , мин (x_3)	1,0	1,6	2,5	3,4	4,0

Примечание. В скобках приведены уровни факторов в экспериментах с сульфатом железа, если они отличались от исследований алюмосодержащих реагентов.

Выходными параметрами являлись: эффективность очистки по лигнину ($\mathcal{E}_л$) и эффективность очистки по цветности ($\mathcal{E}_{цв}$). Эксперимент проводили следующим образом: пробы сточной воды последовательно обрабатывали растворами реагентов – коагулянта и флокулянта, исходя из заданных дозировок, дозировка раствора флокулянта во всех опытах – 0,1 мг/л. Корректировку pH при необходимости осуществляли раствором гидроксида натрия. После обработки воду отстаивали в течение 0,5 ч. Цветность осветленной воды определяли фотометрическим методом по ГОСТу 31868–2012 в градусах платиново-кобаль-

товой шкалы. Концентрацию лигнина определяли методом УФ-спектроскопии при длине волны 280 нм, соответствующей максимуму поглощения исследуемого лигнина [11]. По результатам анализов рассчитывали эффективность очистки, которую выражали в процентах.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании представленных в табл. 2 экспериментальных данных были получены статистические модели, связывающие значения выходных параметров с заданными условиями. Проверка моделей по критерию Фишера показала, что все они адекватны (расчетные значения критерия Фишера меньше табличных во всех случаях). Были получены уравнения регрессии, описывающие данные математические модели, и построены поверхности отклика, наглядно демонстрирующие то, как влияют режимные параметры на выходные характеристики (рис. 1, 2).

Таблица 2

Результаты экспериментов

№	Уровни факторов в кодированных переменных			Выходные параметры							
	x_1	x_2	x_3	$\Xi_{др}$, %				$\Xi_{цв}$, %			
				СА	ОХА	АКК	СЖ	СА	ОХА	АКК	СЖ
1	-1	-1	-1	81,3	87,6	88,5	68,3	88,0	88,9	92,4	80,7
2	1	-1	-1	5,8	8,8	12,8	31,2	2,7	5,5	1,8	45,6
3	-1	1	-1	80,5	89,5	89,0	80,8	85,2	90,1	92,4	86,1
4	1	1	-1	57,0	87,0	25,6	48,3	61,0	94,3	13,2	57,0
5	-1	-1	1	87,1	87,7	87,7	70,1	92,1	89,9	92,1	83,1
6	1	-1	1	1,9	17,2	16,1	32,2	0,0	0,0	1,8	47,7
7	-1	1	1	88,7	88,8	89,8	82,9	90,7	91,6	92,1	88,5
8	1	1	1	47,6	87,6	53,6	50,4	50,7	91,8	73,1	59,4
9	$-\alpha$	0	0	88,9	87,4	89,9	74,5	91,8	93,0	91,7	87,8
10	α	0	0	9,8	53,0	13,3	24,8	4,8	48,0	1,8	38,2
11	0	$-\alpha$	0	59,2	11,6	17,2	28,6	58,2	0,0	13,2	43,3
12	0	α	0	83,2	90,0	87,1	80,2	91,8	95,5	83,5	84,9
13	0	0	$-\alpha$	75,1	88,2	79,4	70,4	78,9	95,2	85,8	83,1
14	0	0	α	85,3	89,5	70,7	75,1	92,6	95,2	88,1	89,0
15	0	0	0	53,7	68,3	54,1	70,1	47,3	72,6	75,0	83,1
16	0	0	0	57,4	81,3	76,1	74,8	63,7	87,5	83,5	87,8
17	0	0	0	76,0	69,4	80,9	80,3	82,7	93,3	74,1	84,2
18	0	0	0	74,7	90,2	85,1	82,5	81,1	74,3	91,5	88,1
19	0	0	0	79,4	88,6	75,6	75,1	84,1	93,4	88,1	89,0
20	0	0	0	69,8	79,6	61,2	79,6	77,4	76,3	90,7	83,8

Как следует из результатов исследования, рН и дозировка коагулянта оказывают существенное влияние на эффективность очистки. Представленные на рис. 1 и 2 зависимости, полученные с использованием различных коагулянтов, имеют схожий характер. Установлено, что продолжительность обработки коагулянтом в исследуемом интервале (1...4 мин) на степень очистки практически не влияет.

Из данных на рис. 1 видно, что при использовании сульфата алюминия и алюмокалиевых квасцов эффективность очистки по лигнину максимальна при pH 5,0...5,5, в то же время для сульфата железа данный диапазон несколько меньше: 4,9...5,2; оксихлорид алюминия наиболее эффективен при pH 6,5...7,0. Во всех случаях происходит резкое увеличение эффекта очистки. Полученные методом планированного эксперимента данные об оптимальных интервалах pH сульфата и оксихлорида алюминия в целом соответствуют установленным ранее [7, 10, 14].

С ростом дозировки коагулянта наблюдается увеличение степени очистки: для алюмосодержащих реагентов максимальный эффект получен при дозировке 50...55 мг/л, а для сульфата железа – 60...65 мг/л. В областях оптимальных значений дозировок коагулянта и pH среды были достигнуты следующие значения эффективности очистки по лигнину: 98 % (ОХА), 89 % (СА), 85 % (АКК) и 80 % (СЖ).

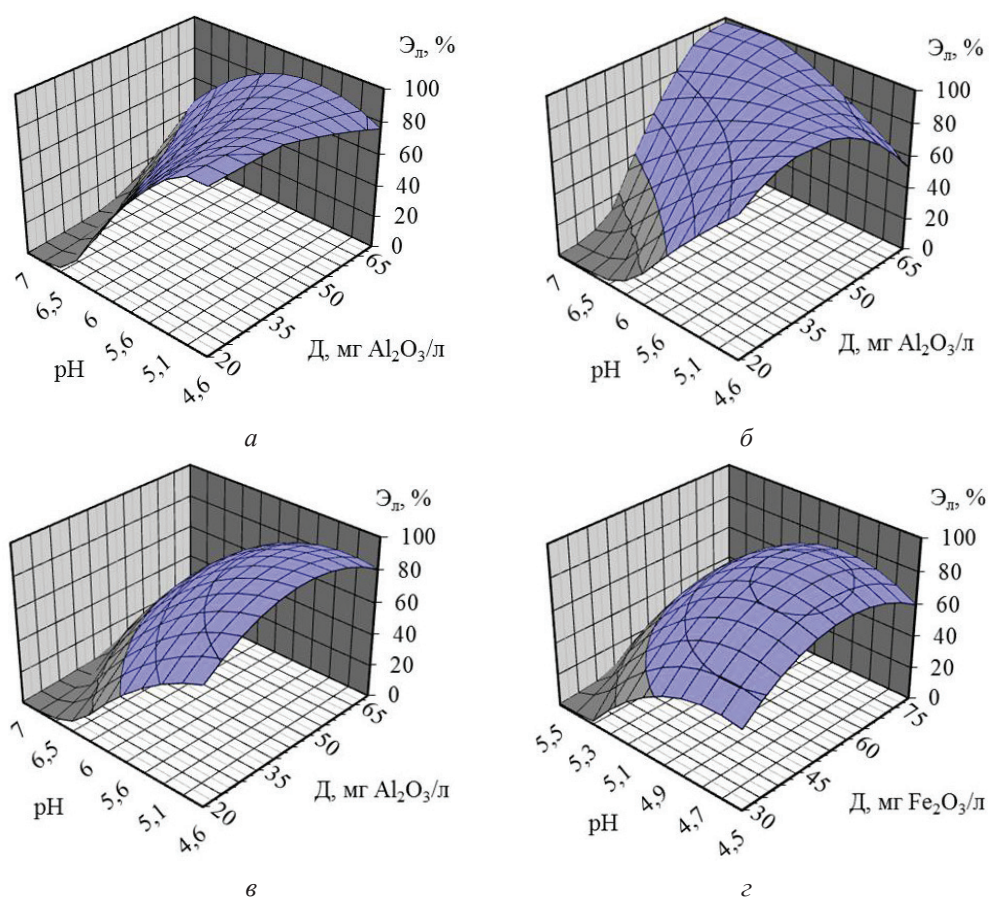


Рис. 1. Влияние дозировки коагулянта и pH на эффективность очистки по лигнину: а – СА, б – ОХА, в – АКК, z – СЖ

Fig.1. Impact of the Coagulant and pH Dosing on the Lignin Removal Efficiency а – aluminum sulfate, б – aluminum chloride oxide, в – aluminium potassium sulfate, z – ferric sulfate

Аналогичные зависимости были получены и при исследовании эффективности очистки по цветности (рис. 2). Оптимальные интервалы pH и дозировок коагулянтов полностью соответствуют установленным нами интервалам для степени очистки по лигнину. Были достигнуты следующие значения эффективности очистки по цветности: 99 % (ОХА), 92 % (СА), 85 % (АКК) и 80 % (СЖ).

Таким образом, максимальные значения эффективности очистки по лигнину и цветности получены при использовании оксихлорида алюминия, минимальные – при использовании сульфата железа при несколько больших дозировках последнего.

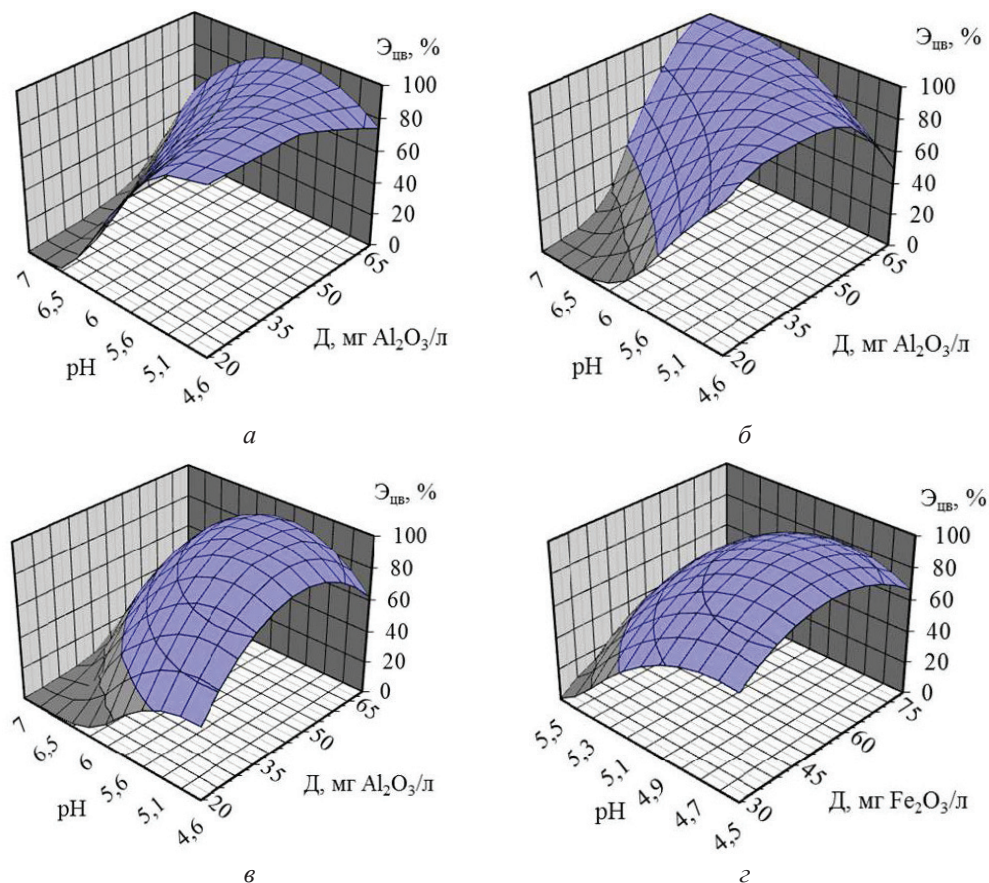


Рис. 2. Влияние дозировки коагулянта и pH на эффективность очистки по цветности: *а* – СА, *б* – ОХА, *в* – АКК, *г* – СЖ

Fig. 2. Impact of the Coagulant and pH Dosing on the Colority Efficiency *a* – aluminum sulfate, *б* – aluminum chloride oxide, *в* – aluminium potassium sulfate, *г* – ferric sulfate

Заключение

1. Метод планированного эксперимента позволяет получить адекватные модели для оценки эффективности коагуляционной очистки.

2. Существенное влияние на показатели очистки лигнинсодержащей воды оказывают pH и дозировка коагулянта. Продолжительность обработки коагулянтom в исследованном интервале (1...4 мин) на степень очистки практически не влияет.

3. Определены оптимальные условия очистки лигнинсодержащей сточной воды различными коагулянтами по показателям: содержание лигнина и цветность. Максимальные значения эффективности очистки, как по лигнину, так и по цветности были получены при использовании оксихлорида алюминия – 98 % и 99 % соответственно, который можно рекомендовать в качестве реагента для очистки лигнинсодержащей воды. Оптимальные условия очистки: pH

после введения реагентов 6,7...7,0, дозировка коагулянта – 50...55 мг Al_2O_3 /л, продолжительность перемешивания с коагулянтом – не менее 1 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.И., Селянина С.Б., Богданович Н.И. Сорбционные свойства лиственных и хвойных сульфатных лигнинов // Химия растительного сырья. 2012. № 2. С. 33–39.
2. Байбородин А.М., Воронцов К.Б., Богданович Н.И. Коагуляционная очистка сильнозагрязненного стока ДППЦ-3 ОАО «Архангельский ЦБК» // Лесн. журн. 2012. № 4. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Байбородин А.М., Воронцов К.Б., Богданович Н.И. Разработка системы локальной очистки сильнозагрязненных сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий // Вода: химия и экология. 2011. № 8. С. 16–21.
4. Богданович Н.И. и др. Планирование эксперимента в примерах и расчетах // Архангельск: Изд-во САФУ, 2010.
5. Варакин Е.А. и др. Влияние сточных вод производства целлюлозы на окислительную способность микроорганизмов очистных сооружений // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 7.
6. Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурин Л.В. Очистка промышленных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. 272 с.
7. Дягилева А.Б., Чернобережский Ю.М. Коллоидно-химические аспекты очистки сточных вод от примесей лигнинов. Ч. 2 // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 8. С. 74–78.
8. Линевиц С.Н., Гетманцев С.В. Коагуляционный метод водообработки. М.: Наука, 2007.
9. Личутина Т.Ф. Экологическая оценка деятельности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Перспективные направления утилизации отходов / Т.Ф. Личутина, К.Г. Боголицын, М.А. Гусакова // Рос. хим. журн. 2011. Т. 55, № 1. С. 101–107.
10. 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).
11. Хабаров Ю.Г. Методы определения лигнинов // Лесн. журн. 2004. № 3. С. 86–102. (Изв. высш. учеб. заведений).
12. Штамм Е.В. и др. Природа токсического воздействия сточных вод предприятий целлюлозно-бумажного производства на водные экосистемы // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 6. С. 22. DOI: 10.7868/S0207401X15060072
13. Birjandi N., Younesi H., Bahramifar N. Treatment of Wastewater Effluents From Paper-recycling Plants by Coagulation Process and Optimization of Treatment Conditions With Response Surface Methodology. *Applied Water Science*, 2016, vol. 6, no.4. pp. 339–348.
14. Chernoberezhskii Y.M. et al. Recovery of Kraft Lignin From Aqueous Solutions with Oxotitanium Sulfate, Aluminum Sulfate, and Their Mixture. *Russian journal of applied chemistry*, 2002, vol. 75, no.10, pp. 1696–1699.
15. Irfan M. et al. The Removal of COD, TSS and Colour of Black Liquor by Coagulation-Flocculation Process at Optimized pH, Settling and Dosing Rate. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, vol. 10, pp. S2307–S2318.
16. Kamali M., Khodaparast Z. Review on Recent Developments on Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, vol. 114, pp. 326–342.
17. Lindholm-Lehto P.C. et al. Refractory Organic Pollutants and Toxicity in Pulp and Paper Mill Wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 9, pp. 6473–6499.
18. Tir M., Moulai-Mostefa N. Optimization of Oil Removal From Oily Wastewater by Electrocoagulation Using Response Surface Method. *Journal Of Hazardous Materials*, 2008, vol. 158, no.1, pp. 107–115.

19. *Trinh T.K., Kang L.S.* Application of Response Surface Method as an Experimental Design to Optimize Coagulation Tests. *Environmental Engineering Research*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 63–70.

20. *Trinh T.K., Kang L.S.* Response Surface Methodological Approach to Optimize the Coagulation–Flocculation Process in Drinking Water Treatment. *Chemical Engineering Research And Design*, 2011, vol. 89, no. 7, pp. 1126–1135.

Поступила 19.06.19

UDC 628.31

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.

Influence of Coagulation Treatment on the Efficiency of Lignin Containing Wastewater Purification

E.L. Sedova, Postgraduate Student; ORCID: [0000-0003-0903-7304](https://orcid.org/0000-0003-0903-7304)

K.B. Vorontsov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-2313-2019](https://orcid.org/P-2313-2019), ORCID: [0000-0001-6369-7245](https://orcid.org/0000-0001-6369-7245)

S.A. Burkova, Master; ORCID: [0000-0003-1710-8280](https://orcid.org/0000-0003-1710-8280)

Nothern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: lelenasedova@mail.ru, k.vorontsov@narfu.ru, burkovasv@bk.ru

An effective way to remove lignin substances from the effluents of pulp and paper mills is the coagulants treatment. According to the local treatment scheme, lignin-containing waste water is treated separately, i.e. before mixing with the general flow of the enterprise. To study the efficiency of the process of coagulation of lignin by aluminum- and iron-containing reagents, it is proposed to apply the response surface methodology, namely – the rotatable central composition plan of the second order for three factors. The object of research was model water containing 400 mg/l sulfate lignin. The effect of coagulant dosage, pH and duration of wastewater treatment on the degree of lignin and chromaticity purification was studied. All the derived models were verified to be adequate. Response surfaces were constructed to demonstrate the effect of regime parameters on the output characteristics. It was found that pH and coagulant dosage have a significant effect on the efficiency of lignin removal. The optimal pH and dosage intervals for the studied reagents were determined: aluminum sulfate and oxychloride, aluminum alum and iron sulfate (III). The duration of coagulant treatment in the range from 1 to 4 minutes has no effect on the degree of purification. The best results were obtained using aluminum oxychloride: lignin and chromaticity purification efficiency exceeded 90 % under the following optimal conditions: pH 6,7...7,0, dosage – 50...55 mg Al₂O₃/l.

For citation: Sedova E.L., Burkova S.A., Vorontsov K.B. Influence of Coagulation Treatment on the Efficiency of Lignin Containing Wastewater Purification. *LesnoyZhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp.159–167. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.4.159

Keywords: coagulation, coagulant, wastewater treatment, planned experiment, pulp and paper industry

REFERENCES

1. Andreev A.I., Selyanina S.B., Bogdanovich N.I. Sorption Properties of the Short- and Long Fiber Sulfate Lignins. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2012, no. 2, pp. 33–39.

*The article was published in the framework of implementation the development program of scientific journals in 2019.

2. Bayborodin A.M., Vorontsov K.B., Bogdanovich N.I. Coagulation Treatment of Heavily Polluted Flow at DPC-3 “Arkhangel’sk Pulp and Paper Mill, PLC”. *Lesnoy Zhurnal*, 2012, no. 4.
3. Bajborodin A.M., Voroncov K.B., Bogdanovich N.I. Elaboration of the System of the Heavily Polluted Flows Treatment at a Pulp and Paper Mill. *Water: Kimiya i Ekologiya*, 2011, no. 8, pp. 16–21.
4. Bogdanovich N.I. et al. Design of Experiment in the Examples and Calculations. Arkhangelsk, NARFU Publ., 2010.
5. Varakin E.A. et al. Impact of The Waste Water of a Pulp Production on the Oxidizing Ability of the Microorganisms at the Sewage Treatment Plant. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol.18. no. 7.
6. Getmancev S.V., Nechaev I.A., Gandurina L.V. Treatment of the Industrial Waste Water by the Means of Coagulants and Flocculants. Moscow, Association of the Construction Engineering Institutes Publ., 2008.
7. Dyagileva A.B., Chernoberezhskij Yu.M. Colloidal-Chemical Aspects of the Lignin Impurities Clearing of the Waste Water. Part 2. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*. 2009, no.8. pp. 74–78.
8. Linevich S.N., Getmancev S.V. Coagulative Method of Water Treatment. Moscow, Nauka Publ., 2007.
9. Lichutina T.F. Ecological Assessment of the Pulp and Paper Enterprises Activity. Advanced Direction of the Effluents Recovery. *Rossijskiy khimicheskiy zhurnal*, 2011, no. 1, pp. 101–107.
10. Smirnova A.I., Dyagileva A.B. Mechanism of Formig of the Organo-mineral Structures Based on the Sulfate Lignin and Aluminium-containing Components. *Lesnoj Zhurnal*, 2011, no. 6, pp. 112–118.
11. Khabarov Yu.G. Lignins Determination Methods. *Lesnoj Zhurnal*, 2004, no. 3, pp. 86–102.
12. Shtamm E.V. et al. Character of the Toxic Impact of the Pulp and Paper Mills Waste Water on the Hydrologic Systems. *Khimicheskaya Fizika*. 2015, vol. 34, no. 6, p. 22.
13. Birjandi N., Younesi H., Bahramifar N. Treatment of Wastewater Effluents From Paper-recycling Plants by Coagulation Process and Otimization of Treatment Conditions With Response Surface Methodology. *Applied Water Science*, 2016, vol. 6, no.4. pp. 339–348.
14. Chernoberezhskii Y.M. et al. Recovery of Kraft Lignin From Aqueous Solutions with Oxotitanium Sulfate, Aluminum Sulfate, and Their Mixture. *Russian journal of applied chemistry*, 2002, vol. 75, no.10, pp. 1696–1699.
15. Irfan M. et al. The Removal of COD, TSS and Colour of Black Liquor by Coagulation–Flocculation Process at Optimized pH, Settling and Dosing Rate. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, vol. 10, pp. S2307–S2318.
16. Kamali M., Khodaparast Z. Review on Recent Developments on Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, vol. 114, pp. 326–342.
17. Lindholm-Lehto P.C. et al. Refractory Organic Pollutants and Toxicity in Pulp and Paper Mill Wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 9, pp. 6473–6499.
18. Tir M., Moulai-Mostefa N. Optimization of Oil Removal From Oily Wastewater by Electrocoagulation Using Response Surface Method. *Journal Of Hazardous Materials*, 2008, vol. 158, no.1, pp. 107–115.
19. Trinh T.K., Kang L.S. Application of Response Surface Method as an Experimental Design to Optimize Coagulation Tests. *Environmental Engineering Research*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 63–70.
20. Trinh T.K., Kang L.S. Response Surface Methodological Approach to Optimize the Coagulation–Flocculation Process in Drinking Water Treatment. *Chemical Engineering Research And Design*, 2011, vol. 89, no. 7, pp. 1126–1135.

УДК 676.085.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.168

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СМОЛЫ ПРИ ОБЕССМОЛИВАНИИ СУЛЬФАТНОЙ ЛИСТВЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**Р.А. Смит, аспирант; ResearchID: O-2661-2019, ORCID: 0000-0002-9665-4636**Е.Ю. Демьянцева, канд. хим. наук, доц.; ResearchID: P-5165-2019, ORCID: 0000-0001-9570-1827**О.С. Андранович, аспирант; ResearchID: P-5570-2019, ORCID: 0000-0002-7947-7068*

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;
e-mail: zz1234567@yandex.ru, demyantseva@mail.ru, ilonichka3377@mail.ru

Липкие включения, присутствующие на волокне, подчас создают серьезные препятствия, называемые «смоляными затруднениями». В настоящее время не существует универсального и действенного метода для их устранения. Предлагаемый способ обработки целлюлозы синергетическими смесями поверхностно-активных веществ и ферментов позволит сочетать в себе как традиционные, так и прогрессивные технологии обессмоливания. Для оценки качества работы таких композиций в работе проанализировано влияние как самих смесей, так и их индивидуальных компонентов на состояние смолы в сульфатной небеленой лиственной целлюлозе. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что проблемы со смолой особо остро проявляются именно при производстве данного волокнистого полуфабриката. Общая смолистость целлюлозы была определена экстракционно-гравиметрическим методом. Состояние смолы (коагулированная, капсулированная или диспергированная) оценивалось методом микроскопии. Установлено, что обессмоливающее действие неионогенных ПАВ взаимно активируется при их совместном присутствии. Однако при действии смеси неионогенного ПАВ и фермента липазы наблюдается небольшое снижение общей смолистости. Тем не менее независимо от природы веществ все реагенты проявили хорошие диспергирующие свойства. Показано снижение содержания коагулированной смолы средних размеров при одновременном росте количества диспергированной смолы и при практически полном отсутствии крупных смоляных агломератов, что наиболее важно для обессмоливания. Тенденция изменения состояния смолы при действии синергетической смеси неионогенных ПАВ, вероятно, обусловлена диффузионно-солюбилизационным механизмом обессмоливающего действия. Анализ обессмоливающего действия выбранных реагентов и их смесей показал, что имеющиеся исследования по проблеме снижения смолистости целлюлозы смесями ферментов и ПАВ не дают исчерпывающей оценки и необходимо детальное исследование многофакторного процесса обессмоливания.

Для цитирования: Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С. Анализ состояния смолы при обессмоливании сульфатной лиственной целлюлозы // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 168–178. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.168

Ключевые слова: обессмоливание, частицы смолы, синергетические смеси, микроскопия, экстракция.

*Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 году.

Введение

Проблема «смоляных затруднений», несмотря на свою многолетнюю историю, так и не нашла универсального и радикального решения. Необходимо разносторонне исследовать влияние обессмоливающих добавок на основные параметры, которые могут быть информативны при разработке технологии снижения смолистости волокнистых полуфабрикатов.

Широко распространенный опыт применения поверхностно-активных веществ (ПАВ) различной природы в процессе делигнификации древесины не дает требуемого уровня содержания смолы в сульфатной целлюлозе [3, 17].

Применение фермента липазы зачастую позволяет успешно снижать смолистость целлюлозы, а также является более экологически безопасным способом по сравнению с ПАВ [2], что соответствует направлениям развития наилучших доступных технологий [9, 12]. Однако он не лишен недостатков: высокой стоимости реагента и условий его применения [14].

Совместное использование ПАВ и ферментов в виде синергетических смесей предполагает лучшее обессмоливающее действие. Известно множество работ в области взаимодействия амфифильных соединений различной природы и ферментов, в том числе липазы. Однако противоречивость данных не позволяет прогнозировать поведение таких систем при производстве волокнистых полуфабрикатов [13, 15, 16, 18, 19, 20]. В связи с этим необходимо моделирование процесса эффективного взаимодействия в системе ПАВ-липаза.

Не всегда большая смолистость целлюлозы приводит к смоляным затруднениям. Зачастую небольшое ее содержание промотирует образование смоляных отложений. Особую роль играет дисперсный состав смоляных частиц. Мелкие частицы способны забивать поры паренхимных клеток, что приводит к невозможности их удаления из волокна. Скопление же больших частиц может послужить «центром нарастания» агрегатов, которые впоследствии осядут на оборудовании.

Основой создания любой технологии обессмоливания является исследование воздействия реагентов на показатели содержания смолы в целлюлозе. Настоящая работа посвящена установлению степени согласованности между данными химического и микроскопического анализа.

Объекты и методы исследования

В работе были использованы образцы сульфатной небеленой лиственной целлюлозы (International paper, Светогорск), при производстве которой проблема отложений смолы является наиболее острой. Содержание экстрактивных веществ в целлюлозе составило 0,70 %.

Обессмоливающими реагентами были выбраны следующие вещества: неионогенные ПАВ отечественного производства синтанол ДС-10 (смесь полиоксиэтиленгликолевых эфиров синтетических первичных высших жирных спиртов фракции С12–С14) и синтаמיד-5 (смесь полиоксиэтилированных эфиров моноэтаноламидов синтетических жирных кислот кокосового масла фракции С7–С17), а также препарат липазы Lipex 100L (Novozymes, Дания). Биоразлагаемость неионогенных ПАВ синтанола ДС-10 и синтамида-5 составляет 78 и 65...70 % соответственно [1].

Коллоидно-химические характеристики выбранных веществ были определены на основании исследования изотерм поверхностного натяжения, полученных методом отрыва кольца дю-Ну и в работе [10].

Для обессмоливания целлюлозы 2 г воздушно-сухого полуфабриката выдерживали в 100 см³ раствора ПАВ из расчета 1 кг/т а. с. ц. или раствора фермента из расчета 0,5 кг/т а. с. ц. при температуре 60 °С в течение 1 ч. После промывки дистиллированной водой сушили на воздухе.

Для определения общего количества смолы в целлюлозе применяли стандартный экстракционно-гравиметрический метод [4]. Степень обессмоливания (СО, %) рассчитывали по следующей формуле:

$$CO = 100 - \left(\frac{E_2 \cdot 100}{E_1} \right),$$

где E_1 – массовая доля смол и жиров до обработки целлюлозы, % к а. с. ц.; E_2 – массовая доля смол и жиров после обработки целлюлозы, % к а. с. ц.

Аддитивный вклад (АВ) каждого компонента в обессмоливающих композициях определяли согласно формуле:

$$AB = (\omega_1 \cdot CO_1) + (\omega_2 \cdot CO_2),$$

где $\omega_{1,2}$ – доля компонентов 1 и 2 в обессмоливающей смеси; $CO_{1,2}$ – степень обессмоливания при действии каждого компонента в обессмоливающей смеси.

Дисперсный состав смоляных частиц в целлюлозе определяли микроскопическим методом [6, 8] с использованием светового автономного микроскопа с камерой «БИОМЕД-6» (препараты рассматривали на окуляре WF10X и объективах 10×0,25 и 40×0,65) при помощи программного обеспечения «ScoreТес». Метод заключается в окрашивании частиц смолы спирто-ацетоновым раствором препарата судан-III и подсчете количества частиц определенного размера. В соответствии с дисперсностью частицы смолы были распределены на следующие группы: диспергированная (свободная), коагулированная (осевшая на волокнах) и внутриволоконная (капсулированная). Коагулированную смолу идентифицировали как агрегаты, закрепленные на волокне (рис. 1); капсулированная смола окрашена в желто-красный цвет (рис. 2); диспергированная смола выглядит как множество мелких частиц, расположенных на небольшом участке волокна (рис. 3).



a

*б**б*

Рис. 1. Вид коагулированной смолы: *а* – размер 7,5...25 мкм;
б – размер 5,0...7,5 мкм; *в* – размер 28...165 мкм

Fig. 1. Imagery of a Coagulated Resin: *a* – size 7,5...25 mcm;
б – size 5,0...7,5 mcm; *в* – size 28...165 mcm



Рис. 2. Вид капсулированной смолы
Fig. 2. Imagery of an Encapsulated Resin



Рис. 3. Вид диспергированной смолы (до 5,0 мкм)

Fig. 3. Imagery of a Dispersed Resin (to 5.0 mcm)

На основании предварительной статистической обработки экспериментального материала для определения дисперсного состава смолы и обеспечения заданной точности и надежности было взято по 700 волокон целлюлозы. Количество смолы каждой группы оценивалось в процентном содержании относительно обработанного волокна.

Количество липких включений на волокне напрямую зависит от объема использованной промывной воды, длительности и интенсивности промывки. Степень промывки контролировали спектрофотометрическим исследованием промывных вод.

Результаты исследования и их обсуждение

При прогнозировании эффективности применения различных амфифильных соединений в качестве интенсифицирующих обессмоливание добавок было убедительно установлено [5, 7], что именно коллоидно-химические параметры являются объективными критериями их подбора в виде смесей различного состава. Критическая концентрация мицеллообразования (ККМ), поверхностная активность, солюбилизующая и эмульгирующая способности, удельная мицеллярная поверхность позволяют определить оптимальный расход реагента, предопределяют стабилизирующие свойства ПАВ и агрегативную устойчивость смоляных частиц.

При смешении ПАВ в определенных соотношениях следует ожидать активации коллоидно-химических свойств. Так, применение синергетических смесей приводит к улучшенному микроэмульгированию, солюбилизации с образованием устойчивых к коагуляции систем и меньшему расходу обессмоливающих реагентов.

Соотношение компонентов смеси было выбрано в соответствии с установленным максимальным синергетическим эффектом по основным коллоидно-химическим характеристикам [10]. Наибольшим синергизмом обладает смесь неионогенных ПАВ синтанол ДС-10–синтамид-5 в соотношении 70:30

соответственно. Также было определено, что наибольшее отклонение от аддитивных значений в бинарной смеси ПАВ–фермент наблюдается при преимущественном содержании синтаноло ДС-10 в композиции (70 %). Выбранные композиции и индивидуальные компоненты были исследованы в качестве реагентов, обессмоливающих целлюлозу.

Результаты химического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обессмоливающее действие реагентов

Обессмоливающий реагент	Содержание смолы, % к а. с. ц.	Степень обессмоливания / аддитивные значения, %
Без обработки	0,70	–
Синтанол ДС-10	0,43	38 / –
Синтаמיד-5	0,57	18 / –
Lipex 100L	0,22	68 / –
Синтанол ДС-10–синтаמיד-5 (70:30)	0,22	68 / 32
Синтанол ДС-10–Lipex (70:30)	0,39	45 / 47

Установлено, что лучшее обессмоливание в случае НП АВ достигается при использовании их в виде синергетических композиций (фактическое обессмоливание выше расчетного аддитивного значения более чем в 2 раза). Высокая обессмоливающая способность липазы связана с достаточно большим содержанием жиров в составе экстрактивных веществ лиственных пород. Однако совместное применение липазы с синтанолом ДС-10 не привело к снижению общей смолистости сульфатной лиственной целлюлозы по сравнению с индивидуальными веществами. Поскольку к смоляным затруднениям не всегда приводит повышенное общее содержание смолы, а состояние, в котором она находится на волокне, то для уточнения обессмоливающего действия реагентов был проведен микроскопический подсчет смоляных частиц, окрашенных препаратом судан-III.

Содержание капсулированной смолы в целлюлозе представлено в табл. 2. Как видно из приведенных данных, ее количество в зависимости от размера варьируется в пределах 1,3...0,5 % или вообще не меняется.

Таблица 2

Содержание капсулированной смолы в целлюлозе

Обессмоливающий реагент	Содержание смолы, %	
	12...45 мкм	>80 мкм
Исходная целлюлоза	0,3	1,7
Синтанол ДС-10	0,3	0,3
Синтаמיד-5	–	0,3
Lipex 100L	1,0	0,7
Синтанол ДС-10–синтаמיד-5 (70:30)	–	1,5
Синтанол ДС-10–Lipex 100L (70:30)	–	1,5

Вследствие того что содержание данного вида смолы находится в пределах погрешности, при дальнейшем анализе дисперсного состава смолы в целлюлозных волокнах она не рассматривалась. Более детально было проанализи-

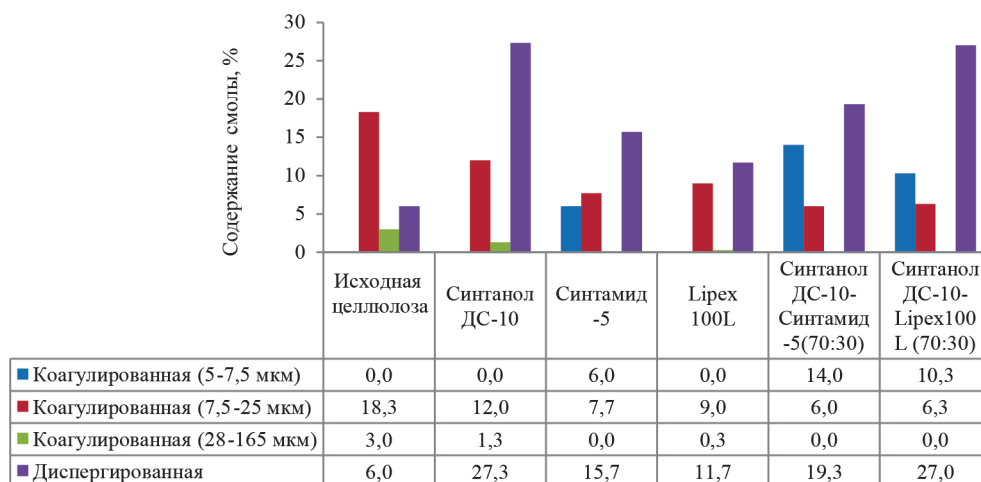


Рис. 4. Содержание коагулированной и диспергированной смолы до и после обработки

Fig. 4. Content of Coagulated and Dispersed Resin Before and After Treatment

Как видно из рисунка, в исходной сульфатной целлюлозе поверхностная смола находится в основном в коагулированном состоянии преимущественно с присутствием частиц больших размеров. Эффективность действия обессмоливающих реагентов оценивалась по увеличению количества диспергированной смолы и уменьшению коагулированной. Несмотря на слабое снижение общей смолистости при действии смеси синтанол ДС-10–Lipex 100L, по данным микроскопического анализа, лучшим обессмоливающим действием обладает именно эта композиция, так как процентное содержание диспергированной смолы увеличилось с 6 до 27 % при полном отсутствии больших частиц коагулированной смолы.

При действии смеси синтанол ДС-10–синтаמיד-5 (70:30) процентное содержание диспергированной смолы поднялось лишь до 19,3 %. Вероятно, это связано с тем, что обессмоливающее действие данной смеси происходит по диффузионно-солюбилизационному механизму, что подтверждается данными по солюбилизационной способности этих систем [10].

Коагулированная смола имеет размеры, которые могут варьироваться от 5 до 165 мкм. Для установления эффективности обессмоливающего действия реагентов было решено разделить коагулированную смолу на три группы по размерам (рис. 1). В первую группу входят частицы размером 5,0...7,5 мкм. Увеличение их процентного содержания говорит о способности обессмоливающего реагента разбивать крупные частицы на более мелкие. Во вторую группу входят частицы среднего размера (7,5...25 мкм), уменьшение процентного содержания которых говорит о том, что частицы переходят в разряд диспергированных. В третью группу входят агломераты, где скопление смолы максимальное и размеры могут превосходить диаметр волокна (28...165 мкм). После обработки поверхностно-активными веществами или липазой крупные частицы коагулированной смолы либо исчезают, либо процентное содержание их становится очень мало. Такая смола диспергируется на частицы, соответствующие второй или первой группе, или переходит в разряд диспергированной. Во всех представленных случаях намного уменьшились крупные скопления смолы, сни-

зилось процентное содержание частиц среднего размера и увеличилось процентное содержание мелких частиц и диспергированной смолы. Независимо от природы веществ все реагенты проявили хорошие диспергирующие свойства. Содержание смолы второй группы снизилось при действии синтанола ДС-10 на 34 %, синтамида-5 – на 58 %, Lірex 100L – на 50 %, а при действии синергетических смесей синтанол ДС-10–синтаמיד-5 – на 67 %, синтанол ДС-10–Lірex 100L – до 66 %. Частицы самых крупных размеров в большинстве случаев исчезли полностью.

Заключение

Рассмотрен вопрос обессмоливания небеленой сульфатной лиственной целлюлозы смесями ферментов с неионогенными ПАВ и показано, что, несмотря на незначительное снижение общего содержания смолы в целлюлозе, действие таких систем вполне может быть эффективным при борьбе с остаточной поверхностной смолой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамзон А.А., Бочаров В.В., Гаевой Г.М. Поверхностно-активные вещества: справочник. Л.: Химия, 1979. 376 с.
2. Болотова К.С., Новожилов Е.В. Применение ферментных технологий для повышения экологической безопасности целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2015. № 3. С. 5–23. DOI: 10.14258/jcprm.201503575.
3. ГОСТ 14940–75. Целлюлоза сульфатная беленая из лиственной древесины (осиновая). Технические условия. Издание официальное. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986.
4. ГОСТ 6841–77. Целлюлоза. Метод определения смол и жиров. М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
5. Ковалева И.Н., Шпензер Н.П., Талмуд С.Л. Пути рационального выбора смесей ПАВ для обессмоливающих добавок, применяемых в процессе сульфитной варки целлюлозы // Журнал прикладной химии. 1983. № 9. С. 2131–2135.
6. Ковтун Т.Н., Хакимов Р.Р. Использование обессмоливающих веществ при варке лиственной сульфатной целлюлозы // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 37–41.
7. Лысогорская Н.П. Научные основы обессмоливания целлюлозы поверхностно-активными веществами: дис. ... д-ра хим. наук: 05.21.03. СПб., 1993. 417 с.
8. Печурина Т.Б., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Комаров В.И. Влияние добавок диспергантов на изменение состояния смолы и содержание экстрактивных веществ в лиственной сульфатной целлюлозе // Лесн. журн. 2003. № 2–3. С. 68–75. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2015. 479 с.
10. Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С. Влияние липазы на мицеллообразующую и солюбилизующую способность неионогенных поверхностно-активных веществ // Изв. вузов. Сер.: Химия и хим. технология. 2018. Т. 61, вып. 6. С. 54–60. DOI: 10.6060/tcct.20186106.5696
11. Buchert J., Mustranta A., Holmbom B. Enzymatic Control of Dissolved and Colloidal Substances During Mechanical Pulping. *Biotechnology in Pulp and Paper Industry*, 8th ICBPPI / Ed. L. Viikari, R. Lantto. 2002, pp. 271–280.

12. Choi J.M., Han S.S., Kim H.S. Industrial Applications of Enzyme Biocatalysis: Current Status and Future Aspects. *Biotechnol Adv.*, 2015, Nov. 15; 33(7):1443–54 DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.02.014
13. Delorme V., Dhouib R., Canaan S., Fotiadu F., Carrière F., Cavalier J. Effects of Surfactants on Lipase Structure, Activity, and Inhibition. *Pharm Res.*, 2011, 28: 1831. DOI: 10.1007/s11095-010-0362-9
14. Gutiérrez A., del Río J.C., Martínez M.J., Martínez A.T. The Biotechnological Control of Pitch in Paper Pulp Manufacturing. *Trends in Biotechnology*, 2001, vol.19, no. 9, pp. 340–348.
15. Helisto P., Korpela T. Effects of Detergents on Activity of Microbial Lipases as Measured by the Nitrophenylalkanoate Esters Method. *Enzyme And Microbial Technology*, 1998, 23:113–117. DOI: 10.1016/S0141-0229(98)00024-6
16. Holmberg K. Interactions Between Surfactants and Hydrolytic Enzymes, Colloids and Surfaces. *Biointerfaces*, vol. 168, 1 August 2018, pp. 169–177. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2017.12.002
17. Hubbe M.A., Rojas O.J., Venditti R.A. Control of Tacky Deposits on Paper Machines – a Review. *Nordic Pulp Paper Res. J.* 2006, vol. 21, no. 2, pp. 154–171. DOI: 10.3183/npprj-2006-21-02-p154-171
18. Jeffries T.W., Viikari L. Enzymes for Pulp and Paper Processing. Washington, DC.: American Chemical Society, 1996. 326 p.
19. Otzen D. Protein-surfactant Interactions: A Tale of Many States // *Biochimica et Biophysica Acta 1814*. 2011, pp. 562–591. DOI: 10.1016/j.bbapap.2011.03.003
20. Reis P., Holmberg K., Watzke H., Leser M.E., Miller R. Lipases at Interfaces: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, no. 147–148. pp. 237–250. DOI:10.1016/j.cis.2008.06.001

Поступила 14.02.19

UDC 676.085.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.168

Analysis of the Resin Forms in the Process of the Short Fiber Sulphate Cellulose Deresination*

R.A. Smith, Postgraduate student; ResearcherID: [O-2661-2019](#), ORCID: [0000-0002-9665-4636](#)
E.Yu. Demyantseva, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-5165-2019](#), ORCID: [0000-0001-9570-1827](#)

O.S. Andranovich, Postgraduate student; ResearcherID: [P-5570-2019](#), ORCID: [0000-0002-7947-7068](#)

Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, 4 Ivana Chernykh St., Saint-Petersburg, 198095, Russian Federation,

e-mail: zz1234567@yandex.ru, demyantseva@mail.ru, ilonichka3377@mail.ru

Sticky inclusions in fiber often create a serious obstruction called as «pitch troubles». At the present time there is no universal and effective method for their elimination. The proposed approach of cellulose treatment with synergistic mixtures of surfactants and enzymes will allow combining both traditional and progressive deresination technologies. The influence of the mixtures of deresination agents and their individual components on the resin forms in the sulphate non-bleached short fiber (leaf) pulp was analyzed to assess the functional efficiency

*The article was published in the framework of implementation the development program of scientific journals in 2019.

of these compositions. The target of research choice is due to the fact that pitch troubles particularly occur in the manufacturing of sulphate short fiber pulp. The total resin content of the cellulose was determined by the extraction-gravimetric method. The resin forms (coagulated, encapsulated or dispersed) were evaluated by microscopy. It has been established that the deresination action of nonionic surfactants is mutually activated in the joint presents. However, a small reduction of total resin content is observed under the deresination action of a mixture of nonionic surfactant and lipase. At the same time, all reagents showed good dispersing properties regardless of their nature. A decrease in the coagulated resin content of medium size with a simultaneous increase in the dispersed resin amount and with the almost complete absence of large resin agglomerates was shown to be most important for deresination. The trend of resin forms under the effect of synergistic mixture of nonionic surfactants is probably due to the diffusion-solubilization mechanism of the deresination action. Analysis of the deresination action of selected reagents and their mixtures has shown that the existing studies on problem of reducing cellulose pitch content with mixtures of surfactants and enzymes does not give an overarching assessment, so a detailed study of the multifactor deresination process is needed.

For citation: Smith R.A., Demyantseva E.Yu., Andranovich O.S. Analysis of resin forms in the process of sulphate hardwood cellulose deresination. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp.168–178. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.168

Keywords: deresination, pitch particles, synergistic mixtures, microscopy, extraction

REFERENCES

1. Abramzon A.A., Bocharov V.V., Gaevoi G.M. Superficially Active Substances: Handbook. Leningrad, Khimiya Publ., 1979. 376 p.
2. Bolotova K.S., Novozhilov E.V. The Use of Enzyme Technologies for The Environmental Safety Improvement of Pulp and Paper Manufacturing. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2015, no. 3. pp. 5–23. DOI: 10.14258/jcprm.201503575
3. GOST 14940–75. *Bleached sulphate short fiber cellulose (aspen). Specifications*. Moscow, Standards Publ., 1986.
4. GOST 6841–77. *Cellulose. Method for Determination of Pitch and Fats*. Moscow, Standards Publ., 1998.
5. Kovaleva I.N., Shpenzer N.P., Talmud S.L. Ways of a Judicious Choice of Sufactant Mixtures for Deresination Agents Used in the Process of Sulfite Pulping. *Journal of Applied chemistry*, 1983, no. 9, pp. 2131–2135.
6. Kovtun T. N., Hakimov R.R. The use of deresination agents during cooking of short fiber sulphate pulp. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 1. pp. 37–41.
7. Lysogorskaja N.P. *Scientific Basis of Surfactant Deresination of the Cellulose*: Doct. Chem. Sci. Diss. Saint-Petersburg, 1993. 417 p.
8. Pechurina T.B., Milovidova L.A., Komarova G.V., Komarov V.I. The Effect of Dispersant Additives on the Change In The Resin Condition and the Extractive Substances Content in Hardwood Sulphate Pulp. *Lesnoy Zhurnal*, 2003, no. 2–3, pp. 68–75.
9. Manufacturing of Pulp, Wood Pulp, Paper, Cardboard: Handbook. Moscow, NDT Bureau Publ., 2015, 479 p.
10. Smit R.A., Dem'janceva E. Ju., Andranovich O.S. Impact of Lipase on Micelle Formation and Solubilization Abilities of Non-Ionic Surfactants. *Khimiya and Khimicheskiye Technologies*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 54-60. DOI: 10.6060/tcct.20186106.5696
11. Buchert J., Mustranta A., Holmbom B. Enzymatic Control of Dissolved and Colloidal Substances During Mechanical Pulping. *Biotechnology in Pulp and Paper Industry*, 8th ICBPPI / Ed. L. Viikari, R. Lantto. 2002, pp. 271–280.

12. Choi J.M., Han S.S., Kim H.S. Industrial Applications of Enzyme Biocatalysis: Current Status and Future Aspects. *Biotechnol Adv.*, 2015, Nov. 15; 33(7):1443-54 DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.02.014
13. Delorme V., Dhouib R., Canaan S. Fotiadu F., Carrière F. Cavalier J. Effects of Surfactants on Lipase Structure, Activity, and Inhibition. *Pharm Res.*, 2011, 28: 1831. DOI: 10.1007/s11095-010-0362-9
14. Gutiérrez A., del Río J.C., Martínez M.J., Martínez A.T. The Biotechnological Control of Pitch in Paper Pulp Manufacturing. *Trends in Biotechnology*, 2001, vol.19, no. 9, pp. 340–348.
15. Helisto P., Korpela T. Effects of Detergents on Activity of Microbial Lipases as Measured by the Nitrophenylalkanoate Esters Method. *Enzyme And Microbial Technology*, 1998, 23:113–117. DOI: 10.1016/S0141-0229(98)00024-6
16. Holmberg K. Interactions Between Surfactants and Hydrolytic Enzymes, Colloids and Surfaces. *Biointerfaces*, vol. 168, 1 August 2018, pp. 169–177. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2017.12.002
17. Hubbe M.A., Rojas O.J., Venditti R.A. Control of Tacky Deposits on Paper Machines – a Review. *Nordic Pulp Paper Res. J.* 2006, vol. 21, no. 2, pp. 154-171. DOI: 10.3183/npprj-2006-21-02-p154-171
18. Jeffries T.W., Viikari L. Enzymes for Pulp and Paper Processing. Washington, DC.: *American Chemical Society*, 1996. 326 p.
19. Otzen D. Protein-surfactant Interactions: A Tale of Many States // *Biochimica et Biophysica Acta 1814*. 2011, pp. 562–591. DOI: 10.1016/j.bbapap.2011.03.003
20. Reis P., Holmberg K., Watzke H., Leser M.E., Miller R. Lipases at Interfaces: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, no. 147–148. pp. 237–250. DOI:10.1016/j.cis.2008.06.001

Received on February 14, 2019

УДК 504.064.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.179

**БИОКОНВЕРСИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА*****К.С. Болотова¹**, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [G-1760-2019](#),*ORCID*: [0000-0002-7916-2410](#)**О.В. Травина²**, стажер-исследователь; *ResearcherID*: [T-2952-2018](#),*ORCID*: [0000-0001-7049-9271](#)**А.С. Аксенов¹**, канд. техн. наук, зав. кафедрой; *ResearcherID*: [C-7289-2015](#),*ORCID*: [0000-0003-1013-1357](#)**М.В. Емельянова¹**, канд. техн. наук, доц.; *ORCID*: [0000-0001-6600-6526](#)**В.А. Рудакова¹**, канд. техн. наук, доц.; *ORCID*: [0000-0002-3447-4226](#)**А.В. Канарский³**, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [O-8113-2016](#),*ORCID*: [0000-0002-3541-2588](#)

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: k.bolotova@narfu.ru, a.s.aksenov@narfu.ru, m.emelyanova@narfu.ru, v.rudakova@narfu.ru

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: travina.oksana136@yandex.ru

³Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420015; e-mail: alb46@mail.ru

Районы Крайнего Севера и Арктики (в состав территории которой входит Архангельская область) характеризуются экстремальными природно-климатическими факторами: низкими температурами зимой, большим суточным перепадом температур, частыми метелями зимой и дождями в летний период. Такие условия существенно влияют на ферментативную активность почвенных микроорганизмов. Цель работы – оценка влияния температуры ферментативной обработки на начальные этапы биоразложения целлюлозосодержащих материалов. В исследовании использовали образцы картонно-бумажной продукции: газетную бумагу с цветной печатью, тарный картон и белую офисную бумагу. Бактериальную целлюлозу получали, культивируя симбиоз бактерий рода *Acetobacter* и дрожжей на глюкозной среде в статических условиях при 25 °С. Для моделирования биоразложения использовали лабораторный ферментный препарат, продуцируемый штаммом микроскопического гриба *P. Verruculosum*. Активность почвенных целлюлаз, инициирующих биоконверсию целлюлозосодержащих материалов в грунтах полигонов хранения твердых бытовых отходов Архангельской области, оказалась низкой и составила менее 10 мкг глюкозы/10 г почвы за 48 ч экспозиции. Определяющим фактором для процесса биоконверсии в условиях Арктического региона является температура почвы. Показано, что при снижении температуры до 5...15 °С скорость биоконверсии целлюлозосодержащих материалов растительного происхождения уменьшается в 2...8 раз по сравнению с температурой 30...50 °С, оптимальной для многих ферментативных процессов. Установлено, что биоконверсия бактериальной целлюлозы до глюкозы слабо зависит от температуры ферментативной обработки в диапазоне 5...15 °С и составляет в среднем 20 % за 1 сутки. **Для цитирования:** Болотова К.С., Травина О.В., Аксенов А.С., Емельянова М.В., Рудакова В.А., Канарский А.В. Биоконверсия целлюлозосодержащих материалов в услови-

*Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 году.

ях Арктического региона// Лесн. журн. 2019. № 4. С. 179–186. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.179

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00855 «Надмолекулярная организация целлюлозных микрофибрилл растительного и бактериального происхождения» с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова и ферментного препарата, предоставленного Институтом биохимии им. А.Н. Баха.

Ключевые слова: биоразложение целлюлозосодержащих материалов, бактериальная целлюлоза, ферментативный гидролиз, целлюлаза.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется использованию биоразлагаемых материалов. Современные технологии изготовления и применения целлюлозосодержащих материалов соответствуют этой тенденции [2, 15]. После использования значительная часть картонно-бумажной продукции депонируется на свалках и подвергается естественному процессу разложения. На полигоны хранения твердых бытовых отходов (ТБО) в больших объемах могут попадать массовые виды такой продукции: газетная бумага, тарный картон и офисная бумага, которые в качестве основного компонента содержат целлюлозу.

Биоразложение целлюлозы является одним из звеньев в цепи превращения органических соединений в компоненты почвы [14]. Данный процесс осуществляется при участии как минимум двух групп микроорганизмов: во-первых, истинных бактерий, миксобактерий и актиномицетов, целлюлолитические ферменты которых действуют на субстрат при контакте с поверхностью клетки; во-вторых, грибной микрофлоры, гидролитическое действие которой на целлюлозу обеспечивается выделяемыми ею внеклеточными целлюлазами [6].

В реальных климатических условиях, особенно в северных регионах, скорость биоразложения существенно зависит от сезона. Главными факторами, влияющими на этот процесс, являются температура и влажность. На биоразложение целлюлозосодержащих материалов влияет их компонентный состав, в том числе наполнители и химикаты, добавленные при изготовлении картонно-бумажной продукции. Важное значение имеет надмолекулярная структура растительной целлюлозы, наиболее устойчивы к ферментативному гидролизу кристаллические участки целлюлозных микрофибрилл. В этой связи представляет интерес сравнение биоразлагаемости растительной и бактериальной целлюлозы, так как бактериальная целлюлоза имеет уникальное строение и особую структуру микрофибрилл [3, 11].

Лабораторное моделирование ферментативных процессов с применением целлюлаз позволяет оценить биоразлагаемость целлюлозных материалов [9]. Особенностью функционирования ферментных систем является возможность работать в определенном интервале температур, в том числе сохранять активность при относительно низкой температуре [12].

Целью работы является оценка влияния температуры ферментативной обработки на начальные этапы биоразложения целлюлозосодержащих материалов.

Объекты и методы исследования

В исследовании использовали образцы картонно-бумажной продукции: газетную бумагу с цветной печатью, тарный картон и белую офисную бумагу. Содержание золы в образцах бумаги и картона измеряли по стандартной методике [4]. Исследование структуры микрофибрилл целлюлозы проводили при помощи электронного растрового микроскопа Zeiss SIGMA VP.

Бактериальную целлюлозу (БЦ) получали, культивируя симбиоз бактерий рода *Acetobacter* и дрожжей на глюкозной среде в статических условиях при 25 °С. БЦ отделяли от культуральной среды и промывали [10]. В опытах использовали влажный образец бактериальной целлюлозы (влажность 96 %).

Для моделирования биоразложения использовали лабораторный ферментный препарат, продуцируемый штаммом микроскопического гриба *P. Verruculosum*. Этот препарат содержит комплекс целлюлаз и обладает также ксиланазной и другими минорными активностями. Предпочтительный температурный интервал действия препарата 40...50 °С (оптимум 42 °С) при pH среды 5,0...5,5 [7].

Образцы целлюлозосодержащих материалов распускали на гомогенизаторе в дистиллированной воде до получения однородной волокнистой суспензии. Концентрация целлюлозы в суспензии составляла 10 г/л (в пересчете на сухое вещество). В суспензию вносили 10 мг/г субстрата, 10 мл 1 М ацетатного буфера для поддержания pH 5, 80 мкл азида натрия и термостатировали при температуре 42, 15 и 5 °С. Через 24 ч отбирали 2 мл суспензии и центрифугировали в течение 2 мин при 6000 об/мин. В надосадочной жидкости определяли восстанавливающие сахара (ВС) по методу Шомоди–Нельсона.

Для определения целлюлолитической активности грунтов использовали метод Багнюка и Щетинской [1], который основан на способности целлюлолитических ферментов почвы расщеплять целлюлозу до глюкозы при инкубации при температуре 35 °С в течение 48 ч. По количеству глюкозы, образовавшейся из натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы, судили о степени целлюлолитической активности почвы, которая выражается в мкг глюкозы/10 г почвы.

Оценку целлюлолитической активности почвы проводили путем анализа активности целлюлаз, продуцируемых почвенными микроорганизмами. В качестве исследуемого материала были взяты образцы почв с нескольких полигонов хранения ТБО, расположенных на территории Архангельской области [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Целлюлазная активность исследуемых образцов почв укладывалась в диапазон 0,6...1,6 мкг глюкозы/10 г почвы, что классифицируется как очень слабая активность (первый тип почв, т. к. полученное значение составляет менее 10 мкг глюкозы/10 г почвы за 48 ч экспозиции). Такой уровень активности почвенных микроорганизмов обуславливает медленный процесс естественного биоразложения целлюлозосодержащих отходов на территориях ТБО.

Эффективность биоразложения зависит от компонентного состава и структуры целлюлозосодержащих материалов. Важную роль играет наличие у целлюлозных микрофибрилл (рис. 1) кристаллических высокоупорядоченных участков и аморфных, менее упорядоченных участков (рис. 1).

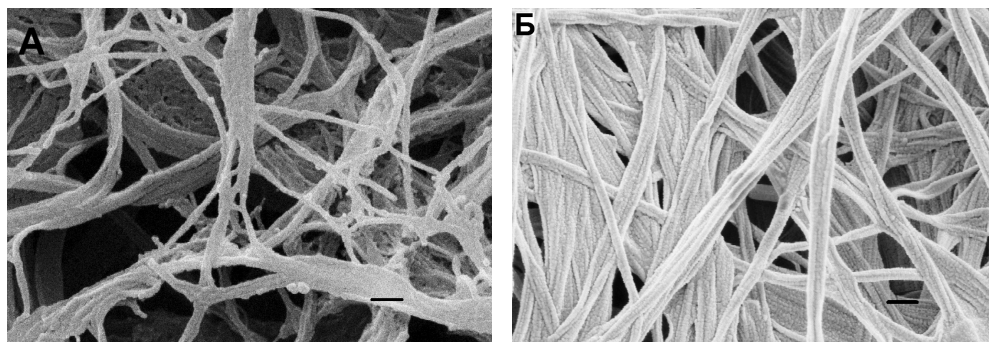


Рис. 1. Микрофибриллы целлюлозы: *A* – листовая беленая сульфатная целлюлоза; *B* – целлюлоза бактериального происхождения. Масштабная линейка 100 нм

Fig. 1. The cellulose microfibrils. *A* – Short fiber bleached cellulose; *B* – The microbially-derived cellulose. Scale rule: 100 nanometer

Установлено статистически близкое распределение размеров микрофибрилл целлюлозы растительного и бактериального происхождения [3].

Однако у бактериальной целлюлозы отсутствует строгая ориентация элементов надмолекулярной структуры. Такая укладка микрофибрилл характерна также для первичной стенки Р клеток растений. Слои вторичной клеточной стенки волокон имеют строго определенную ориентацию микрофибрилл и более плотное строение.

Лимитирующей стадией ферментативного гидролиза (био конверсии) целлюлозы является диффузия ферментного препарата в пористую структуру субстрата. Скорость гидролиза может быть увеличена путем измельчения, аморфизации или разупорядочения целлюлозной матрицы.

Температура является важным фактором ферментативного гидролиза. По информации ФГБУ «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», средняя температура воздуха 15 °С в летних условиях для климата Архангельской области и НАО является характерной. В северных регионах средняя летняя температура почвы на глубине 5...20 см составляет 3...5 °С [8]. Эксперименты были проведены при температуре 42, 15 и 5 °С. При всех выбранных температурах целлюлоза растительного происхождения в составе картонно-бумажных материалов ферментативно разрушается значительно медленнее, чем БЦ (рис. 2).

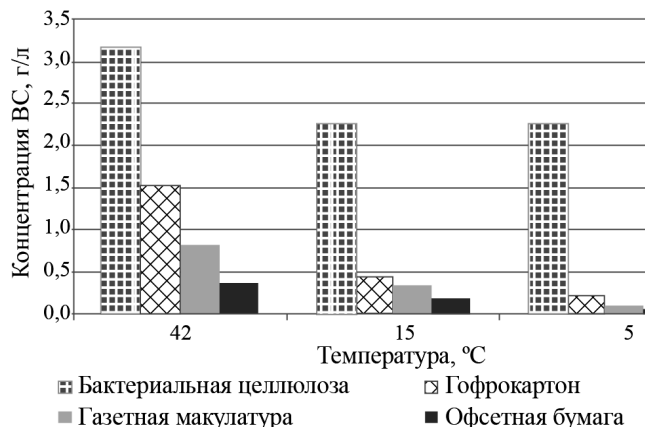


Рис. 2. Разложение целлюлозосодержащих материалов растительного и бактериального происхождения за 24 ч обработки

Fig. 2. Biodegradation of the cellulose-containing materials of phytogenic and microbial origins

БЦ характеризуется лучшей биоразлагаемостью, так как не содержит лигнина, имеет менее плотную упаковку микрофибрилл, низкое содержание нецеллюлозных компонентов. Фактически БЦ может служить эталонным образцом, так как показывает максимально возможную степень конверсии в выбранных условиях. При оптимальной для ферментного препарата температуре 42 °С за сутки степень биоконверсии БЦ была самой высокой и составила 28 % (рис. 2). При снижении температуры до 15 и 5 °С концентрация ВС уменьшилась примерно в 1,4 раза, а степень конверсии БЦ составила в среднем 20 %. Эти результаты показывают, что снижение температуры до 5 °С тормозит, но не прекращает ферментативный процесс.

Биоконверсия целлюлозосодержащих материалов растительного происхождения проходила в значительно меньшей степени. Лучшие результаты получены при биоконверсии газетной бумаги, далее идет тарный картон. Высокое содержание лигнина в газетной бумаге и тарном картоне (табл. 1) [5] связано с использованием для их изготовления химико-механической массы (газетная бумага) или небеленой целлюлозы и полуцеллюлозы (тарный картон).

Таблица 1

Массовая доля лигнина и золы в целлюлозосодержащих материалах

Материал	Массовая доля лигнина, %	Массовая доля золы, %
Газетная макулатура	17...23	0,4
Картон	06...12	4,1
Офисная бумага	0	13,5
Бактериальная целлюлоза	0	6,7

Однако в экспериментах негативное влияние лигнина практически не проявилось. Это связано с тем, что был изучен начальный этап биоконверсии, когда полисахариды на поверхности бумажных материалов легкодоступны для действия ферментов-гидролаз. По сравнению с оптимальной температурой при 15 °С степень биоконверсии снижается в 2 раза, а при 5 °С – в 5...8 раз (рис. 2).

Образцы газетной бумаги и тарного картона под действием ферментного препарата были гидролизованы в большей степени, чем офисная бумага, в состав которой входили только беленые полуфабрикаты. В процессе ферментативной обработки офисной бумаги наблюдали существенное повышение рН – с 5,0 до 7,0. Технология производства этого вида бумаги подразумевает введение в композицию минеральных наполнителей и связующих веществ. В лабораторных условиях из-за наличия в составе карбоната кальция офисная бумага имеет высокую зольность – 13,5 % (табл. 1), что приводит к отклонению рН от оптимального значения и снижению активности фермента. Для почв северных территорий характерно слабокислое значение рН, поэтому избыточная щелочность будет быстро нейтрализована.

Заключение

Почвенные целлюлазы на исследованных участках ТБО Архангельской области обладают низкой активностью, поэтому биоразложение отходов под действием микроорганизмов проходит медленно.

В реальных условиях полигонов хранения ТБО эффективность биоразложения целлюлозосодержащих материалов будет лимитироваться температурой воздуха и почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимova Ф.К., Тухбатова Д.И., Тазетдинова Д.И. Методы определения гидролаз почв и почвенных микроорганизмов: учебно-метод. пособие. Казань: Казан. ун-т, 2010. 67 с.
2. Болотова К.С., Новожилов Е.В. Применение ферментных технологий для повышения экологической безопасности целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2015. № 3. С. 5–23. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprgm.201503575>.
3. Болотова К.С., Чухчин Д.Г., Майер Л.В., Гурьянова А.А. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы // Лесн. журн. 2016. № 6. С. 153–165. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.153.
4. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2: Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2003. 633 с.
6. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества. Н. Новгород: Нижегородская гос. с.-х. академия, 2012. 64 с.
7. Чекушина А.В. Целлюлолитические ферментные препараты на основе грибов *Trichoderma*, *Penicillium* и *Myceliophthora* с увеличенной гидролитической активностью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Ин-т биохимии им. А.Н. Баха РАН, 2013. 23 с.
8. Чертовской В.Г. Еловые леса европейской части СССР: моногр. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 176 с.
9. Chatterjee S., Sharma S., Prasad R.K., Datta S., Dubey D., K Meghvansi M.G., Vairale M., Veer V. Cellulose Enzyme Based Biodegradation of Cellulosic Materials: An Overview (2015) *South Asian J Exp. Biol.*, 5 (6), pp. 271–282, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7485-1_14
10. Kadere T.T., Miyamoto T., Oniang'o R.K., Kutima P.M., Njoroge S.M. Isolation and Identification of the Genera *Acetobacter* and *Gluconobacter* in Coconut Toddy (Mnazi). *African J Biotechnol*, 2008. vol. 7 (16), pp. 2963–2971.
11. Kawecki M., Krystynowicz A., Wysota K., Czaja W., Sakiel S. et al. Bacterial Cellulose Biosynthesis, Properties and Applications. *Proceedings of the International Review Conference Biotechnology, Vienna, Austria*, 2004. pp. 14–18.
12. Lynd L.R., Weimer P.J., van Zyl W.H., Pretorius I.S. Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology *Microbiol Mol Biol Rev*, 2002. vol. 66(3), pp. 506–577. DOI: 10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002.
13. Ojumu T., Solomon V., Bamidele O., Betiku E., Layokun S.K., et al. Cellulose Production by *Aspergillus Flavus* Linn Isolate NSPR 101 Fermented in Sawdust, Bagasse and Corncob. *African J Biotechnol*, 2003. vol. 2, pp. 150–152.
14. Perez J., Munoz-Dorado J., Rubia T. de la, Martinez J. Biodegradation and Biological Treatments of Cellulose, Hemicelluloses and Lignin: an overview. *International Microbiology*, 2002. vol. 5, issue 2, pp.53–63, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>
15. Wierzbna S., Nabrdalik M. Biodegradation of Cellulose in Bottom Sediments of Turawa lake. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2007. vol.41 (1), pp. 227–235.

UDC 504.064.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.179

Bioconversion of the Cellulose-containing Materials in the Arctic Region Conditions

K.S. Bolotova¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-1760-2019](#),
ORCID: [0000-0002-7916-2410](#)

O.V. Travina², Intern-researcher; ResearcherID: [T-2952-2018](#), ORCID: [0000-0001-7049-9271](#)

A.S. Aksenov¹, Candidate of Engineering, Head of the department; ResearcherID: [C-7289-2015](#),
ORCID: [0000-0003-1013-1357](#)

M.V. Emelyanova¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0001-6600-6526](#)

V.A. Rudakova¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: [0000-0002-3447-4226](#)

A.V. Kanarskiy³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-8113-2016](#),
ORCID: [0000-0002-3541-2588](#)

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: k.bolotova@narfu.ru, a.s.aksenov@narfu.ru, m.emelyanova@narfu.ru, v.rudakova@narfu.ru

² Federal State Budgetary Institution of Science of the Federal Research Centre for Arctic Integrated Research named after academician N.P. Laverov, Russian Academy of Sciences, 23 Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: travina.oksana136@yandex.ru

³ Kazan National Research Technological University, 68 K. Marx str., Kazan, 420015, Russian Federation; e-mail: alb46@mail.ru

The regions of the Far North and the Arctic (the territory of which includes the Arkhangelsk region) are characterized by extreme natural and climatic factors: low temperatures in winter, a large daily temperature drop, frequent snowstorms in winter and rains in summer. These conditions significantly affect the enzymatic activity of soil microorganisms. The aim of the work is to assess the effect of the enzymatic treatment temperature on the initial stages of biodegradation of the cellulose – containing materials. The study used samples of cardboard and paper products: newspaper paper with color printing, container cardboard and white office paper. Bacterial cellulose was obtained by cultivating a symbiosis of the genus *Acetobacter* bacteria and yeast on a glucose medium in static conditions at 25 °C. to simulate biodegradation, a laboratory enzyme preparation was used, produced by a strain of a microscopic fungus. The activity of soil cellulases initiating bioconversion of cellulose-containing materials in soils of municipal solid waste storage areas of the Arkhangelsk region was low and amounted to less than 10 µg of glucose/10 g of soil per 48 hours of exposure. The determining factor for the bioconversion process in the Arctic region is the soil temperature. It is shown that while a decrease in temperature to 5...15 °C, the bioconversion rate of cellulose-containing materials of plant origin is reduced by 2...8 times compared to the temperature of 30...50 °C, which is optimal for many enzymatic processes. It was found that bioconversion of bacterial cellulose to glucose is weakly dependent on the temperature of enzymatic treatment in the range of 5...15 °C and averages 20% for 1 day.

Forcitation: Bolotova K.S., Travina O.V., Aksenov A.S., Emelyanova M.V., Rudakova V.A., Kanarskiy A.V. Bioconversion of Cellulose-containing Materials in the Arctic Region Conditions. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 179–186. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.179

Funding: The research was financed by the RFBR within the framework of the scientific project № 18-33-00855 “The supramolecular organization of the cellulose microfibrils of phylogenous and bacterial origin” hardware-assisted by the “Arctic” SC of the Northern

*The article was published in the framework of implementation the development program of scientific journals in 2019.

(Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, with the use of enzymatic agent provided by the Institute of biochemistry named after A.N. Bach.

Keywords: biodegradation of cellulose-containing materials, bacterial cellulose, enzymatic hydrolysis, cellulose.

REFERENCES

1. Alimova F.K., Tuhbatova D.I., Tazetdinova D.I. *Methods for Determination of the Hydrolases of Soils and Soil Microorganisms: Study Guide*. Kazan, Kazan University Publ., 2010, 67 p.
2. Bolotova K.S., Novozhilov E.V. Application of Enzymatic Technologies to Improve the Environmental Safety of Pulp and Paper Production. *Khimija rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of the Vegetable Stock], 2015, no. 3, pp 5–23. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.201503575>
3. Bolotova K.S., Chukhchin D.G., Mayer L.V., Gurya A.G. Morphological features of the fibrous structure of plant and bacterial cellulose. *Lesnoy Zhurnal* [Forest journal], 2016, no. 6, pp. 153–165. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.153
4. Obolenskaya A.V., Elnitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratory Works on Chemistry of Wood and Cellulose*. Moscow, Ecology Publ., 1991. 320 p.
5. *Technology of Pulp and Paper Production*. In 3 vol. Vol. 1 – Raw Materials and Semi-finished Products, Part 2 – Production of Semi-finished Products. St. Petersburg, Polytechnic Publ., 2003. 633 p.
6. Titova V.I., Kozlov A.V. Methods of Evaluation of the Soil Microbiocenosis Functioning, Involved in the Transformation of an Organic Matter. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy Publ., 2012. 64 p.
7. Chekushina A.V. *The Cellulolytic Enzymatic Preparations Based on the Hydrolytic Activity-enhanced Trichoderma, Penicillium and Myceliophthora Fungi*: Cand. Eng. Sci. Diss. (abstract). Moscow, 2013. 23 p.
8. Chertovskaya V.G. *Spruce Forests of the European Part of the USSR*. Moscow, Forest Industry Publ., 1978. 176 p.
9. Chatterjee S., Sharma S., Prasad R.K., Datta S., Dubey D., K Meghvansi M., G Vairale M., Veer V. Cellulose Enzyme Based Biodegradation of Cellulosic Materials: An Overview (2015) *South Asian J Exp. Biol.*, 5 (6), pp. 271–282, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7485-1_14
10. Kadere T.T., Miyamoto T., Oniang'o R.K., Kutima P.M., Njoroge S.M., Isolation and Identification of the Genera Acetobacter and Gluconobacter in Coconut Toddy (Mnazi). *African J Biotechnol*, 2008. vol. 7 (16), pp. 2963–2971.
11. Kawecki M., Krystynowicz A., Wysota K., Czaja W., Sakiel S. et al. Bacterial Cellulose Biosynthesis, Properties and Applications. *Proceedings of the International Review Conference Biotechnology, Vienna, Austria*, 2004. pp. 14–18.
12. Lynd L.R., Weimer P.J., van Zyl W.H., Pretorius I.S. Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology *Microbiol Mol Biol Rev*, 2002. vol. 66(3), pp. 506–577. DOI: 10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002.
13. Ojumu T., Solomon V., Bamidele O., Betiku E., Layokun S.K., et al. Cellulose Production by *Aspergillus Flavus* Linn Isolate NSPR 101 Fermented in Sawdust, Bagasse and Corncob. *African J Biotechnol*, 2003. vol. 2, pp. 150–152.
14. Perez J., Munoz-Dorado J., Rubia T. de la, Martinez J. Biodegradation and Biological Treatments of Cellulose, Hemicelluloses and Lignin: an overview. *International Microbiology*, 2002. vol. 5, issue 2, pp.53–63, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>
15. Wierzbna S., Nabrdalik M. Biodegradation of Cellulose in Bottom Sediments of Turawa lake. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2007. vol.41 (1), pp. 227–235.

Received on September 19, 2018



УДК: 581.1:582.632.2(478)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.187

ОЦЕНКА ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТИ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО И ДУБА СКАЛЬНОГО И СТЕПЕНИ ИХ АДАПТАЦИИ К ВЛИЯНИЮ ТЕПЛООВОГО ШОКА*

П.А. Куза, д-р биол. наук, проф.

Государственный университет Республики Молдова, ул. А. Метеевич, д. 60, г. Кишинев, Республика Молдова; e-mail: petrucuza@mail.ru

Листья дуба скального (*Quercus petraea* Liebl.) и дуба черешчатого (*Q. robur* L.) подвергались тепловому шоку разными высокими температурами. Повреждения клеточных структур листьев, вызванные термическим шоком, определяли методом утечки электролитов. У исследованных видов дуба наблюдалось сигмоидальное увеличение утечки электролитов из тканей листьев в зависимости от применяемых высоких температур. Листья дуба черешчатого, по сравнению с дубом скальным, проявили повышенную устойчивость к высоким температурам, что позволяет заключить, что термотолерантность дуба черешчатого выше, чем у дуба скального. Полученные результаты свидетельствуют, что метод утечки электролитов может быть применен для определения различий термоустойчивости видов дуба, которые произрастают в разных условиях местообитания, а также которые растут в аналогичных экологических условиях. Эксперименты фракционирования дозы термического шока позволили оценить эффект влияния первой дозы на процесс адаптации листьев дуба скального после разных временных периодов от ее применения. Состояние листьев зависело от трех составляющих, которые характеризовали эффект фракционирования: значения первой фракции дозы (1), значения второй фракции дозы (2), промежуток времени между двумя термическими фракциями (3). Суммарный эффект фракционирования термической дозы зависит от баланса между протеканием деградационных и восстановительных процессов. После обработки проб умеренными дозами термического шока доминировали адаптационные процессы, вследствие чего возрастала термоустойчивость листьев после применения первой термической дозы. После применения высоких доз преобладали деградационные процессы, что привело к уменьшению термоустойчивости листьев. Полученные результаты позволили заключить, что метод фракционирования дозы термического шока позволяет оценить начальную термоустойчивость и степень адаптации листьев. Специфическое проявление процессов, которые выявляют начальную и адаптивную термоустойчивость вследствие сезонной вариации температур, определяют выживание растений в аридных условиях. **Для цитирования:** Куза П.А. Оценка термоустойчивости дуба черешчатого и дуба скального и степени их адаптации к влиянию теплового шока // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 187–199. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.187

Ключевые слова: *Quercus robur* L., *Q. Petraea* Liebl., термоустойчивость, листья, тепловой шок.

*Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 году.

Введение

В ходе эволюции растения с помощью различных генетических и физиологических механизмов адаптировались к определенным специфическим условиям среды обитания, в которой они живут [7]. Виды растений не распространяются на земной поверхности случайным образом, но образуют растительные сообщества с хорошо выраженными структурой и составом, которые развили совместные адаптационные возможности для выживания в сходных условиях окружающей среды. В то же время растения выработали ряд **защитных** механизмов и систему **адаптационных** приспособлений, необходимых для выживания в различных условиях окружающей среды. У растений эти приспособления проявляются как реакция на вредное воздействие факторов стресса посредством ряда механизмов морфологической адаптации, а также начальной биохимической и физиологической защиты и ответной реакции, вызванной стрессом [14, 19].

В период активной вегетации растения могут подвергаться воздействию температурного стресса различной интенсивности. Поэтому в процессе эволюции у растений сформировалось несколько механизмов защиты от негативного влияния неблагоприятных температур [15, 19]. Приспособление растений к влиянию неблагоприятных температурных условий включает в себя стратегии **предотвращения** (уменьшения) влияния стрессового фактора (ксероморфная структура и опушенность листьев, разные сроки распускания листьев, глубоко проникающие корни) [4, 11, 17], а также функциональные факторы адаптации (биохимические) [10, 13]. Среди них можно отметить механизмы репарации поврежденных клеточных структур и адаптации клеточного генома, то есть способность растений повышать термоустойчивость в ответ на воздействие высоких температур [1, 5].

Для того чтобы понять механизмы адаптации растений к неблагоприятным воздействиям факторов окружающей среды, в настоящее время изучаются их реакции на различном иерархическом уровне, начиная с исследований на популяционном и заканчивая исследованиями на молекулярном уровне. Для определения устойчивости растений к влиянию температурного воздействия посредством теплового шока исследователи уделяют особое внимание биохимическим, физиологическим и генетически-молекулярным аспектам стресса [18, 25]. Эффективным и быстрым способом определения способности растений восстановить вызванные стрессом поврежденные клеточные структуры и акклиматизироваться (быстро адаптироваться посредством компенсаторных механизмов и активации метаболических процессов [19]) к новым условиям является метод **фракционирования дозы теплового шока** [12]. Этот метод используют посредством разделенного (фракционированного) применения дозы теплового шока, то есть через определенные временные промежутки инкубации проб температурой первой дозы применяют вторую дозу теплового шока. После сравнения эффекта однократной дозы с эффектом, полученным при применении 2-й фракции, определяется кинетика процесса адаптации растений (которая проявляется в увеличении устойчивости в период после применения первой дозы) или усиление повреждений (когда после применения первой дозы повреждения увеличиваются) [10, 12].

Таким образом, при фракционировании дозы теплового шока кинетику процесса адаптации можно анализировать исходя из величины первой дозы, при которой начальная устойчивость растений определяется значением дозы, после которой процессы репарации/адаптации клеточных структур преобладают над теми, которые вызывают повреждения. Также выявление процессов, при которых способность растений к адаптации не проявляется в период после применения губительной первой фракции дозы фактора стресса.

Объекты и методы исследования

Первый эксперимент был проведен для того, чтобы оценить влияние температуры на начальную устойчивость листьев изучаемых видов дуба.

Сбор побегов с листьями проводили в первой декаде июля (в 4-кратной повторности) на территории кишиневского Ботанического сада Академии наук Республики Молдова с одного дерева, взятого для дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и дуба скального (*Q. petraea* Liebl.). Листья с побегов брали методом случайной выборки, промывали в дистиллированной воде, после чего с апикальной части листовой пластинки брали круглые высечки диаметром 9 мм.

Испытывали 15 градаций температур в диапазоне от 25 до 100 °С. Для каждой температурной градации брали по 3 пробирки с 3 мл деионизированной воды и помещали в водный ультратермостат (*Universal ultrathermostat «UTU-4»*, Венгрия) для нагрева пробирок с жидкостью до температуры заданной градации. Затем в каждую пробирку закладывали по 6 круглых высечек листьев дуба и вновь подвергали нагреву в термостате при той же температуре в течение 5 мин, после чего нагрев быстро прерывали перемещением пробирок в воду комнатной температуры (25 °С). Сразу после охлаждения пробирки помещали в мешалку (*Wstrzasarka uniwersalna typ WU-4*, Польша), где в течение 2 ч их содержимое перемешивалось для обеспечения одинаковой концентрации электролитов в симпластах круглых высечек листовых пластинок и в водном растворе. В эксперименте были предусмотрены два контроля. В первом 3 пробирки с высечками не подвергались тепловому шоку и постоянно перемешивались в течение 2 ч при температуре 25 °С. Другой контроль с пробами листьев был подвержен воздействию температуры в 100 °С в течение 10 мин, чтобы добиться полного распада клеток листа. Проводимость водного раствора была определена при помощи кондуктометра (*N5721*, Польша) во всех вариантах (контрольных и экспериментальных) после 2-часовой утечки электролитов.

Для каждого вида сборы побегов проводили в 4-кратной повторности, лабораторные опыты проводили в 3-кратной повторности и из них для каждой градации температуры вычисляли среднее значение и его стандартное отклонение.

Воздействие теплового шока определялось путем сравнения показателей проводимости раствора в экспериментальных вариантах (подверженные тепловому воздействию в пределах указанных температур) с показаниями контроля (который не подвергался высоким температурам). Значения относительной утечки электролитов ($УЭО_1$) были вычислены при помощи уравнения:

$$УЭО_I = (\mu_t - \mu_{25}) / (\mu_{100} - \mu_{25}),$$

где $УЭО_I$ – относительная утечка электролитов, доли единицы; μ_t – проводимость экспериментальных вариантов (подверженных тепловому шоку при температуре t), в мкС/м; μ_{25} – проводимость контрольного варианта (пробирки с высечками листьев помещены в комнатные условия), в мкС/м; μ_{100} – общая проводимость (измеренная после обработки проб листьев при температуре 100 °С), в мкС/м.

Второй эксперимент имел целью определение процесса адаптации листьев дуба скального в зависимости от заданной температуры и продолжительности теплового шока.

Изначально собранные листья были разделены на несколько частей. Одна часть листьев была помещена в эксикаторы, где им были обеспечены благоприятные условия хранения (температура 25...27 °С, относительная влажность около 90...100 % и ФАР около 20 люкс). Другая часть листьев была помещена в ультратермостат (*Universal ultrathermostat UTU-4*, Венгрия), где они подвергались первой дозе теплового шока при температуре 50 °С в течение 10 и 40 мин. После завершения теплового шока листья вынимали из термостата, охлаждали до комнатной температуры и помещали в эксикаторы для хранения в условиях, описанных выше.

Через интервалы, равные 0, 2, 4, 6, 8, 12 и 24 ч от применения первой дозы теплового шока, из эксикаторов вынимали несколько листьев, не обработанных и обработанных первой дозой теплового шока. С апикальной части листьев брали круглые высечки диаметром 9 мм. Для каждого временного промежутка заранее были приготовлены по 3 пробирки с 3 мл деионизированной воды, предназначенные для двух экспериментальных вариантов (листья ранее были подвержены первой дозе теплового шока при температуре 50 °С в течение 10 и 40 мин) и контрольного варианта (листья не были подвержены тепловому шоку). Каждый набор из 3 пробирок для вышеупомянутых вариантов помещали в термостат и после их нагревания до температуры воды в них закладывали по 6 круглых высечек листьев дуба скального. Таким образом образцы листьев обрабатывали второй дозой теплового шока при температуре 55 °С в течение 10 мин. Тепловой шок прерывали путем погружения пробирок в холодную воду. Далее пробирки всех вариантов выдерживали в течение 2 ч при комнатной температуре для обеспечения утечки электролитов из тканей листьев в водную среду.

После завершения анализов все экспериментальные и контрольные варианты подвергали тепловому шоку при температуре 100 °С в течение 10 мин, чтобы вызвать тотальное разрушение клеточных структур листьев и полную утечку электролитов в водную среду.

По истечении времени, предназначенного для утечки электролитов, при помощи кондуктометра (*N5721*, Польша) у всех контрольных и экспериментальных вариантов была определена проводимость водного раствора. Далее при помощи приведенного ниже уравнения определяли влияние периода инкубации проб листьев при температуре первой дозы в случае фракционирования дозы, а также отдельное влияние первой и второй доз теплового шока.

$$УЭО_{II} = (\mu_T - \mu_{25}) / (\mu_{100} - \mu_{25}),$$

где $УЭО_{II}$ – относительная утечка электролитов, доли единицы; μ_T – проводимость, определенная после применения второй дозы через временные проме-

жутки T после применения первой дозы теплового шока, в мкС/м; μ_{25} – проводимость контрольного варианта (пробирки с высечками листьев помещены в комнатные условия), в мкС/м; μ_{100} – общая проводимость (измеренная после обработки проб листьев при температуре 100 °С), в мкС/м.

Результаты исследования и их обсуждение

Кривые ответа видов дуба на применение разных температур, показанные на рис. 1, свидетельствуют о том, что приведенные графики описываются сигмоидальными кривыми. Очевидно, что эффекты, вызванные тепловым шоком, качественно сходны для листьев обоих видов дуба, но с количественной точки зрения они существенно отличаются. Так, температуры до 50 °С вызвали незначительный уровень утечки электролитов у листьев дуба скального (*фаза I; латентная фаза*). Обработка листьев более высокими температурами теплового шока вызывала значительное увеличение концентрации электролитов. На рис. 1 (*A*) отчетливо выделяется отдельная область, при которой наблюдается всплеск электролитов с ростом температуры термического шока. Эта область лежит в диапазоне температур от 50 до 62 °С (*фаза II; логарифмическая фаза*). Более высокие температуры являются сверхкритическими. Они вызвали небольшие изменения уровня электролитов при повышении температуры и привели к прохождению кривой в стационарное состояние (*фаза III; стационарная фаза*).

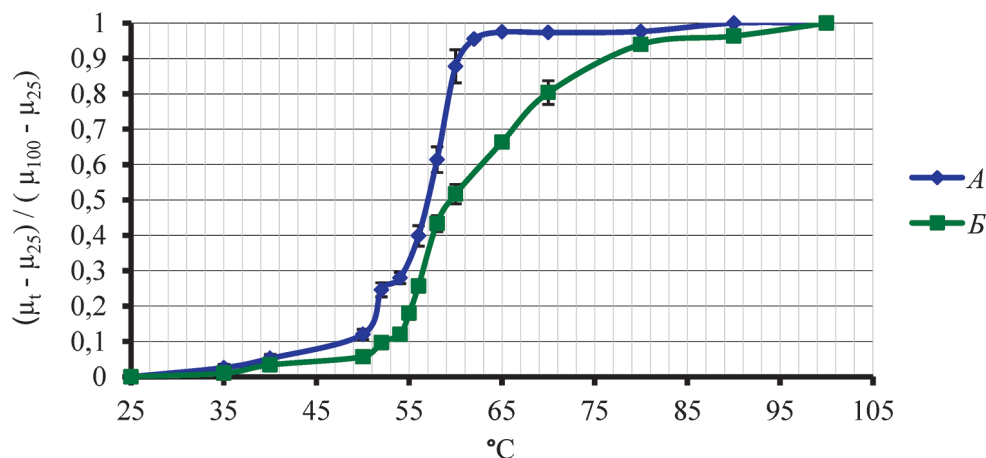


Рис. 1. Утечка электролитов из листьев дуба скального (*A*) и дуба черешчатого (*B*), подверженных тепловому шоку при различных температурах на протяжении 5 мин. Отметки означают средние квадратические отклонения

Fig. 1. Leakage of the electrolytes from the leaves of Rock Oak (*A*) and English Oak (*B*), subjected to heat shock at various high temperatures during 5 min. The marks denote the mean square deviations

У дуба черешчатого температурный диапазон, который вызвал высокую утечку электролитов из проб листьев, значительно шире, чем у дуба скального. Обработка листьев дуба черешчатого температурами до 54 °С привела к малому нарастанию утечки электролитов (*фаза I; латентная фаза*). Это свидетель-

ствует о том, что температуры относительной толерантности клеточных структур листьев дуба черешчатого на 4 °С выше, чем у дуба скального. Обработка листьев дуба черешчатого температурами теплового шока выше 54 °С вызвала бурное повышение концентрации электролитов. Ее диапазон находится в пределах 54...70 °С (*фаза II; логарифмическая фаза*), в котором процессы повреждения клеточных структур становятся угрожающими.

Пороговыми параметрами, описывающими сигмоидальную кривую, являются температуры, которые вызывают 17, 50 и 83 % утечки электролитов. Для дуба скального температуры 51,0; 57,0 и 59,6 °С, которые соответствуют приведенным выше процентам утечки электролитов, являются критическими. Данные, приведенные на рис. 1 (*Б*), показывают, что у листьев дуба черешчатого эти температуры выше и составляют 54,8; 59,2 и 72,3 °С соответственно. В этом диапазоне температур клеточные мембраны теряют угрожающим образом возможность сохранить электролиты с увеличением температуры термического шока.

В целом экспериментальные данные показывают, что относительное положение кривых ответа на повреждения клеточных структур, вызванные тепловым шоком, у дуба скального и дуба черешчатого отличается. Кривая утечки электролитов у дуба черешчатого смещена в сторону более высоких температур в сравнении с дубом скальным. Это свидетельствует о том, что листья дуба черешчатого являются более устойчивыми к высоким температурам, нежели листья дуба скального. Приведенные данные позволяют заключить, что дуб черешчатый в качестве основной лесообразующей породы следует вводить в состав лесных культур в сухих местообитаниях южной части Республики Молдова, где в последние десятилетия проявляется тенденция аридизации климата. В прошлом в этих лесорастительных условиях лесоводы предпочитали создавать акациевые насаждения. Однако частые и продолжительные засухи привели к тому, что акациевые насаждения стали проявлять быстрый рост в высоту лишь до 10...12-летнего возраста, после чего ростовые процессы значительно уменьшались и деревья начинали постепенно усыхать [11].

Аналогичные кривые, описывающие кинетику изменения утечки электролитов в зависимости от изменения температур теплового шока, были описаны для некоторых сельскохозяйственных [16, 20] и древесных растений [9]. Также метод утечки электролитов был применен в лесокультурном деле для определения качества семян различных видов дуба при их хранении в холодных и теплых условиях [8, 21]. Утечка электролитов, вызванная хранением целого растения в холодных условиях, и уменьшение воды в ксилеме послужили индикатором для определения качества семян.

Опыты, описанные далее, были проведены для выявления значения дозы теплового шока, которая позволила выявить, кроме начальной термоустойчивости изучаемых видов дуба, степень адаптации листьев дуба скального. Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что термоустойчивость листьев дуба скального увеличивается после того, как они были подвержены температуре 50 °С в течение 10 мин. Наглядно прослеживается процесс постепенного повышения устойчивости листьев, обработанных первой дозой теплового шока, после их инкубации в благоприятные искусственные условия (температура 25...27 °С, относительная влажность 90...100 % и ФАР около 20 люкс).

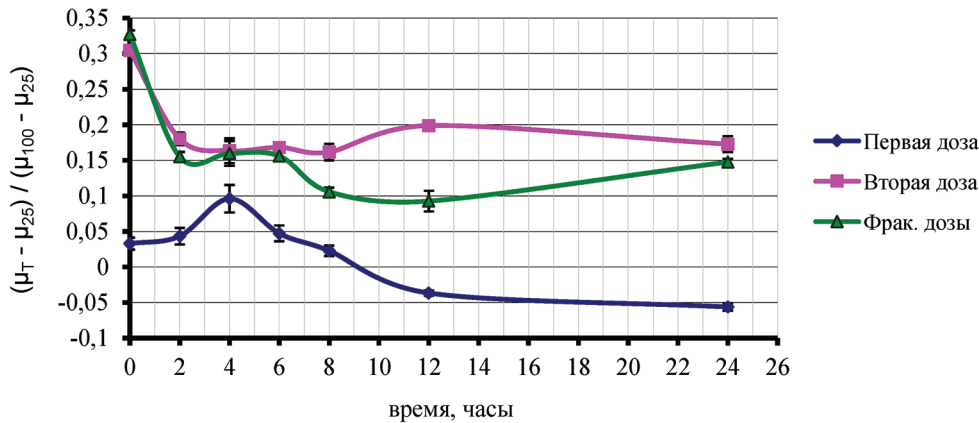


Рис. 2. Влияние промежутка времени между фракциями термического шока с применением температуры 50 °С в течение 10 мин (первая доза) и 55 °С в течение 10 мин (вторая доза) на утечку электролитов из высечек листовых пластинок дуба скального

Fig. 2. Influence of the time interval between fractions of the heat shock at temperature 50 °С within 10 min (first dose) and 55 °С within 10 min (second dose) on the leakage of the electrolytes from the Rock Oak leaf tissues

Когда через определенные промежутки времени после обработки проб листьев первой дозой применяли вторую дозу теплового шока (55 °С в течение 10 мин), проявился адаптивный эффект, то есть уровень утечки электролитов в пробах листьев после применения двойной дозы (фракционировании дозы) был значительно ниже по сравнению с пробами, которые подвергались только второй дозе. Из рис. 2 следует, что эффект фракционирования дозы теплового шока стал выраженным только через 8 часов после применения высокой температуры первой дозы. Максимальный эффект этого явления проявился лишь после 12 часов обработки листьев температурой второй дозы, при этом температура первой дозы теплового шока постепенно снижалась.

Из вышесказанного следует, что проявление эффекта увеличения термоустойчивости листьев требует около 8 ч и этот процесс связан с биохимическими и физиологическими изменениями, которые проявляются на клеточном уровне. Результаты лабораторных экспериментов в рассматриваемой области показали, что предварительная обработка тканей растений при оптимальных температурах повышает термоустойчивость клеточных структур. Более того, было показано, что доза предварительного нагрева должна быть тем выше, чем выше начальная термоустойчивость клеток [3, 6, 22].

Важно отметить, что жаркая погода и длительные засухи, которые наблюдаются в Республике Молдова в последние десятилетия, привели к усыханию некоторых лесообразующих древесных растений в лесных экосистемах. В результате знойной погоды и продолжительной засухи летом 2007 г. сильно пострадал дуб скальный. В ряде лесных массивов порослевого происхождения уже в конце июля были обнаружены деревья дуба скального с признаками завядания листьев. Впоследствии у части деревьев наблюдалась суховершинность, а затем их полное усыхание. Деревья дуба черешчатого оказались более устойчивыми и менее пострадали от высоких температур и засухи [11]. Ввиду того что в последние годы высокие температуры нанесли значительный ущерб лесным культурам, необходимо проводить научные исследования, которые по-

зволюли бы определить жароустойчивость видов дуба для их дальнейшего выращивания с учетом тенденции потепления климата.

На основании результатов, представленных на рис. 2, в нашем более позднем эксперименте решили определить, каким образом увеличение продолжительности дозы первой фракции теплового шока влияет на процессы адаптации листьев дуба скального. Для этого продолжительность теплового шока была увеличена с 10 до 40 мин. Данные этого эксперимента приведены на рис. 3.

Сравнивая данные, показанные на рис. 2 и 3, выявили, что благоприятные эффекты, вызванные первой дозой теплового шока, проявляются только в том случае, когда его значения являются умеренными. Если оставить вторую дозу без изменений и увеличить продолжительность воздействия на листья первой дозы (температура 50 °С) от 10 до 40 мин, заметим, что в течение всего 24-часового периода после ее применения утечка электролитов из образцов вариантов, которые были обработаны обеими дозами, протекала более интенсивно по сравнению с теми, которые были подвержены лишь второй дозе теплового шока. Более того, в течение 24 ч уровень утечки электролитов из проб листьев изменялся параллельным образом в варианте с обработкой двумя дозами (фракционирование дозы) и в варианте с обработкой лишь второй дозой. Следовательно, в этом случае, в отличие от данных, представленных на рис. 2, вредные эффекты обеих доз являются аддитивными, а адаптивные процессы не проявляются. Таким образом, адаптивные краткосрочные эффекты могут быть вызваны дозами теплового шока, которые не превышают 0,1 доли уровня относительной утечки электролитов. Дозы теплового шока, которые вызывают более высокую утечку электролитов из проб листьев, оказывают губительное влияние на их устойчивость, а адаптивные эффекты не проявляются. Из вышесказанного следует, что с помощью метода фракционирования дозы теплового шока можно определить уровень фактора стресса, совместимого с функционированием и выживанием отдельного генотипа (вида).

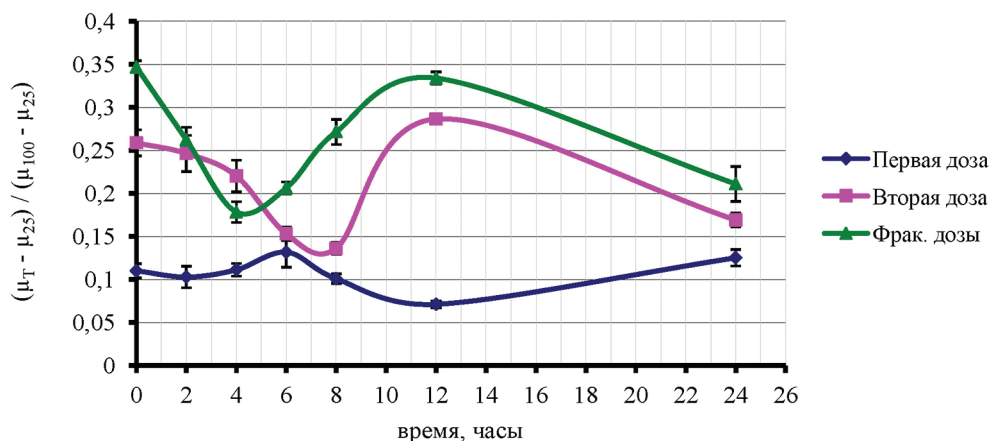


Рис. 3. Влияние промежутка времени между фракциями термического шока с применением температуры 50 °С в течение 40 мин (первая доза) и 55 °С в течение 10 мин (вторая доза) на утечку электролитов из высечек листовых пластинок дуба скального

Fig. 3. Influence of the time interval between fractions of the heat shock at temperature 50 °С within 40 min (first dose) and 55 °С within 10 min (second dose) on the leakage of the electrolytes from the Rock Oak leaf tissues

Таким образом, отдельное применение второй дозы при температуре 55 °С в течение 10 мин приводило изначально к умеренным повреждениям клеточных структур, но стрессовый эффект, вызванный этой температурой, уменьшался в течение 24 ч (рис. 2, кривая второй дозы). Минимальный уровень относительной утечки электролитов наблюдался через 12 ч от времени инкубации листьев в благоприятные условия хранения. В случае фракционирования доз минимальный уровень утечки электролитов зависит от продолжительности обработки листьев при температуре первой дозы и времени от ее проведения до фракционирования дозы теплового шока. Из рис. 2 следует, что, когда листья дуба скального инкубировались в течение короткого времени при первой дозе, утечка электролитов после обработки проб листьев второй дозой оставалась на более низком уровне по сравнению с эффектом, полученным с применением лишь второй дозы. Напротив, когда первая доза была продлена, способность клеточных структур удерживать электролиты после фракционирования дозы значительно снижалась по сравнению с тем, что было получено, когда вторую дозу применяли отдельно (рис. 3). В этом случае кривая, описывающая динамику изменений удерживания электролитов при фракционировании дозы, в графическом представлении была расположена выше кривой, описывающей эффект, вызванный только второй дозой теплового шока.

Полученные результаты согласуются с теорией о том, что реакция растений на воздействие высоких температур имеет комплексную природу и включает в себя ряд сложных биохимических и физиологических процессов [14, 24]. Кроме того, наши исследования подтверждают специфичность реакции растений на воздействие термического шока, отмеченную другими исследователями [2, 23]. В результате воздействия высоких температур выделяется двухфазная реакция растений на высокие температуры. Сразу после воздействия теплового шока происходит физическое и функциональное нарушение клеточной целостности растений, а после некоторых доз, благодаря процессам репарации и адаптации, клеточные структуры восстанавливаются, активируются определенные метаболические процессы и экспрессия генов, которые повышают устойчивость растений к стрессовым факторам [14].

Выводы

1. Метод утечки электролитов может быть успешно использован в лесном хозяйстве для определения влияния высоких температур на термоустойчивость листьев разных видов растений.

2. Использование метода утечки электролитов позволило определить критические температуры для листьев дуба черешчатого и дуба скального. Для дуба черешчатого они находятся в интервале от 54,8 до 72,3 °С, а для дуба скального – от 51,0 до 59,6 °С. Обработка этими температурами вызывает значительное повреждение клеточных структур листьев.

3. Дуб скальный в сравнении с дубом черешчатым проявляет более низкую чувствительность к высоким температурам. Поэтому дуб черешчатый следует вводить в состав лесных культур в сухих местообитаниях южной части Республики Молдова, где в последние десятилетия проявляется тенденция аридизации климата.

4. С помощью метода фракционирования дозы теплового шока может быть выявлена адаптивная способность листьев к влиянию высоких температур в зависимости от условий (температуры и продолжительности ее действия).

5. С помощью метода утечки электролитов может быть определена кинетика восстановления функций клеточных мембран после экспозиции листьев при высоких температурах в зависимости от их значения.

6. Сочетание метода фракционирования дозы с тестированием способности клеток удерживать электролиты обеспечивает возможность одновременного определения восстановления повреждений, вызванных тепловым шоком, и позволяет оценивать кинетику изменения устойчивости растений к высоким температурам ввиду проявления адаптивных процессов.

7. В целом методы, обсуждаемые в статье, дают возможность изучить влияние различных факторов стресса на устойчивость растений и риск, вызванный глобальным потеплением на естественную растительность, характерную для различных фитоценологических областей Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.Я. Реактивность клеток и белки. Л.: Наука, 1985. 318 с.
2. Александров В.Я., Кислюк И.М. Реакция клеток на тепловой шок: физиологический аспект // Цитология. 1994. Т. 36, № 1. С. 5–59.
3. Горбань И.С. Повышение теплоустойчивости и стимуляция репараторной способности растительных клеток после обратимого теплового повреждения, определяемые по изменению вязкости протоплазмы // Цитология. 1983. Т. 25, № 1. С. 64–71.
4. Енькова Е.И. Теллермановский лес и его восстановление: учеб. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1976. 214 с.
5. Тутов А.Ф., Акимова Т.В., Таланова В.В., Тончиева Л.В. Устойчивость растений в начальный период действия неблагоприятных температур: моногр. М.: Наука, 2006. 143 с.
6. Alexandrov V.Ya., Lomagin A.G., Feidman N.L. The Responsive Increase in Thermostability of Plant Cells. *Protoplasma*. 1970, vol. 69, pp. 417–458.
7. Anderson J.T., Willis J.H., Mitchell-Olds T. Evolutionary Genetics of Plant Adaptation. *Trends in Genetics*, 2011, vol. 27 (7), pp. 258–266.
8. Cabral R., O'Reilly C. The Physiological Responses of Oak Seedlings to Warm Storage. *Can. Jour. For. Res.*, 2005, vol. 35. no. 10, pp. 2413–2422.
9. Cuza P. Apreciere a Rezistenței Istejarului Pufos (*Quercus Pubescens* Willd.) Ștejarul Uipedunculat (*Quercus robur* L.) La Acțiunea Temperaturilor Înalte. *Buletinul Academiei de Științe a Moldovei. Științele Vieții*, 2008, no. 3 (306), pp. 48–56.
10. Cuza P. Capacitatea de Adaptare a Frunzelor Ștejarului pufos (*Quercus Pubescens* Willd.) în Funcție de Doză și Durata Fraționării Idozelor Șocului Termic. *Mediulambiant*, 2008, no. 6 (42), pp. 23–26.
11. Cuza P. Instalarea și Menținerea Speciilor de Ștejar (Aspecte Teoretice și Practice). Chișinău, Mediul Ambiant Publ. 2017. 246 p.
12. Dascaluic Al., Cuza P. Specificul adaptării frunzelor ștejarului pedunculat (*Quercus Robur* L.) la Șocul Termic în Funcție de Valoarea Temperaturii și Durata de Acțiune. *Mediul ambiant*, 2008, no. 3 (39), pp. 34–37.
13. Dascaluic Al., Cuza P. Capacitatea de Adaptare a Aparatului Fotosintetic al Speciilor de ștejar (*Quercus Robur*, *Q. Petraea*, *Q. Pubescens*) la Acțiunea Temperaturilor Înalte. *Mediulambiant*, 2011, no. 2 (56), pp. 33–36.

14. *Dascaliuc A., Tate R.* Systemic in Determining the Biological Role of Natural Products. *Tehnologii Biologice Avansate și Impactul lor în Economie. Produse Naturale: Tehnologii de Valorificare a lor în Agricultură, Medicină și Industria Alimentară*: Mater. Simpoz. al 2-lea. Chișinău, 2005. pp. 24–37.
15. *Dascaliuc A., Ivanova R., Arpentin Gh.* Systemic Approach in Determining the Role of Bioactive Compounds. *Advanced Bioactive Compounds Countering the Effects of Radiological, Chemical and Biological Agents. Strategies to Counter Biological Damage. NATO Science for Peace and Security. Series A. Chemistry and Biology*. Springer, 2013, pp. 121–131.
16. *Ingram D.L* Modeling High Temperature and Exposure Time Interactions on *Pittporum Tobira* Root Cell Membrane Thermostability. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 1985, vol. 110. no. 4, pp. 470–473.
17. *Kuster T.M., Bleuler P., Arend M., Günthardt-Goerg M.S., Schulin R.* Soil Water, Temperature Regime and Growth of Young Oak Stands Grown in Lysimeters Subjected to Drought Stress and Air Warming. *Bulletin BGS*, 2011, vol. 32, pp. 7–12.
18. *Larkindale J., Hall J.D., Knight M.R., Vierling E.* Heat Stress Phenotypes of Arabidopsis Mutants Implicate Multiple Signaling Pathways in the Acquisition of Thermotolerance. *Plant Physiol*, 2005, vol. 138, pp. 882–897.
19. *Levitt J.* *Responses of Plants to Environmental Stresses*. New York, Academic Press Publ., 1980, vol. 1. 568 p.
20. *Martineau J.R., Specht J.E., Williams J.H., Sullivan C.Y.* Temperature Tolerance in Soybeans. I. Evaluation of a Technique for Assessing Cellular Membrane Thermostability. *Crop Science*, 1979, vol. 19, pp. 75–78.
21. *Mortazavi M., O'Reilly C., Keane M.* Stress Resistance Levels Change Little During Dormancy in Ash, Sessile Oak and Sycamore Seedlings. *Ann. For. Sci.*, 2004, vol. 61, pp. 455–463.
22. *Santarius K.A., Müller M.* Investigation on Heat Resistance of Spinach Leaves. / *Planta*, 1979, vol. 146, pp. 529–538.
23. *Stocker O.* Morphologische und Physiologische der Dürresistenz. *Bern: Kalli-Inst.*, 1958, pp. 79–93.
24. *Sullivan C.Y.* Mechanisms of Heat and Drought Resistance in Grain Sorghum and Methods of Measurement. // N.G. Rao and L.R. House (eds.). *Sorghum in the Seventies*. Oxford & I.B.H., New Delhi, 1972, India, pp. 267–274.
25. *Suzuki N., Mittler R.* Reactive Oxygen Species and Temperature Stresses: A Delicate Balance Between Signaling and Destruction. *Physiologia Plantarum*, 2006, vol. 126, pp. 45–51.

Поступила 16.04.19

УДК:581.1:582.632.2(478)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.187

Evaluation of the Thermostability of English Oak and Rock Oak and Their Degree of Adaptation to the Effects of Heat Shock*

P. A. Cuza, Doctor of Biol. Sciences, prof.

State University of Moldova, 60 A.Mateevici St., Chisinau, Republic of Moldova;

e-mail: petrucuza@mail.ru

*The article was published in the framework of implementation the development program of scientific journals in 2019.

The leaves of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) and pedunculate oak (*Quercus robur* L.) were subjected to heat shock at various high temperatures. The damage caused by the heat shock to the cellular structures of the leaves was determined using the electrolyte leakage technique. In the investigated species, a sigmoidal increase of electrolyte leakage from leaf tissues, depending of the applied temperatures, was observed. Pedunculate oak leaves, as compared with sessile oak ones, have shown increased resistance to high temperatures, suggesting that heat tolerance in pedunculate oak is higher than in sessile oak. Experiments with fractionation of heat shock doses allowed the estimation of the influence of the first dose value on induction of the leaves adaptive capacity of the sessile oak leaves during different periods of time after their application. If the first fraction of dose was moderate, the thermotolerance of leaves grew rapidly. So, the functional status of leaves depended on three components that characterized the fractionation of dose: the value of the first part of dose (1), the value of the second part of dose two (2), the duration of the period that has passed between two fractions of dose (3). Summary effect of fractionated dose of heat shock is the result of balance between processes of degradation, recovery of damages, and adaptation. After application of moderate fractions of heat shock dose. the processes of the induction of adaptation dominated. Because of this the thermotolerance of leaves after application of the first dose of heat shock increased. After the application of higher fractions of dose, the processes of degradation prevailed under those of the recovery and adaptation. In combination they lead to the reduction leaves thermotolerance. The obtained results suggest that the method of fractional heat shock doses make possible determination of the initial thermotolerance and the adaptive capacity of leaves. Pooling of the processes that determine the initial leaves thermotolerance and their adaptive potential under variation of seasonal temperatures is important for plants survival in arid conditions.

For citation: Cuza P. A. Evaluation of the thermostability of english oak and rock oak and their degree of adaptation to the effects of heat shock. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 187–199. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.4.187

Keywords: *Quercus robur* L., *Q. petraea* Liebl., thermotolerance, leaves, heat shock.

REFERENCES

1. Alexandrov V.Ya. *Reactivity of Cells and Proteins*. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 318 p.
2. Alexandrov V.Ya., Kislyuk I.M. Reaction of Cells to Heat Shock: Physiological Aspect. *Cytology*. 1994, vol. 3, no.1, pp. 5–59.
3. Gorban I.S. Increase of Heat Resistance and Stimulation of the Reparative Ability of Plant Cells After Reversible Heat Damage, Determined by the Change in the Viscosity of the Protoplasm. *Cytology*. 1983, vol. 25, no. 1. pp. 64–71.
4. Enkova E.I. *Tellerman Forest and Its Restoration*. Voronezh, Voronezh University Publ. 1976. 214 p.
5. Titov A.F., Akimova, T.V., Talanova V.V., Topchiyeva L.V. *Resistance of Plants in the Initial Period of Unfavourable Temperatures*: Monography. Moscow, Nauka Publ., 2006. 143 p.
6. Alexandrov V.Ya., Lomagin A.G., Feidman N.L. The Responsive Increase in Thermostability of Plant Cells. *Protoplasma*. 1970, vol. 69, pp. 417–458.
7. Anderson J.T., Willis J.H., Mitchell-Olds T. Evolutionary Genetics of Plant Adaptation. *Trends in Genetics*, 2011, vol. 27 (7), pp. 258–266.
8. Cabral R., O'Reilly C. The Physiological Responses of Oak Seedlings to Warm Storage. *Can. Jour. For. Res.*, 2005, vol. 35. no. 10, pp. 2413–2422.
9. Cuza P. Apreciere a Rezistențe Istejarului Pufos (*Quercus Pubescens* Willd.) Ștejarul Uipedunculat (*Quercus robur* L.) La Acțiunea Temperaturilor Înalte. *Buletinul Academiei de Științe a Moldovei. Științele Vieții*, 2008, no. 3 (306), pp. 48–56.

10. Cuza P. Capacitatea de Adaptare a Frunzelor Stejarului pufos (*Quercus Pubescens* Willd.) in Funcție de Doză și Durata Fraționării Idozelor Șocului Termic. *Mediulambiant*, 2008, no. 6 (42), pp. 23–26.
11. Cuza P. *Instalarea și Menținerea Speciilor de Stejar (Aspecte Teoretice și Practice)*. Chișinău, Mediul Ambiant Publ. 2017. 246 p.
12. Dascaluic Al., Cuza P. Specificul adaptării frunzelor stejarului pedunculat (*Quercus Robur* L.) la Șocul Termic în Funcție de Valoarea Temperaturii și Durata de Acțiune. *Mediul ambiant*, 2008, no. 3 (39), pp. 34–37.
13. Dascaluic Al., Cuza P. Capacitatea de Adaptare a Aparatului Fotosintetic al Speciilor de stejar (*Quercus Robur*, *Q. Petraea*, *Q. Pubescens*) la Acțiunea Temperaturilor Înalte. *Mediulambiant*, 2011, no. 2 (56), pp. 33–36.
14. Dascaluic A., Tate R. Systemic in Determining the Biological Role of Natural Products. *Tehnologii Biologice Avansate și Impactul lor în Economie. Produse Naturale: Tehnologii de Valorificare a lor în Agricultură, Medicină și Industria Alimentară*: Mater. Simpoz. al 2-lea. Chișinău, 2005. pp. 24–37.
15. Dascaluic A., Ivanova R., Arpentin Gh. Systemic Approach in Determining the Role of Bioactive Compounds. *Advanced Bioactive Compounds Countering the Effects of Radiological, Chemical and Biological Agents. Strategies to Counter Biological Damage. NATO Science for Peace and Security. Series A. Chemistry and Biology*. Springer, 2013, pp. 121–131.
16. Ingram D.L Modeling High Temperature and Exposure Time Interactions on *Pittosporum Tobira* Root Cell Membrane Thermostability. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 1985, vol. 110, no. 4, pp. 470–473.
17. Kuster T.M., Bleuler P., Arend M., Günthardt-Goerg M.S., Schulin R. Soil Water, Temperature Regime and Growth of Young Oak Stands Grown in Lysimeters Subjected to Drought Stress and Air Warming. *Bulletin BGS*, 2011, vol. 32, pp. 7–12.
18. Larkindale J., Hall J.D., Knight M.R., Vierling E. Heat Stress Phenotypes of Arabidopsis Mutants Implicate Multiple Signaling Pathways in the Acquisition of Thermotolerance. *Plant Physiol*, 2005, vol. 138, pp. 882–897.
19. Levitt J. *Responses of Plants to Environmental Stresses*. New York, Academic Press Publ., 1980, vol. 1. 568 p.
20. Martineau J.R., Specht J.E., Williams J.H., Sullivan C.Y. Temperature Tolerance in Soybeans. I. Evaluation of a Technique for Assessing Cellular Membrane Thermostability. *Crop Science*, 1979, vol. 19, pp. 75–78.
21. Mortazavi M., O'Reilly C., Keane M. Stress Resistance Levels Change Little During Dormancy in Ash, Sessile Oak and Sycamore Seedlings. *Ann. For. Sci.*, 2004, vol. 61, pp. 455–463.
22. Santarius K.A., Müller M. Investigation on Heat Resistance of Spinach Leaves. *Planta*, 1979, vol. 146, pp. 529–538.
23. Stocker O. Morphologische und Physiologische der Dürresistenz. *Bern: Kalli-Inst.*, 1958, pp. 79–93.
24. Sullivan C.Y. Mechanisms of Heat and Drought Resistance in Grain Sorghum and Methods of Measurement. // N.G. Rao and L.R. House (eds.). *Sorghum in the Seventies*. Oxford & I.B.H., New Delhi, 1972, India, pp. 267–274.
25. Suzuki N., Mittler R. Reactive Oxygen Species and Temperature Stresses: A Delicate Balance Between Signaling and Destruction. *Physiologia Plantarum*, 2006, vol. 126, pp. 45–51.

Received on April 14, 2019

УДК 630*372

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.200

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ ПРИ ВЫБОРОЧНЫХ И САНИТАРНЫХ РУБКАХ ЛЕСА**А.Н. Заикин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: [0000-0002-1831-6893](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893)**В.В. Сиваков, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/R-7264-2019),**ORCID: [0000-0002-0175-9030](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030)**Е.В. Шевелева, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/H-2080-2019),**ORCID: [0000-0002-1763-6932](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932)*

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037;

e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru, sv@bgitu.ru, elshev78@yandex.ru

Комплексное совершенствование пользования лесом с позиций производственно-экономической и лесоводственно-экологической эффективности является важной задачей совершенствования транспортно-технологического процесса освоения территорий лесных массивов с истощенной сырьевой базой. В условиях несплошных рубок основной операцией, оказывающей вредные экологические воздействия в виде повреждения, оставляемых для выращивания деревьев на транспортных путях лесосеки, является трелевка. Для снижения повреждений компонентов древостоя при трелевке целесообразно осуществление движения трелевочных тракторов по криволинейному маршруту в целях максимального сохранения куртин подроста и оставленных молодых деревьев, целевых деревьев при рубках ухода. Чтобы снизить вредное воздействие на почвенный покров и корневую систему деревьев, можно применять технические и технологические методы. Применение технических методов требует больших затрат, технологические решения для сохранения от повреждения стволов деревьев требуют меньших капиталовложений, например, находят применение различные ограждающие устройства. В основном предлагаются технические методы, направленные главным образом на снижение удельного давления на почву. Одним из технических методов, направленных на сохранение почвенного покрова и корневой системы от разрушения, может быть укрепление волока порубочными остатками. Такой способ позволяет значительно снизить повреждаемость корневой системы, особенно в летний период. При трелевке вблизи деревьев происходит повреждение не только почвенного покрова и корневой системы, но также повреждение коры стволов. Особенно страдают деревья, расположенные вблизи поворота волока. Поэтому в данной работе для снижения повреждаемости стволов деревьев, расположенных вдоль трелевочных волоков, предложено запатентованное в РФ универсальное, съёмное, разборно-сборное защитное устройство, которое позволит уберечь от повреждения – обдира коры и стволовой части древесины – оставляемые для выращивания дерева при трелевке хлыстов или сортиментов и движения техники рядом. Защитное приспособление для ствола дерева представляет собой конструкцию, состоящую из ограждающих элементов – отрезков от 1,5 до 2 метров длиной стволовой части тонкомерной, некондиционной древесины с ввернутыми в них шурупами с кольцами, через которые продета гибкая отожженная проволока, концы которой соединяются в кольцо при помощи зажима.

Для цитирования: Заикин А.Н., Сиваков В.В., Шевелева Е.В., Обеспеченность подростом спелых и перестойных темнохвойных насаждений Средне-Уральского таежного

*Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 году.

лесного района Пермского края // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 200–211. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.200

Ключевые слова: лесосечные работы, трелевка древесины, повреждаемость деревьев, защита деревьев, выборочные рубки, санитарные рубки, постепенные рубки.

Введение

Основной целью предприятий-лесозаготовителей с точки зрения экологически обоснованного лесопользования должно быть использование передовых технических и технологических решений, обеспечивающих максимальное повышение производительности труда и создание условий для рационального использования всей биомассы дерева при минимальном воздействии машин на лесную среду.

Заготовка леса лесозаготовительными предприятиями проводится по различным технологическим схемам и различными типами и составами машин.

Практикой и наукой доказаны преимущества выборочных и постепенных рубок. Они обеспечивают непрерывность и неистощительность лесопользования, позволяют брать урожай древесины ценных пород с единицы площади почти в два раза больше, резко сокращают объемы искусственного лесовосстановления. Но их внедрение сдерживается отсутствием специальной техники, для создания которой нет научно обоснованных данных по параметрам рабочих органов и конструкциям машин в целом. Также нет научно обоснованных эколого-лесоводственных требований к лесозаготовительным машинам и экологосберегающим технологиям лесосечных работ [1, 2, 4].

Объекты и методы исследования

Комплексное совершенствование пользования лесом с позиций производственно-экономической и лесоводственно-экологической эффективности является важной задачей совершенствования лесопромышленных предприятий, особенно на территориях с истощенной сырьевой базой. Его реализация должна осуществляться с проектирования лесосечных работ при обоснованном выборе системы машин, начиная с выбора техники на ведущей операции. В условиях несплошных рубок такой операцией является трелевка, которая в основном определяет стоимость и трудоемкость всех основных и подготовительных работ, а также негативные экологические последствия в виде повреждений оставляемых для выращивания деревьев на лесосеке [3, 5, 6, 12, 14].

Большинство насаждений, в которых ведутся лесосечные работы, имеют случайный тип распределения деревьев, что осложняет движение лесозаготовительной техники и операцию трелевки; повышается вероятность повреждения деревьев, оставленных для выращивания. С целью минимизации повреждений компонентов леса при трелевке целесообразно осуществление движения трелевочных тракторов по криволинейному маршруту. Такой способ используется при необходимости максимального сохранения куртин подроста и оставленных молодых деревьев, целевых деревьев при рубках ухода и основан на максимальном использовании свободного пространства между стоящими деревьями при их объезде [9, 10, 18].

Тяжелая техника лесного комплекса, в особенности на гусеничном типе подвески, наносит серьезный ущерб почве, как гусеницами, так и при трелевке

деревьев, это впоследствии создает большие затраты времени и средств на рекультивацию. После сплошной рубки территория лесозаготовок представляет собой сильно изрытую трелевочными волоками почву с поврежденными корнями деревьев, подростом и сильным уплотнением. Снижение отрицательного воздействия машин на лесную среду может идти по нескольким направлениям. На рис. 1 приведена схема наиболее актуальных направлений и методов снижения вредного воздействия машин лесного комплекса на лесные экосистемы, в данном случае рассматриваются почвенный покров и корневая система, древостой. На схеме приведены технологические и технические методы, решения по снижению отрицательного воздействия машин на почву и оставленные молодые деревья [8].

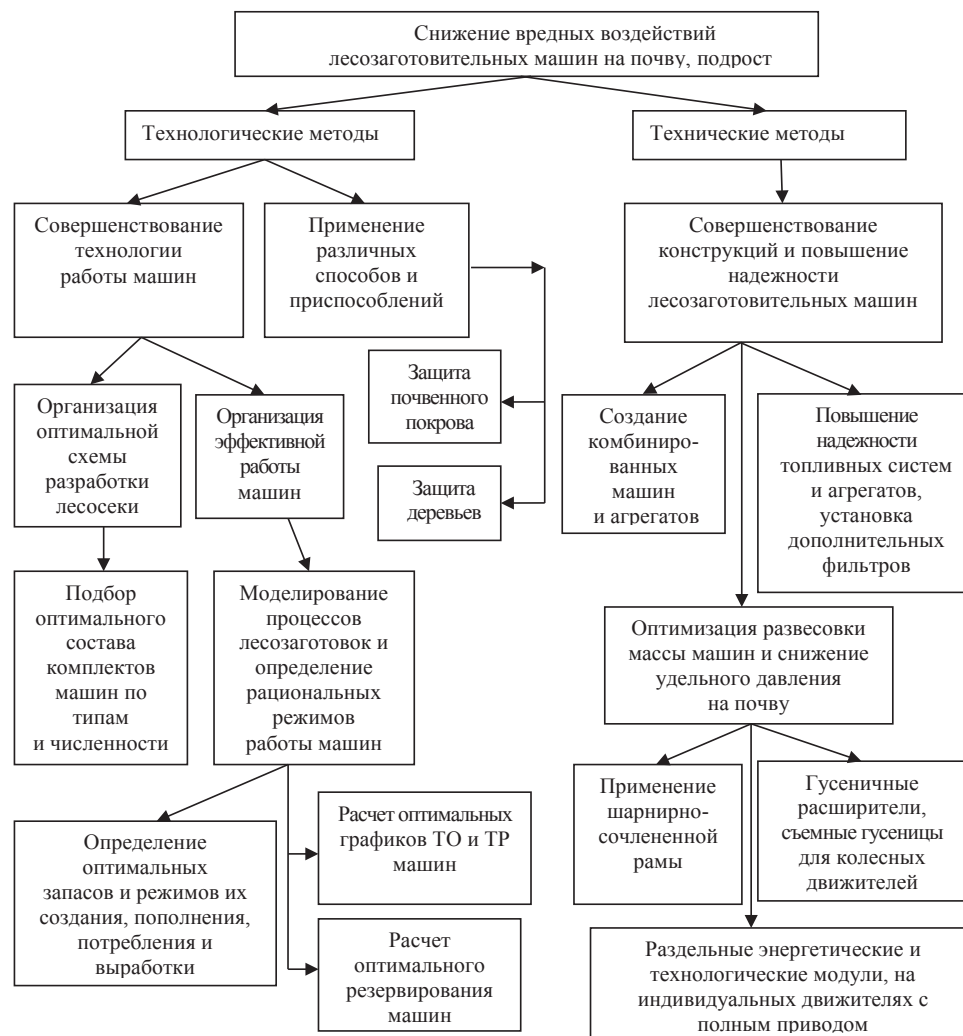


Рис. 1. Возможные направления методов и способов снижения отрицательного влияния лесозаготовительных машин на компоненты леса

Fig. 1. Possible methods and techniques of reducing of negative impact of logging machines on the forest components

Чтобы снизить вредное воздействие на почвенный покров и корневую систему деревьев, можно применять технические и технологические методы.

Технические методы направлены главным образом на снижение удельного давления на почву, они являются в данном случае управляемым параметром, так как при избыточном давлении уплотняется и минерализуется почва примерно на 65...70 % территории вырубki. Допустимое удельное давление на почву составляет 50 кПа, для его достижения применяются такие решения, как применение широкопрофильных шин (600...700 мм) сверхнизкого давления (15...20 кПа), установка колес одинакового размера попарно по схеме «тандем» с приводом на каждое из них, быстросъемных эластичных гусеничных лент, на рис. 3 пример. Системы полного привода на каждое колесо позволяют увеличить силу тяги техники до 40 %. На гусеничной технике снижение давления на почву достигается применением расширителей и увеличением количества опорных катков, схема их расположения, также вред снижается при применении металлических обрешиненных гусениц, пневматические гусеницы целесообразны и могут хорошо проявить себя только на болотистых и топких грунтах [3].

Во время несплошных рубок, санитарных рубок или рубок ухода обрезка сучьев деревьев производится на месте валки, хлысты разделяются на сортаменты и трелюются с лесосеки, при этом наилучшим способом трелевки считается трелевка в полностью подвешенном состоянии, но он высокоэнергозатратный [11].

Одним из технологических методов, направленных на сохранение почвенного покрова и корневой системы от разрушения, может быть укрепление волока порубочными остатками – пункт 1.12 [15]. Такой способ позволит значительно снизить повреждаемость корневой системы, особенно в летний период. При неоднократном прохождении трелевочных средств по такому волоку будет происходить измельчение подстилающего слоя, а следовательно, ускорит процесс его перегнивания.

При трелевке вблизи деревьев происходит повреждение не только почвенного покрова и корневой системы, но и повреждение коры стволов [7, 8, 19–25]. Особенно страдают деревья, расположенные вблизи поворота волока (рис. 2).



Рис. 2. Повреждение дерева при механической трелевке во время выборочной санитарной рубки

Fig. 2. Damaged trees following mechanical skidding during selective sanitary cutting

Согласно пункту 4.4 [15] в целях сохранения подроста среди подлежащих рубке деревьев по обеим сторонам волоков оставляются отбойные деревья, которые отбирают из числа назначенных в рубку и вырубает при завершении лесосечных работ. При постепенных рубках с периодом повторения приемов 4...6 лет отбойные деревья могут вырубаться по завершении очередного приема рубки. Согласно пункту 4.5 этого же документа на участках постепенных и выборочных рубок в технологических полосах (пасеках без волоков) должны сохраняться все деревья, подлежащие оставлению на выращивание. Количество деревьев с повреждениями, существенно влияющими на их жизнеспособность и продуктивность, не должно превышать: 5 % – для равномерно-постепенных рубок; 3 % – для выборочных, группово-постепенных, котловинных и длительно-постепенных рубок; 1 % – для чересполосных постепенных рубок. Деревья, поврежденные до степени прекращения роста, могут составлять не более 30 % в общем числе учитываемых поврежденных деревьев (по нормативу). Они подлежат вырубке при завершении лесосечных работ. Однако на месте отбойных деревьев могут оказаться и перспективные деревья, что приведет к увеличению процента повреждаемости.

Согласно пункту 103 действующих в настоящее время Правил ухода за лесами [16] «технология проведения ухода за лесами должна обеспечивать проведение работ с минимальным повреждением деревьев, оставляемых для выращивания. Не допускается повреждение деревьев более чем 2...3 %. К поврежденным деревьям относятся: деревья с обломом вершины; с наклоном ствола на 10° и больше; повреждением кроны на 1/3 и больше ее поверхности; обдиром коры на стволе, составляющим 10 % и более окружности ствола; с обдиром и обрывом скелетных корней».

Результаты проведенных исследований [13] показали, что основным видом повреждений является обдир коры ствола. При хлыстовой технологии в зимний и летний период было повреждено соответственно 9,0 и 14,2 % деревьев ели, при сортиментной – 6,2 и 10,3 %, т. е. заметно меньше, тем не менее это повреждение можно снизить до минимума.

С целью минимизации повреждаемости оставленных для выращивания деревьев авторами предложено защищенное патентом на полезную модель [17], универсальное, съемное, разборно-сборное защитное устройство, которое позволит уберечь от повреждения – обдира коры и ствольной части древесины, оставляемых для выращивания деревьев при трелевке хлыстов или сортиментов и движении техники рядом.

Защитное приспособление (рис. 3) для ствола дерева (1) представляет собой конструкцию, состоящую из ограждающих элементов (2) – отрезков от 1,5 до 2 метров длиной ствольной части тонкомерной, некондиционной древесины с свернутыми в них шурупами с кольцами (3), через которые продета гибкая отожженная проволока (4), а ее концы соединяются в кольцо при помощи зажима (5).

Работает устройство следующим образом: выбираются деревья, которые нужно защитить от повреждений, измеряются их диаметры, далее вокруг стволов (1) этих деревьев устанавливаются ограждающие элементы (2), в верхний торец которых предварительно свернуты шурупы с кольцами (3). В кольца шурупов (3) продевается отожженная проволока (4) диаметром 3...4 миллиметра, длиной больше диаметра ствола дерева, на одном конце которой установлен

винтовой зажим (5), а второй конец свободен, и с его помощью можно регулировать необходимую длину. Устройство позволяет использовать данную проволоку с замком для разных диаметров стволов, чем достигается его универсальность и быстрота установки конструкции на стволе дерева. После закрепления верхней части и фиксации зажимом (5) для надежности и жесткости конструкции нижняя ее часть обвязывается такой же отожженной проволокой (4) и фиксируется зажимом (5), что позволяет впоследствии при задевании трелюемыми деревьями и техникой сохранять жесткость конструкции и защищать кору ствола дерева от повреждений.

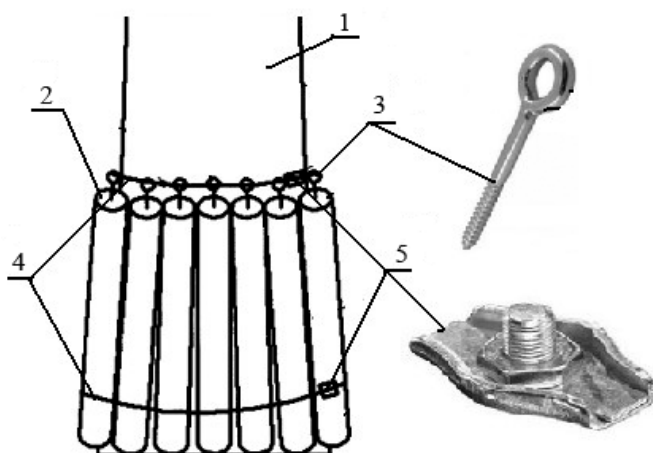


Рис. 3. Схема установки ограждающего приспособления на стволе дерева: 1 – ствол защищаемого дерева; 2 – ограждающие элементы; 3 – шурупы с кольцом; 4 – проволока, 5 – винтовые зажимы

Fig. 3. Chart of the protective device installation on a tree stem: 1 – protected tree stem; 2 – protective elements; 3 – screw nails with rings; 4 – wire; 5 – screw clamps.

Данное устройство из подручных материалов предназначено для защиты деревьев, не назначенных в рубку и оставляемых для выращивания при несплошных рубках. Оно является универсальным, и его можно настроить под любой диаметр дерева, изменяя длину проволоки и количество порубочных остатков. При необходимости можно изменять высоту устройства, подготовив с этой целью более высокие ограждающие элементы, и применять для ограждения стволов деревьев на поворотах веток, так как повреждение коры и ствольной части древесины имеется и на таких деревьях (рис. 4).

Таким образом, применение данного защитного устройства позволит снизить вероятность повреждения стволов деревьев, оставленных для выращивания, и тем самым повысить продуктивность леса.

В устройство входят следующие элементы:

- ограждающие элементы длиной $L_{пор.} = 150...200$ см и диаметром в вершине $d_{пор.} = 5...8$ см;
- винты с кольцами, ввинчиваемые в один из торцов порубочных остатков;

– отожженная проволока диаметром $d_{\text{пр.}} = 3...4$ мм, расчетная длина которой должна быть с запасом, чтобы ее можно было применять для разных диаметров ствола деревьев;

– крепежный элемент для зажима концов проволоки, фиксирующий устройство на стволе дерева, представляющий собой винтовой зажим.



Рис. 4. Примеры повреждения деревьев на поворотах веток
Fig. 4. Patterns of damage to the trees at the skidding routes curves

Ограждающие элементы изготавливаются непосредственно на месте разработки лесосеки из тонкомерных стволов различных пород древесины.

Необходимую длину (m) устройства в верхней части можно рассчитать по формуле:

$$L_1 = \pi(d_{\text{в}} + d_{\text{пор}}) = 3,14(0,3 + 0,08) = 1,19 \quad (1)$$

где π – математическая постоянная, 3,14; $d_{\text{в}}$ – диаметр ствола дерева в верхней точке крепления устройства, $d_{\text{в}} = 0,3$ м.

Расчет длины устройства в нижней части производится по формуле:

$$L_2 = \pi \cdot d_{\text{н}} = 3,14(0,5 + 0,1) = 1,88 \quad (2)$$

где $d_{\text{н}}$ – диаметр ствола дерева в нижней точке крепления устройства.

Усредненный расчет необходимого количества (шт) ограждающих элементов производится по формуле:

$$N = \frac{L_1}{d_{\text{пор}}} = \frac{1,19}{0,05...0,08} = 24-15. \quad (3)$$

Тогда с учетом необходимого запаса, примерно равного 0,5 м, длина требуемого отрезка проволоки в верхней части составит около 1,7 м, а в нижней около 2,4...2,5 м.

Результаты исследования и их обсуждения

В результате проведенных исследований установлено, что в условиях несплошных рубок основной операцией, оказывающей вредные экологические воздействия в виде повреждения оставляемых для выращивания деревьев на транспортных путях лесосеки, является трелевка. Одним из технологических методов, направленных на сохранение почвенного покрова и корневой системы от разрушения, может быть укрепление волока порубочными остатками. В целях сохранения подроста и оставленных для выращивания деревьев, а также для уменьшения процента их повреждения по обеим сторонам волоков рекомендуется оставлять отбойные деревья, которые после окончания рубки подлежат уборке. Однако на месте отбойных деревьев могут оказаться перспективные деревья, что приведет к увеличению допустимого процента поврежденных деревьев. В связи с этим с целью минимизации повреждаемости оставленных для выращивания деревьев авторами предложено защищенное патентом на полезную модель, универсальное, съемное, разборно-сборное защитное устройство, которое позволит уберечь от повреждения – обдира коры и стволовой части древесины, оставляемых для выращивания деревьев при трелевке хлыстов или сортиментов и движении техники рядом. По расчетам основных параметров и описанию изобретения можно сделать вывод, что необходимо небольшое количество материалов (два отрезка проволоки длиной примерно 1,7 и 2,5 м, 24...15 шт ограждающих элементов средним диаметром в верхнем отрубе 0,05...0,08 м для ограждения дерева диаметром 0,3 м на уровне груди) и трудозатрат для его изготовления, состоит оно в основном из подручных материалов, что является его большим плюсом, так как при этом осуществляется защита не назначенных в рубку и оставляемых для выращивания деревьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаренок В.А., Залесов С.В. Экологизированные рубки леса: учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 97 с.
2. Бартенев И.М., Родин С.А. Экологизация технологий и машин лесного комплекса. Пушкино: ВНИИЛМ, 2001. 88 с.
3. Бартенев И.М., Драпалюк М.В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехн. журн. 2012. № 1. С. 61–66.
4. Безгина Ю.Н., Герц Э.Ф., Иванов В.В., Перепечина Т.А., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Выбор технологии лесосечных работ в условиях устойчивого лесопользования // Леса России и хозяйство в них. 2015. № 4(55). С. 12–22.
5. Бестужев А.Н., Валяжонков В.Д., Добрынин Ю.А., Иванов В.А., Иващенко В.Н., Коваленко А.А. Воздействие процесса трелевки древесины от рубок ухода на лесную среду // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1(13). С. 167–172.
6. Вадбольская Ю.Е., Азаренок В.А. Влияние параметров машин для рубок ухода на уровень повреждения леса // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 2(49). С. 32–34.
7. Васякин Е.А., Добрынин Ю.А. Повреждаемость деревьев при выборочных рубках // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. академии. 2017. № 219. С. 120–132. DOI: 10.21266/2079-4304.
8. Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С. Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок. Йёнсуу: Изд-во ун-та Йёнсуу, 1998. 178 с.

9. Герц Э.Ф., Азаренок В.А., Лившиц Н.В. К вопросу о целесообразности применения операции подтрелевки при несплошных рубках // Лесн. журн. 2002. № 3. С. 44–48. (Изв. высш. учеб. заведений).
10. Герц Э.Ф. Вероятность повреждения деревьев в процессе трелевки при несплошных рубках // Лесн. пром-сть. 2004. № 2. С.13–14.
11. Герц Э.Ф., Залесов С.В. Повышение лесоводственной эффективности несплошных рубок путем оптимизации валки назначенных в рубку деревьев // Лесн. хоз-во. 2003. № 5. С. 18–20.
12. Григорьев А.А. Лесоводственная оценка технологий двух приемных равномерно-постепенных рубок в ельниках: дис. ... канд. с.-х. наук // Электронная библиотека диссертаций и авторефератов. Режим доступа: [dissercathttp://www.dissercat.com/content/lesovodstvennaya-otsenka-tekhnologii-dvukhpriemnykh-ravnomerno-postepennykh-rubok-v-elnikakh#ixzz5ertyWSTu](http://www.dissercat.com/content/lesovodstvennaya-otsenka-tekhnologii-dvukhpriemnykh-ravnomerno-postepennykh-rubok-v-elnikakh#ixzz5ertyWSTu) (дата обращения: 07.02.2019 г.).
13. Заикин А.Н. Теория, методы и модели интенсификации лесосечных работ: моногр. Брянск: БГИТА, 2009. 212 с.
14. Лековская М.В., Сарнацкий В.В. Некоторые особенности механизированных рубок ухода в сосняках Беларуси // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 34. С. 12–15.
15. Лесоводственные требования к технологическим процессам лесосечных работ. Федеральная служба лесного хозяйства России. Утверждены приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 29 ноября 1993 года № 314. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9013832> (дата обращения: 15.04.2019 г.).
16. Об утверждении Правил ухода за лесами Приказ Минприроды РФ от 22 ноября 2017 года № 626. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/542612622> (дата обращения: 15.04.2019 г.).
17. Патент на полезную модель 181336 Российская Федерация. МПК А01G 13/00; А01G 23/00. Защитное приспособление для стволов деревьев / А.Н. Заикин, В.В. Сиваков, В.С. Полеготченков; заявитель и патентообладатель Брянский государственный инженерно-технологический университет. № 2018101818; заявл. 17.01.2018; опубл. 11.07.2018. Бюл. № 20.
18. Сортиментная заготовка древесины / В.А. Азаренок, Э.Ф. Герц, С.В. Залесов, А.В. Мехренцев: учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 140 с.
19. Tavankar F., Majnounian B., Bonyad A.E. Felling and Skidding Damage to Residual Trees Following Selection Cutting in Caspian Forests of Iran. *Journal of Forest Science*, 2013, no. 59 (5), pp. 196–203.
20. Bettinger P., Kellogg L.D. Residual Stand Damage From Cut-to-Length Thinning of Second Growth Timber in the Cascade Range of Western Oregon. *Forest Products Journal*, 1993, vol. 43, pp. 59–64.
21. Camp A. Damage to Residual Trees by Four Mechanized Harvest Systems Operating in Small Diameter, Mixed Conifer Forests and Steep Slopes in Northeastern Washington: A Case Study. *Western Journal of Applied Forestry*, 2002, no. 17, pp. 14–22.
22. Ficklin R.L., Dwyer J.P., Cutter B.E., Draper T. Residual Tree Damage During Selection Cuts Using Two Skidding Systems in the Missouri Ozarks. In: Pallardy S.G., Cecich R.A., Garret H.H., Johnson P.S. (eds). *Proceedings of 11 th Central Hardwood Forest Conference*. Columbia, 23–26. March 1997. St. Paul, USDA Forest Service, pp. 36–46.
23. Iskandar H., Snook L.K., Toma T., MacDicken K., Kanninen M. A Comparison of Damage Due to Logging Under Different Forms of Resource Access in East Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 237, pp. 83–93.
24. Majnounian B., Jourgholami M., Zobeiri M., Feghi J. Assessment of Forest Harvesting Damage to Residual Stands and Regenerations – a Case Study of Namkhaneh District in Kheyroud Forest. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, vol. 7, pp. 33–44.

25. *Meadows J.S.* Logging Damage to Residual Trees Following Partial Cutting in a Green Ash-Sugarberry Stand in the Mississippi Delta. In: Gillespie A.R., Parker G.R., Pope P.E., Rink G.(eds). *Proceedings of the 9th Central Hardwood Forest Conference*. West Lafayette, 1993, St. Paul, USDA Forest Service, pp. 248–260.

Поступила 15.03.19

UDC 630*372

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.200

Methods to Reduce Damage of the Tree Trunks During Selective and Sanitary Forest Felling Operations*

A.N. Zaikin, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: [0000-0002-1831-6893](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893)

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

E.V.Sheveleva, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/H-2080-2019),
ORCID: [0000-0002-1763-6932](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932)

Bryansk State Engineering and Technological University, 3 Stanke Dimitrov Av., Bryansk, 241037 Russian Federation,

e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru, sv@bgitu.ru, elshev78@yandex.ru

Comprehensive improvement of forest usage from the standpoint of production, economic and forestry-ecological efficiency is an important task of improving the transport and technological process of developing the depleted forest areas. Skidding is the main operation, which causes harmful environmental impact on the reserved trees at the transport routes of the selective cutting area. In order to reduce damage to the components of the forest stand during skidding, it is advisable to move the skidders along a curvilinear route, that maximizes preservation of the undergrowth, young trees and target trees during thinning. Technical and technological methods are usable to reduce the harmful effects on the soil cover and the root system of trees. The usable technical methods are expensive. Technological solutions to save tree stems from damage require less investment. For example, various protective fences are applied. In general, technical methods, aimed mainly at reducing the specific pressure on the soil are proposed. One of the technical methods aimed at preserving the soil cover and the root system from destruction can be the strengthening of the skidding trail with the logging residues. This method enables reduction of the damage to the root system significantly, especially in summer. When skidding near trees there occurs damage not only to the soil cover and root system, but also to the bark of the stems. The trees located closely to the turn of the skidding trail are particularly affected. Therefore, in order to reduce the damage of tree stems located along the skidding trails, a multi-operated, removable, dismountable protective device patented in the Russian Federation is proposed in this paper. It will assist to protect against damage – peeling of the bark and trunk of the reserved trees during skidding and traffic of machinery nearby. A protective device for a tree stem is a structure consisting of protective elements – short non-standard logs from 1.5 to 2 meters long having screw nails with rings for a flexible annealed wire to be reeved into. The ends of the wire form a loop by the mean of a clip.

For citation: Regulation of Cardboard Wet Strength by Biomodified Gluten Treatment. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 200–211. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.200

*The article was published in the framework of implementation the development program of scientific journals in 2019.

Keywords: logging, skidding, tree damage, tree protection, selective logging, sanitary logging.

REFERENCES

1. Azarenok V.A., Zalesov S.V. *Ecologization of Logging*. Ekaterinburg, URLU Publ., 2015. 97 p.
2. Bartenev I.M., Rodin S.A. *Ecologization of Technology and Machinery of the Forest Complex*. Pushkino, VNIILM Publ., 2001. 88 p.
3. Bartenev I.M., Drapaljuk M.V. Reduction of Harmful Impact of the Forest Tractors and Felling Machines on a Soil. *Lesotekhnicheskij Zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 61–66.
4. Bezgina Ju.N., Gerc Je.F., Ivanov V.V., Perepechina T.A., Terinov N.N., Urazova A.F. Choice of Logging Technology in the Condition of Substantial Forestry. *Lesa Rossii i Khozjaystvo v Nikh*. 2015, no. 4 (55), pp. 12–22.
5. Bestuzhev A.N., Valjazonkov V.D., Dobrynin Ju.A., Ivanov V.A., Ivashhenko V.N., Kovalenko A.A. Impact of the Thinning Cutting on the Forest Medium. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2012, no.1 (13), pp. 167–172.
6. Vadbol'skaja Ju.E., Azarenok V.A. Influence of the Thinning Machinery Parameters on the Level of Forest Impairment. *Lesa Rossii i Khozjaystvo v Nikh*, 2014, no. 2 (49), pp. 32–34.
7. Vasjakin E.A., Dobrynin Ju.A. Failure rate of the trees during selective cutting. *Izvestija S.-Peterburgskoy Lesnoy Akademiji*. 2017, no. 219. pp. 120–132. DOI: 10.21266/2079-4304.
8. Gerasimov Ju.Ju., Sjunev V.S. *Ecological Optimization Of The Technology And Machinery for Logging*. Jojensuu, Jojensuu University Publ., 1998, 178 p.
9. Gerc Je.F., Azarenok V.A., Livshits N.V. On the Question of Practicability of the Transitional Skidding Under Selective Cutting Conditions. *Lesnoy Zhurnal*. 2002, no. 3, pp. 44–48.
10. Gerc Je.F. Expectancy of Impairment of the Trees In the Course of Selective Cutting. *Lesnaja Promyshlennost*, 2004, no. 2, pp. 13–14.
11. Gerc Je.F., Zalesov S.V. Upgrading of Silvicultural Efficiency of Partial Cutting by Optimization of Felling of the Appointed Trees. *Lesnoe Khozjaystvo*, 2003, no.5, pp.18–20.
12. Grigor'ev A.A. *Silvicultural Assessment of the Technologies of Two-stage Regular Gradual Felling in the Spruce Stands*: Cand. Agric. Sci. Available at: <http://www.dissercat.com/content/lesovodstvennaya-otsenka-tekhnologii-dvukhpriemnykh-ravnomerno-postepennykh-rubok-v-elnikakh#ixzz5ertyWSTu> (accessed February 7, 2019).
13. Zaikin A.N. *Theory, Methods and Models of Intensification of the Cutting Area Work*: Monography, Brjansk, BGITA Publ., 2009, 212 p.
14. Lekovskaja M.V., Sarnackij V.V. Certain Specialties of the Mechanized Cleaning Cuttings in the Pine Stands of Bielorusia // *Aktual'nye Problemy Lesnogo Kompleksa*. 2012, no. 34, pp.12–15.
15. Silvicultural Regulations to the Technological Processes of the Cutting Area Work. Federal Forestry Agency of Russian Federation. Adopted on November 29, 1993. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/9013832> (accessed April 15, 2019).
16. Order by the Russian Federation Ministry of Nature, No. 626, Dated November 22, 2017. Re.: Authorization of the Rules of Forests Tending. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/542612622> (accessed April 15, 2019).
17. Zaikin A.N., Sivakov V.V., Polegotchenkov V.S. *Zaschitnoe Prisosobljeniye Dlja Stvolov Derev'ev* [Protective Device for the Stems of the Trees] Pat. RF, no. 2018101818, 2018.
18. Azarenok V.A., Gerc Je.F., Zalesov S.V., Mehrencev A.V. *Cut-to-length Logging: Study Guide*. Ekaterinburg, Ural SFEU Publ., 2015, 140 p.

19. Tavankar F., Majnounian B., Bonyad A.E. Felling and Skidding Damage to Residual Trees Following Selection Cutting in Caspian Forests of Iran. *Journal of Forest Science*, 2013, no. 59 (5), pp. 196–203.

20. Bettinger P., Kellogg L.D. Residual Stand Damage From Cut-to-Length Thinning of Second Growth Timber in the Cascade Range of Western Oregon. *Forest Products Journal*, 1993, vol. 43, pp. 59–64.

21. Camp A. Damage to Residual Trees by Four Mechanized Harvest Systems Operating in Small Diameter, Mixed Conifer Forests and Steep Slopes in Northeastern Washington: A Case Study. *Western Journal of Applied Forestry*, 2002, no. 17, pp. 14–22.

22. Ficklin R.L., Dwyer J.P., Cutter B.E., Draper T. Residual Tree Damage During Selection Cuts Using Two Skidding Systems in the Missouri Ozarks. In: Pallardy S.G., Cecich R.A., Garret H.H., Johnson P.S. (eds). *Proceedings of 11 th Central Hardwood Forest Conference. Columbia*, 23–26. March 1997. St. Paul, USDA Forest Service, pp. 36–46.

23. Iskandar H., Snook L.K., Toma T., MacDicken K., Kanninen M. A Comparison of Damage Due to Logging Under Different Forms of Resource Access in East Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 237, pp. 83–93.

24. Majnounian B., Jourgholami M., Zobeiri M., Feghhi J. Assessment of Forest Harvesting Damage to Residual Stands and Regenerations – a Case Study of Namkhaneh District in Kheyroud Forest. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, vol. 7, pp. 33–44.

25. Meadows J.S. Logging Damage to Residual Trees Following Partial Cutting in a Green Ash-Sugarberry Stand in the Mississippi Delta. In: Gillespie A.R., Parker G.R., Pope P.E., Rink G. (eds). *Proceedings of the 9th Central Hardwood Forest Conference. West Lafayette*, 1993, St. Paul, USDA Forest Service, pp. 248–260.

Received on March 15, 2019

УДК 632.4:[69.059+620.186]

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.212

МИКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ*

Е.Н. Покровская¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: 0000-0001-9726-0084

Д.В. Агапов², директор ООО «Архстройэкспертиза»;

Ю.Л. Ковальчук³, канд. биол. наук, ст. научн. сотр.; ORCID: 0000-0002-0656-008X

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337;

e-mail: elenapokrovskaya@bk.ru

²ООО «Архстройэкспертиза», просп. Троицкий, д. 63, г. Архангельск, Россия, 163000;

e-mail: dv.agapov@yandex.ru

³Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, Ленинский проспект, д. 33, Москва, Россия, 119071; e-mail: jlkovalchuk@rambler.ru

Деревянная Англиканская церковь, построенная в 1853–1855 годах на месте сгоревшей в 1852 году, находится в г. Архангельске и является объектом культурного наследия регионального значения. Целью настоящей работы являлись исследования древесины здания церкви для выяснения долговечности и микологической устойчивости деревянных конструкций. Для определения состояния деревянных конструкций памятника проведено микологическое обследование, на основании которого была определена сохранность и долговечность древесины. При обследовании было установлено, что долговечность некоторых деревянных конструкций и деталей памятника внушает опасения. Древесина этих конструкций была исследована с количественным определением разрушающих жизнеспособных спор грибов на 1 см². Прочность древесины определяли по ГОСТу 16483.11–72 и ГОСТу 16483.10–72. Объектом микологических исследований явились конструкции сруба (главного, северного, бокового фасадов), фундамента, крыши и оконного заполнения. Определялось количество жизнеспособных спор грибов на 1 см² в пробах древесины; общее количество колониеобразующих микроорганизмов в 1 г пробы; проводили определение таксономической принадлежности выделенных штаммов микроорганизмов. В результате микологических исследований в деревянных конструкциях обнаружены биоповреждающие грибы *Trichoderma viride*, *Trichoderma koningii*, *Fusarium solani*, *Alternaria alternata*. В пробах выявлены актиномицеты, дрожжеподобные грибки и бактерии, что свидетельствует о жизнеспособности спор грибов. Дереворазрушающие грибы отсутствовали. В результате определения зависимости прочности древесины от количества жизнеспособных спор установлено, что значительные разрушения древесины начинаются при наличии в ней спор более 100 спор/см². Представленные образцы древесины показали микологическую устойчивость и прочность. При использовании в реставрационных работах старой и новой древесины рекомендуется обязательная обработка защитными средствами, которые активно подавляют развитие всех видов микроорганизмов, включая дереворазрушающие и плесневые грибы. Проведенные исследования здания деревянной Англиканской церкви показывают, что сочетание натурного и микологического обследования конструкций памятника обуславливает сохранность исторических памятников на длительный срок.

Для цитирования: Покровская Е.Н., Агапов Д.В., Ковальчук Ю.Л. Микологическое обследование древесины исторических объектов культурного наследия // Лесн.

*Статья опубликована в рамках реализации программы развития научных журналов в 2019 году.

журн. 2019. № 4. С. 212–220. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.212

Ключевые слова: деревянная Англиканская церковь, натурное обследование, сохранность древесины, микологические исследования, биоразрушающие микроорганизмы, определение прочности древесины.

Введение

Проблема сохранения исторических памятников является актуальной. В Архангельской области (г. Архангельск, набережная Георгия Седова, дом 44) расположена деревянная Англиканская церковь – объект культурного наследия регионального значения. Сотрудниками ООО «Архстройэкспертиза» были произведены натурные исследования этого памятника. Для определения состояния деревянных конструкций памятника проведено микологическое обследование, на основании которого была определена сохранность и долговечность древесины.

Здание было ориентировано строго по сторонам света, при этом главным являлся западный фасад, обращенный к набережной Северной Двины. Место, занимаемое Англиканской церковью, находилось в самом центре оживавшей в летние месяцы Соломбальской купеческой гавани. На фасадах церкви имелось много архитектурных элементов – атрибутов неоготического стиля.

В ходе реконструкции здание было кардинальным образом перестроено. В настоящее время здание принадлежит МОУ «Архангельский детско-юношеский центр».

Рис. 1. Внешний вид Англиканской церкви в г. Архангельске

Fig. 1. The Anglican church in Arkhangelsk. The façade appearance.



Со временем были утрачены элементы архитектуры первоначального здания: несколько венцов стен, все готические элементы, практически весь кирпичный цоколь, значительная часть убранства интерьеров, печи, внутренние планировки, большая часть столярных наполнений, за исключением сохранившихся косяков некоторых проемов и наполнений фрамуг ряда стрельчатых окон.

Объекты и методы исследования

При обследовании здания церкви необходимо было установить долговечность конструкций. Объектом микологического исследования древесины яви-

лись конструкции церкви: сруб (главный, северный, боковой фасады), фундамент, крыша и оконное заполнение.

Пробы древесины помещали на поверхность стерильных питательных сред – сусла-агара и среды Сабуро в чашки Петри и инкубировали при температуре 27...28 °С и относительной влажности 90 % в течение недели и больше. Там, где отмечался рост грибов и других микроорганизмов, выросшие культуры изучали при увеличении 20^x под биноклем и при увеличении 630^x под микроскопом. С этой целью готовили микологические препараты для исследования характера спорообразования изучаемых культур грибов. Кроме того, рост культур плесневых грибов поддерживали на жидкой питательной среде, содержащей минеральные составляющие (KН₂РO₄, MgSO₄, NaNO₃, KCl, FeSO₄·7H₂O и сахара). Определение видов грибов проводили по [1, 3, 5, 18], пользуясь рекомендациями, изложенными в работах [2, 10, 11]. Учет хемоорганотрофных микроорганизмов в пересчете на 1 г пробы проводили на средах: сусло-агар, среда Сабуро. Определение численности жизнеспособных спор грибов на 1 см² поверхности проводили методом прямого посева и последующего подсчета проросших спор; также подсчитывали общее количество колониеобразующих микроорганизмов – КОЕ (в сумме – грибы, дрожжи и бактерии) [6, 7].

Прочность древесины определяли по ГОСТу 16483.11–72 и ГОСТу 16483.10–72.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты микологического анализа древесины представлены в табл. 1 и на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Внешний вид колоний грибов на агаровой среде с пробой «Англиканская церковь. Сруб. Главный (западный) фасад, окладной венец»

Fig. 2. Appearance of the fungi colonies on the agar media with sample “Anglican church. The cribwork. The main (western) facade, sole timber.”



Рис. 3. Внешний вид колоний грибов на среде Сабуро с пробой «Англиканская церковь. Сруб. Угол бокового (северного) фасада и дворового (восточного) фасада. Пятый венец, внешне здоровый»

Fig. 3. Appearance of the fungi colonies on the Saburo media with sample “Anglican church. The cribwork. The main (western) facade, sole timber.” The quoin of the the side facade (northern) and the rear façade (eastern). Timber set 5, apparently sound.

Таблица 1
Результаты определения количества жизнеспособных спор грибов на 1 см², концентрации микроорганизмов в 1 г пробы и видовой состав выделенных микроорганизмов

№ пробы	Номер и место отбора пробы	Микроорганизмы (МО), обнаруженные в пробе		Кол-во жизнеспособных спор на 1 см ²	Концентрация МО в 1 г пробы (общее кол-во)
		Сусло-агар	Среда Сабуро		
1	Сруб. Главный (западный) фасад, окладной венец	<i>Penicillium biforme</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Fusarium solani</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	89	4,6•10 ³ КОЕ
2	Сруб. Главный (западный) фасад, деревянный оконный отлив	<i>Fusarium solani</i> , <i>Penicillium biforme</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 4 изолятов	91	4,8•10 ³ КОЕ
3	Сруб. Угол бокового северного фасада и дворового (восточного) фасада. Пятый венец, внешне здоровый	<i>Alternaria alternata</i> , <i>Penicillium aurantiogriseum</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 2 изолятов	10	2•10 ² КОЕ
4	Конструкции крыши. Стропильная нога второй фермы	<i>Trichoderma viride</i> , <i>Penicillium biforme</i> , <i>Fusarium solani</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 7 изолятов	90	4,6•10 ³ КОЕ
5	Оконные заполнения. Боковой (северный) фасад	<i>Alternaria alternata</i> , <i>Penicillium biforme</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	12	2,6•10 ² КОЕ
6	Фундамент. Дворовый (восточный) фасад. Доска опалубки в уровне подшвы буттового фундамента	<i>Cladosporium cladosporioides</i> , <i>Penicillium nigricans</i> , <i>Penicillium biforme</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	85	4,3•10 ³ КОЕ
7	Фундамент. Дворовый (восточный) фасад. Лежень, вероятно старого фундамента, обнаруженный при проходке шурфа	<i>Penicillium biforme</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Fusarium solani</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	93	4,7•10 ³ КОЕ
8	Фундамент. Боковой (северный) фасад. Оголовок сваи	<i>Penicillium nigricans</i> , <i>Penicillium biforme</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Fusarium solani</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	97	4,8•10 ³ КОЕ
9	Фундамент. Боковой (северный) фасад. Лежень	<i>Penicillium sp.</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Alternaria alternata</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	91	4,7•10 ³ КОЕ
10	Фундамент. Боковой (северный) фасад. Лежень	<i>Alternaria alternata</i> , <i>Penicillium sp.</i> , <i>Fusarium solani</i>	<i>Actinomyces</i> Дрожжи <i>Candida</i> бактерии 5 изолятов	102	5,6•10 ³ КОЕ

В результате микологических анализов представленных проб деструктурирующие грибы не были выявлены. Однако обнаружены биоповреждающие грибы: *Trichoderma viride*, *Trichoderma koningii*, *Fusarium solani*, *Alternaria alternata* (рис. 2). В пробах на среде Сабуро много актиномицетов, дрожжеподобных грибков и бактерий, что свидетельствует о жизнеспособности спор грибов (рис. 3). К тому же дрожжи, актиномицеты и бактерии способствуют быстрому разложению составляющих древесины (целлюлозы, лигнина) [4, 7, 14].

Определение зависимости прочности на сжатие образцов главного (западного) фасада Англиканской церкви от количества жизнеспособных спор на 1 см² показано на рис. 4.

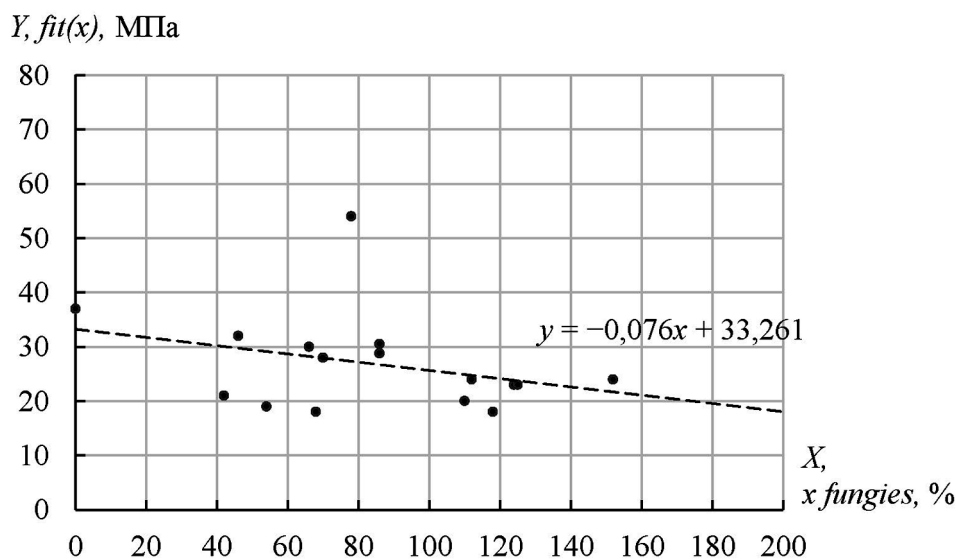


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие вдоль волокон древесины от количества жизнеспособных спор на 1 см²

Fig. 4. Dependence of the compression strength along the grain on the number of the viable spores her 1 cm².

Как видно из рис. 4, наиболее значительные разрушения начинаются после наличия жизнеспособных спор более 100 спор/см². Все представленные образцы древесины конструкций памятника показывают микологическую устойчивость (количество жизнеспособных спор на см² 10...102).

Согласно обследованию ООО «Архстройэкспертиза», предоставленные образцы древесины характеризуют приблизительно 80 % неразрушенных конструкций здания. Это заключение важно при составлении плана реставрации памятника.

Проведенные микологические исследования выявили природу микроорганизмов, присутствующих в древесине памятника. Обнаруженные грибы родов *Trichoderma*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Penicillium* не являются деструктурирующими. При малых концентрациях они не влияют на долговечность конструкций. Определение видов грибов-биоразрушителей на новой древесине важно при проведении реставрационных работ. В новой древесине будет присутствовать другое сообщество плесневых и биоповреждающих грибов, которое будет усиливать разрушение.

Тем не менее, для длительной сохранности объекта культурного наследия «Англиканская церковь» необходимо новую древесину (взятую для реставрации памятника) и старую древесину конструкций обработать составом, который активно подавлял бы развитие всех видов микроорганизмов, включая дереворазрушающие и плесневые грибы, дрожжи, актиномицеты и бактерии, и в течение длительного времени способствовал сохранности конструкций из дерева, камня, кирпича [4, 8, 9].

Заключение

Проведено натурное и микологическое обследование памятника культурного наследия регионального значения «Англиканская церковь», г. Архангельск.

Установлены показатели сохранности и долговечности памятника. Проведенные исследования показывают, что долговечность древесины конструкций исторических памятников в основном зависит от активности биоразрушителей [13, 19], которая усиливается при концентрации жизнеспособных спор микроорганизмов выше 80 спор/см².

Согласно многочисленным микологическим исследованиям изменение прочности древесины памятников возможно, когда содержание количества жизнеспособных спор на 1 см² древесины превышает 83–90 см². Проведенные многочисленные исследования представленных образцов говорят о долговечности обследованных конструкций, что важно для реставрационных работ [12, 14–17]. Сохранение собственных деревянных конструкций увеличивает ценность здания и уменьшает стоимость реставрационных работ.

Сохранность исторической древесины памятника культурного наследия «Англиканской церкви» составляет 80 % от объема. Значительное сохранение прочности увеличивает историческую ценность памятника и уменьшает затраты на реставрационные работы. Новая древесина может быть использована в реставрации памятника, при обязательной обработке ее защитными средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Билай В.И., Коваль Э.З.* Аспергиллы. Киев: Наукова думка, 1988. 204 с.
2. Биоповреждения и биокоррозия в строительстве/ Материалы Международной научно-технической конференции. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2004. 255 с.
3. *Ванин С.И.* Домовые грибы, их биология, диагностика и меры борьбы. Л.: Кубуч, 1931. 112 с.
4. *Вахрамеева Т.И., Вахрамеев Е.В., Любимцев А.Э.* Обследование и подготовка проектной документации на противоаварийные работы на памятниках деревянного зодчества. Петрозаводск, 2013. С. 6–15.
5. *Мейер Э.И.* Определитель деревоокрашивающих грибов. М.; Л.: Гослесбуиздат, 1953. 116 с.
6. *Покровская Е.Н.* Увеличение прочности частично разрушенной древесины памятников деревянного зодчества // Вестн. МГСУ. 2018. Т. 13, вып. 11. С. 1305–1314. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1305-1314.
7. *Покровская Е.Н., Ковальчук Ю.Л.* Биокоррозия. Сохранение памятников истории и архитектуры. М.: МГСУ, 2013. 212 с.

8. Покровская Е.Н., Котенёва И.В., Нагановский Ю.К. Долговечность защитного действия составов для древесины на основе элементарорганических соединений // Строительные материалы. 2004. № 5. С. 52–54.
9. Покровская Е.Н., Ковальчук Ю.Л. Химико-микологические исследования древесины // Сб. трудов I Международной научн.-практ. конф., г. Йошкар-Ола, 20–23 сентября 2016 г. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. С. 16–19.
10. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов: моногр. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2001. 196 с.
11. Туркова З.А. Исследование спонтанной микрофлоры комбинированных строительных материалов на минеральной основе // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов. М., 1973. С. 100–105.
12. Bjordal C.G. Microbial degradation of waterlogged archaeological wood. *Journal of Cultural Heritage*, 2012. Vol. 13. Issue 3. pp. S118-S122. DOI: 10.1016/j.culher.2012.02.003.
13. Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model. *Bioresource Technology*, 2015. Vol. 185, pp. 324–330.
14. Naidu Y., Siddiqui Y., Rafii M.Y., Saud H.M., Idris A.S. Investigating the effect of white-rot hymenomycetes biodegradation on basal stem rot infected oil palm wood blocks: Biochemical and anatomical characterization. *Industrial Crops and Products*, 2017. Vol. 108, pp. 872–882.
15. Pokrovskaya E. Increasing the strength of destroyed wood of wooden architecture monuments by surface modification. *MATEC Web of Conferences*, 251, 01034 IPICSE-2018.
16. Pedersen N.B., Bjordal C.G., Jensen P., Felby C. Bacterial degradation of archaeological wood in anoxic waterlogged environments // In: Harding S.E. (ed.) *Stability of Complex Carbohydrate Structures: Biofuels, Foods, Vaccines and Shipwrecks*. Cambridge, 2013. pp. 160-187. DOI: 10.1039/9781849735643-00160.
17. Rabinovich M.L. Lignin by-products of Soviet hydrolysis industry: resources, characteristics, and utilization as a fuel. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2014, no. 48 (7–8), pp. 613–631.
18. Raper K.B., Thom Ch., Fennel D.I. A manual of the Penicillia. Baltimore: Williams and Wilkins, 1949. 875 p.
19. Wetzig M., Sieverts T., Bergemann H. Mechanical and physical properties of wood, heat-treated with the vacuum press dewatering method. *Bauphysik*, 2012. Vol. 34, issue 1, pp. 1–10.

Поступила 13.02.19

UDC 632.4:[69.059+620.186]

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.212

Mycological Investigation of a Wood Substance of Historic Cultural Heritage*

E.N. Pokrovskaya¹, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: [0000-0001-9726-0084](https://orcid.org/0000-0001-9726-0084)

D.V. Adapov², «Arkhsstroyekspertiza» LLC, director;

Yu.L. Kovalchuk³, Candidate of Biology, Senior Research Scientist; ORCID: [0000-0002-0656-008X](https://orcid.org/0000-0002-0656-008X)

*The article was published in the framework of implementation the development program of scientific journals in 2019.

¹National research Moscow state construction university, 26 Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: elenapokrovskaya@bk.ru

²Arkhhstroyekspertiza LLC, 63 Troitsky Ave., Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: dv.agapov@yandex.ru

³Institute of environmental problems and evolution named after A.N. Severtsov of the Russian Academy of Sciences, 33 Leninsky Ave., Moscow, 119071, Russian Federation; e-mail: jilkovalchuk@rambler.ru

The wooden Anglican church developed in Arkhangelsk in 1837 is now a regional site of cultural heritage. The main objective of the present research was to investigate the wood substance of the building elements in order to define their durability and mycological vulnerability. The performed examination revealed that the durability of some wooden components and details of the monument gives cause for concern. The wood substance of those details was investigated by the method of quantitative definition of the viable disrupting spores of fungi per 1 cm² and number of colony-forming microorganisms per 1 g of a test mass. Durability of the wood substance was determined in accordance with GOST 16483.11-72 and GOST 16483.10-72. The objects of the mycological researches were: the crib works (main, northern and lateral facades); the basement; the roof; the window framings. The taxonomical accessory of the allocated strains of microorganisms was determined. As a result of mycological investigation, the biodeteriorating fungi of *Trichoderma viride*, *Trichoderma koningii*, *Fusarium solani* and *Alternaria alternata* were discovered. Detection of the actinomycetes, yeast-like fungi and bacteria confirmed the fungi spores viability. Destructive wood fungi were not found. As a result of determination of wood durability dependence on quantity of the viable spores it is verified that significant destructions of wood substance begins at concentration level more than 100 spore/cm². The presented samples of wood have indicated the mycological stability and durability. During usage of the old and new timber for restoration works, obligatory treatment with the protective agents actively suppressing development of all species of microorganisms, including wood-destructive and mold fungi is recommended. The results of the examination of the wooden Anglican church indicate that combination of on-site and mycological investigations of components of a monument enables preservation of historical monuments for long term.

For citation: Pokrovskaya E.N., Agapov D.V., Kovalchuk Yu.L. Mycological Investigation of a Wood Substance of Historic Cultural Heritage // *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 212–220. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.212

Keywords: wooden Anglican church, on-site investigation, mycological researches of biodestructive microorganisms, determination of durability of wood substance, restoration works.

REFERENCES

1. Bilai S.I., Koval E.S. Aspergilli [Aspergillus]. Kiev. Naukova dumka, 1988, 204 p.
2. Biodamages and biocorrosion to construction. *Proceedings of the International Conference, Saransk, Russia*, 2004, 255 p.
3. Vanin S.I. House mushrooms, their biology, diagnostics and measures of fight. Leningrad, 1931, 112 p.
4. Vahrameeva T.I., Vahrameev E.V., Lyubimtcev A.E. Inspection and preparation of project documentation for antiemergency works on monuments of wooden architecture. Petrozavodsk, 2013, pp. 6–15.
5. Meyer E.I. Determinant of tree painting mushrooms. Moscow – Leningrad. 1953, 116 p.
6. Pokrovskaya E.N. Increase in durability of partially destroyed wood of monuments of wooden architecture. *Vestnik MGSU*, 2018, Vol. 13. no. 11, p. 1305–1314.

7. Pokrovskaya E.N., Kovalchuk Yu.L. Biocorrosion. Preservation of monuments of history and architecture. Moscow, MGSU Publ., 2013. 212 p.
8. Pokrovskaya E.N., Kovalchuk Yu.L. Chemical and mycologic researches of wood. *Proceedings of the International Conference, Yoshkar-Ola, Russia*, 2016, pp. 16–19.
9. Pokrovskaya E.N., Koteneva I.V., Naganovski Yu.K. Durability of protective action of structures for wood on the basis of the organic compounds. *Stroitelnyje materialy*, 2004. p. 52-54.
10. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biological resistance of materials. Saransk, Mordovskiy University Publ., 2001. 196 p.
11. Turkova Z.A. Research of a spontaneous mikoflora of the combined construction materials on a mineral basis. *Biological damages of construction and industrial materials*. Moscow, pp. 100–105.
12. Bjordal C.G. Microbial degradation of waterlogged archaeological wood. *Journal of Cultural Heritage*, 2012. Vol. 13. Issue 3. pp. S118-S122. DOI: 10.1016/j.culher.2012.02.003.
13. Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model. *Bioresource Technology*, 2015. Vol. 185, pp. 324–330.
14. Naidu Y., Siddiqui Y., Rafii M.Y., Saud H.M., Idris A.S. Investigating the effect of white-rot hymenomycetes biodegradation on basal stem rot infected oil palm wood blocks: Biochemical and anatomical characterization. *Industrial Crops and Products*, 2017. Vol. 108, pp. 872–882.
15. Pokrovskaya E. Increasing the strength of destroyed wood of wooden architecture monuments by surface modification. *MATEC Web of Conferences*, 251, 01034 IPICSE-2018.
16. Pedersen N.B., Bjordal C.G., Jensen P., Felby C. Bacterial degradation of archaeological wood in anoxic waterlogged environments // In: Harding S.E. (ed.) *Stability of Complex Carbohydrate Structures: Biofuels, Foods, Vaccines and Shipwrecks*. Cambridge, 2013. pp. 160–187. DOI: 10.1039/9781849735643-00160.
17. Rabinovich M.L. Lignin by-products of Soviet hydrolysis industry: resources, characteristics, and utilization as a fuel. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2014, no. 48 (7–8), pp. 613–631.
18. Raper K.B., Thom Ch., Fennel D.I. A manual of the Penicillia. Baltimore: Williams and Wilkins, 1949. 875 p.
19. Wetzig M., Sieverts T., Bergemann H. Mechanical and physical properties of wood, heat-treated with the vacuum press dewatering method. *Bauphysik*, 2012. Vol. 34, issue 1, pp. 1–10.

Received on February 13, 2019