

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

1/367

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. (Белоруссия, Минск)  
**Черных В.Л.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)  
**Ширнин Ю.А.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)  
**Штукин С.С.**, д-р с.-х. наук, проф. (Белоруссия, Минск)  
**Энгельманн Х.-Д.**, д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

---

ISSN 0536-1036

DOI: 10.17238/issn0536-1036

MINISTRY OF 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

1/367

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. (Belarus, Minsk)  
**Chernykh V.L.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)  
**Shirnin Yu.A.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)  
**Shtukin S.S.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Belarus, Minsk)  
**Engelmann H.-D.**, Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)

---



## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- P. Angelstam, M. Manton, O. Khaulyak, V. Naumov, S. Pedersen, N. Stryamets, J. Törnblom, S. Valasiuk, T. Yamelynets.* Knowledge Production and Learning for Sustainable Forest Landscapes: The European Continent's West and East as a Laboratory..... 9
- И.Т. Кищенко.* Формирование древесины ствола *Picea abies* (L.) Karst. в разных типах сообществ таежной зоны..... 32
- С.А. Мошников, В.А. Ананьев, В.А. Матюшкин.* Особенности аккумуляции порубочных остатков в спелых сосняках средней тайги (на примере Республики Карелия)..... 40
- И.И. Ревяко, В.С. Манченко, Е.И. Ревяко.* Декоративность *Aësculus hippocástanum* в условиях урболандшафта «Новочеркасск»..... 52
- Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов, П.В. Ершов.* Генотипическая обусловленность пигментного состава хвои плюсовых деревьев ели европейской..... 63
- В.П. Макаров, О.Ф. Малых, И.В. Горбунов, Л.Н. Пак, Ю.В. Зима, Е.А. Банщикова, Т.В. Желибо.* Влияние пожаров на флористическое разнообразие сосновых лесов Восточного Забайкалья..... 77
- Е.И. Захарова.* Глубины зимнего покоя древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl., интродуцированных в Нижегородской области..... 87
- А.И. Горкин.* О возможности переработки сосновой живицы на местах ее заготовки 96

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая, О.И. Григорьева.* Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом..... 106
- К.П. Рукомойников, С.В. Ведерников.* Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки..... 120

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Г.Ф. Прокофьев, М.Ю. Кабакова, Т.В. Цветкова.* Применение современных методов конструирования при совершенствовании лесопильных станков... 128

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Т.Е. Бойкова, Н.И. Богданович, К.Б. Воронцов.* Эффективность применения коагулянтов при водоподготовке в целлюлозно-бумажной промышленности в условиях Севера..... 141

- А.В. Сафина, Н.Ф. Тимербаев, Д.Ф. Зиятдинова, Р.Г. Сафин, А.Р. Хабибуллина.*  
Моделирование тепломассопереноса в пиролизной зоне..... 153

*КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ*

- А.С. Афанасьев, М.А. Болдырев, П.С. Воронцов, В.М. Суслов, Ю.Т. Котов,  
В.К. Вороницын, А.А. Камусин.* Система контроля и управления высоко-  
мощных литий-ионных аккумуляторных батарей..... 161

*КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ*

- В.С. Шалаев.* Новая книга о Международном союзе лесных исследовательских  
организаций..... 171
-



## CONTENTS

## FORESTRY

- P. Angelstam, M. Manton, O. Khaulyak, V. Naumov, S. Pedersen, N. Stryamets, J. Törnblom, S. Valasiuk, T. Yamelynets.* Knowledge Production and Learning for Sustainable Forest Landscapes: The European Continent's West and East as a Laboratory..... 9
- I.T. Kishchenko.* Formation of *Picea abies* (L.) Karst. Trunk Wood in Different Taiga Zone Communities..... 32
- S.A. Moshnikov, V.A. Anan'yev, V.A. Matyushkin.* Accumulation Features of Debris in Mature Pine Forests of Middle Taiga in the Republic of Karelia..... 40
- I.I. Revyako, V.S. Manchenko, E.I. Revyako.* Decorative Effect of *Aësculus hippocástanum* under the Conditions of Novocherkassk Urban Landscape..... 52
- N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, P.V. Ershov.* Genotypic Conditionality of Plus Tree Needle Pigment Composition of Norway Spruce..... 63
- V.P. Makarov, O.F. Malykh, I.V. Gorbunov, L.N. Pak, Yu.V. Zima, E.A. Banshchikova, T.V. Zhelibo.* Influence of Fires on Pine Forest Floristic Diversity of the Eastern Transbaikal Territory..... 77
- E.I. Zakharova.* Winter Dormancy Depths in Some Woody Species of the *Fabaceae* Lindl. Family Introduced in Nizhny Novgorod Region..... 87
- A.I. Gorkin.* On the Potential of Pine Sap Processing in the Places of Its Extraction.... 96

## WOOD EXPLOITATION

- S.E. Rudov, V.Ya. Shapiro, I.V. Grigor'ev, O.A. Kunitskaya, O.I. Grigor'eva.* Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils..... 106
- K.P. Rukomoynikov, S.V. Vedernikov.* Modernization of Harvester Head Delimiting Knife..... 120

## MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- G.F. Prokof'ev, M.Yu. Kabakova, T.V. Tsvetkova.* The Use of Modern Design Methods in Saw Machine Development..... 128

## CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- T.E. Boykova, N.I. Bogdanovich, K.B. Vorontsov.* The Efficiency of Coagulants in Water Treatment in the Pulp and Paper Industry in the North..... 141

- A.V. Safina, N.F. Timerbaev, D.F. Ziatdinova, R.G. Safin, A.R. Khabibullina.* Heat and Mass Transfer Simulation in the Pyrolysis Zone..... 153

*BRIEF SUMMARIES*

- A.S. Afanas'ev, M.A. Boldyrev, P.S. Vorontsov, V.M. Suslov, Yu.T. Kotov, V.K. Voronitsin, A.A. Kamusin.* The Control and Management System of High-Power Lithium-Ion Batteries..... 161

*CRITIQUE AND BIBLIOGRAPHY*

- V.S. Shalaev.* New Book on the International Union of Forest Research Organizations 171
-



UDC: [630\*1+502](4)

OECD: 04.01.KA:01.06.GU

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.9

**KNOWLEDGE PRODUCTION AND LEARNING FOR SUSTAINABLE FOREST LANDSCAPES: THE EUROPEAN CONTINENT'S WEST AND EAST AS A LABORATORY\****Per Angelstam<sup>1,2</sup>, PhD, Professor**Michael Manton<sup>2</sup>, PhD, Researcher**Olga Khaulyak<sup>3</sup>, MSc, Analyst**Vladimir Naumov<sup>4</sup>, PhD, Analyst**Simen Pedersen<sup>5</sup>, PhD, Associate Professor**Natalie Stryamets<sup>6</sup>, PhD, Researcher**Johan Törnblom<sup>1</sup>, PhD, Researcher**Sviataslau Valasiuk<sup>7</sup>, PhD, Researcher**Taras Yamelynets<sup>8</sup>, PhD, Associate Professor*

<sup>1</sup>School for Forest Management, Faculty of Forest Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, PO Box 43, Skinnskatteberg, SE-739 21, Sweden; e-mail: per.angelstam@slu.se, johan.tornblom@slu.se

<sup>2</sup>Institute of Forest Biology and Silviculture, Faculty of Forest Science and Ecology, Aleksandras Stulginskis University, Studentu, 13, Akademija, Kauno, LT-53362, Lithuania; e-mail: per.angelstam@slu.se, michael.manton@asu.lt

<sup>3</sup>Agency for Development and Cooperation, Chornovola Avenue, 63, Office 706, Lviv, 79000, Ukraine; e-mail: okhauyak@gmail.com

<sup>4</sup>Metria AB, Gävle, SE-801 23, Sweden; e-mail: vladimir.v.naumov@gmail.com

<sup>5</sup>Department of Forestry and Wildlife Management, Faculty of Applied Ecology, Agricultural Sciences and Biotechnology, Inland Norway University of Applied Sciences, Campus Evenstad, Koppang, N-2480, Norway; e-mail: simen.pedersen@inn.no

<sup>6</sup>Foscari University of Venice, Via Torrino 155, Venice, Italy; e-mail: natastr@gmail.com

<sup>7</sup>University of Warsaw, Długa str., 44/50, Warszawa, 00-241, Poland; e-mail: svalasiuk@wne.uw.edu.pl

<sup>8</sup>Ivan Franko National University, Faculty of Geography, Doroshenko str., 41, Lviv, 79000, Ukraine; e-mail: taras.yamelynets@gmail.com

---

\**Acknowledgements:* This paper is dedicated with deep appreciation to Marine Elbakidze, without whom the work reported here would not have happened. The inspiration for this review article was a round-table discussion among a broad range of stakeholders about sustainable forest management led by Per Angelstam in Arkhangelsk 2017-11-30, initiated by Mårten Frankby at the Swedish Consulate in Saint Petersburg. Funding for this work was received from Marcus and Amalia Wallenberg Foundation, SIDA, Swedish Institute, Swedish Ministry of Environment, and FORMAS (grants 2011-1737 and 2017-1342). We thank Olga Bourlak, Fatima Cruz and Sergey Koptev for stimulating comments.

*For citation:* Angelstam P., Manton M., Khaulyak O., Naumov V., Pedersen S., Stryamets N., Törnblom J., Valasiuk S., Yamelynets T. Knowledge Production and Learning for Sustainable Forest Landscapes: The European Continent's West and East as a Laboratory. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 9–31. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.9

To support human well-being, green (or ecological) infrastructure policy stresses the need to sustain functional networks of representative terrestrial and aquatic ecosystems for the sustainable provision of multiple ecosystem services. Implementing this means that the complexity of interactions between social and ecological systems at multiple spatial scales and levels of governance needs to be understood. Place-based knowledge production and learning through integration of different research disciplines in collaboration with actors and stakeholders (i.e. transdisciplinary research) is a key feature to achieve this goal. Using a suite of local landscapes and regions on the European continent's West and East as a laboratory, we developed and applied a step-wise approach to produce knowledge and encourage learning towards functional green infrastructures. Our diagnoses of forest landscapes show that the functionality for wood production and biodiversity conservation was inversely related in the gradient from long to short forest management histories. In Europe's West there is a need for increased quantity of, and more functional, protected areas; diversification of management methods; and landscape restoration. In NW Russia there are opportunities to intensify forest management, and to continue the land-sparing approach with zoning for different functions, thus reducing biodiversity loss. Examples of diagnoses of social systems included the evaluation of comprehensive planning in Sweden, outcomes for biodiversity conservation of forest certification in Lithuania, and learning from environmental managers. We conclude that the main challenge for securing functional green infrastructure is poor cross-sectoral integration. Treatment of social-ecological systems requires knowledge-based collaboration and learning. The diversity of landscape histories and governance legacies on the European continent's West and East, including Russia, offers grand opportunities for both knowledge production about performance targets for green infrastructure functionality, as well as learning to adapt governance and management to regional contexts. Integrating project funding for both researchers and stakeholder collaboration is a necessary strategy to fill the transdisciplinary research agenda. However, formal and informal disciplinary and administrative barriers can limit team building despite self-reflection and experience.

*Keywords:* biodiversity, bio-economy, collaboration, ecosystem services, environmental history, gap analysis, governance, green infrastructure, habitat modelling, intensification, landscape approach, planning, stakeholder mapping, transdisciplinary, rural development.

### *Introduction*

Natural capital, in terms of species, habitats and ecosystem processes, is the ultimate base for the provision of ecosystem services supporting human well-being. Today, the demands on what different ecosystems in landscapes are expected to deliver in terms of goods, functions and values is increasing. Intensified land and water use for production of wood, food, feed and energy results in loss and fragmentation of habitats for both wild species and humans in rural and urban landscapes. To satisfy multiple ecosystem services there is a need to maintain many types of land covers as functional networks. The EU policy concept green infrastructure captures this [25]. Examples of green infrastructure include different kinds of forests and other wooded land, grasslands, wetlands, rivers and streams, and urban green space. Working towards functional green infrastructures calls for the integration of sustainable use of ecosystems natural resources, protected area development and landscape restoration. This requires governance and management approaches, which integrate public, private and civil sectors at multiple levels in society, and treat landscapes as coupled social-ecological systems. Ecological, economic and socio-cultural sustainability pillars all need to be included into landscape governance and management. However, this is often neglected because individual sectors tend to focus on their own aspect of sustainability without sufficiently addressing conflicting objectives, or even avoiding making them visible.

The term landscape approach captures the need to develop locally and regionally adapted sustainable solutions in landscapes as social-ecological systems [20, 69, 70]. Landscape approach is about carrying out place-based transdisciplinary research with stakeholders. This requires (1) sufficient time to develop collaborative capacity among participants: “gyroscope” according to [53]; (2) existence of long-term data about the states and trends of ecological and social systems: “compass” according to [53]; and (3) sufficient coordination [5, 8]. A wide range of concepts aimed towards place-based knowledge production and engaged stakeholder collaboration have emerged. One such concept is the Long-Term Socio-Ecological Research (LTSER) platform [e.g., 45, 73]. Other examples are Model Forest [59] and Biosphere Reserve [22]. The focus in all of them is on continuous relevant knowledge production and learning towards securing sustainable landscapes.

The aim of this paper is to advocate the need for collaborative evidence-based knowledge production and collaborative learning about how to satisfy economic, ecological and socio-cultural dimensions of forest landscapes by combining evidence-based knowledge and collaborative learning. We summarise a decade of development and application of diagnosis and treatment of different green infrastructures, and their governance, planning and management toward functionality, in rural and urban landscapes [6–9]. First, we focus on concrete tools that can help facilitate evidence-based collaborative learning and decision making processes. For ecosystems these are regional gap analysis of green infrastructure supporting strategic planning, habitat suitability modelling supporting spatial planning, and habitat restoration. For social systems these are stakeholder mapping, policy implementation and horizon scanning. Second, we present examples of results from our research in regions with different forest landscape histories and landscape governance systems on European continent’s West and East, such as in the Baltic Sea region and NW Russia. Finally, we discuss the barriers and bridges towards transdisciplinary research, developing cultures of collaborative learning, and introduction of problem-based learning in education.

#### *Policy context*

The dominant natural potential vegetation in most of the European continent is forest. Forests provide a range of goods, services and values that create opportunities to address many of the most pressing sustainable development challenges [84]. The gradual emergence of policy on sustainable forest management (SFM) reflects a transition from harvesting of forest in naturally dynamic forests and development of sustained yield wood production on the one hand, to also satisfying ecological and socio-cultural objectives on the other [33]. This increased complexity has resulted in the need to transition from single to multiple spatial planning scales within local administrative units and regions [8]. The policy term green (or ecological) infrastructure as a means of sustaining natural capital as a base for providing ecosystem services for human well-being captures this (Figure 1).

Currently, new policy objectives, such as forestry intensification for climate change mitigation have appeared [60]. This further complicates previous challenges of biodiversity conservation and rural development [13, 62, 63, 77]. Intensification, which links closely to terms like bio-economy, bio-based economy and knowledge-based bio-economy, is becoming a new influential forestry discourse. There are indications that the bio-economy discourse is beginning to dominate the previous sustainable forest management discourse, which simultaneously considers economic benefits, forest biodiversity conservation and rural development [66]. There are thus

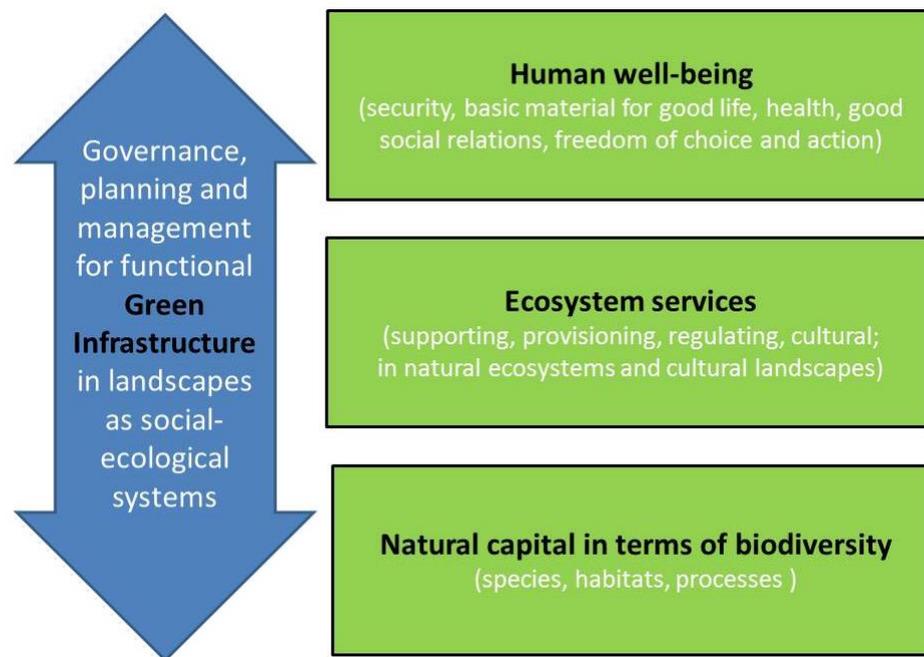


Fig. 1. The policy term “green infrastructure” [9, 25] conceptualizes the need to maintain sufficient amounts of representative ecosystems as functional networks by spatial planning. Green infrastructure is a tool towards delivering ecosystem services and human well-being

tensions between different SFM objectives; notably between increased production and extraction of forest biomass, and the contributions made by the same biomass to soil fertility, biodiversity and protective functions [14, 85]. Production of wood versus non-wood forest products in rural areas is another example [65, 77]. Translating SFM policy objectives into action on the ground is therefore described as a “wicked problem” [e.g., 30]. Thus, there is a need for new collaborative decision-making approaches towards sustainable use of forest goods, services and values [20, 70]. This stresses the need to assess the role of alternative forest value chains for economic, ecological and social dimensions of SFM in time and space [e.g., 63].

#### *Methodology*

##### A tool-box for diagnosis and treatment towards sustainable landscapes

To support knowledge production and learning towards functional representative habitat networks as green infrastructure in landscapes requires integration of academic and non-academic actors. This means that researchers representing humanities, social sciences and natural sciences, as well as stakeholders in the landscape, co-produce the knowledge needed to protect, manage and restore functional habitat networks [20]. The term transdisciplinary research captures this [2]. Viewing landscapes as individuals, we use a systematic case study approach (e.g., [42]) in seven steps [6] to “diagnose” green infrastructures as well as societal steering processes, and to identify “treatments” to maintain functional green infrastructures (Figure 2). Comparing landscapes, such in the Baltic Sea Region and NW Russia (Figure 3), which host regions and countries with different governance systems and landscape histories, is an innovative approach [5, 6, 8, 35].

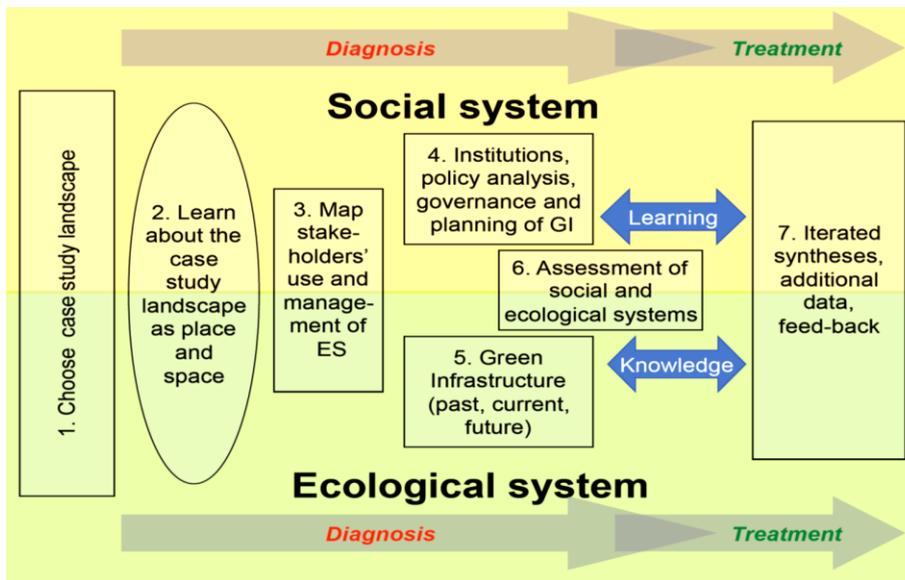


Fig. 2. Knowledge production and learning towards functional green infrastructure require a systematic approach [5, 8, 19]. For each landscape case study, both diagnoses and treatment are needed. Firstly, diagnoses of both the ecological system and the social system are made to understand barriers and bridges for a functional green infrastructure (steps 1–6). Secondly, treatment is provided in the form of knowledge production and social learning through analyses and visualization tools as a basis for integrated spatial planning by actors from different levels and sectors of society (steps 6–7)

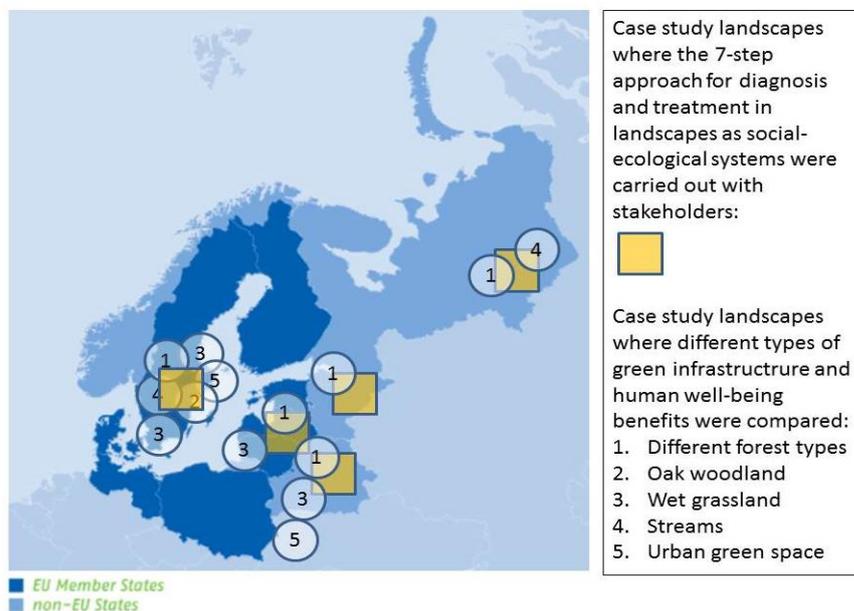


Fig. 3. The Baltic Sea Region and NW Russia in northern Europe's West and East hosts a steep gradient of landscape histories ranging from long to short, and with different approaches to governance and planning. This forms a valuable laboratory for knowledge production and learning towards sustainable forest landscapes [8, 9, 35].

Map from Interreg Baltic Sea Region (interreg-baltic.eu)

## The ecological system

### Gap analysis for strategic planning

The aim of a regional gap analysis is to present and apply an evidence-based systematic approach to support strategic planning towards learning for conservation, management and restoration of functional habitat networks as green infrastructure (e.g., [16]). This involves several steps. First, analyses are made of the transitions of representative types of potential natural vegetation to new land covers managed to derive human benefits. Second, the present amount of representative land covers is compared with what is needed to maintain natural biodiversity in the long term. This should be grounded on evidence-based knowledge about tipping points for how much habitat loss that can be accepted without losing species [3]. Third, the necessary amount of protected and other conservation areas to the current amount among representative land covers is estimated.

The results from quantitative gap analysis can then be fed into a hierarchical conservation planning processes (e.g., [3]). Once identified, gaps may be filled through new reserve acquisitions or designations, or through changes in management practices. The goal is to ensure that all ecosystems are represented adequately [71]. This involves (1) formulation of long-term strategic quantitative targets regarding the amount of areas to be allocated to land use that maintains natural and anthropogenic land covers that are not compatible with intensive forestry and agriculture (e.g., [79]), (2) development of tactical spatial planning about where action (protection, management and restoration) is needed based on analyses of the functionality of different types of set-asides as green infrastructure (e.g., [39]), and (3) operational execution of these plans by establishing set-asides with appropriate management, including allocation of required funding to carry out management, to compensate land users and owners for the limitations in land use that follow from area protection, how traditional village systems can be maintained, or to acquire land for conservation.

### Habitat modelling for spatial planning

Habitat Suitability Index (HSI) modelling can assist tactical spatial planning towards maintaining functional habitat network. HSI-models combine empirical knowledge about focal species' habitat requirements using variables and parameter values for relevant land covers, digital land cover data, and a geographic information system (GIS) to run ecologically relevant spatial models (e.g., [57]). The focal species approach is a useful starting point for biodiversity conservation in that it provides explicit recommendations rather than general principles. This approach allows transparent spatially explicit predictions for the expected occurrence of particular species, such as resident woodland birds [43, 63]. Focal species modelling can be used to help predict the effects of land use change on habitat networks [48]. The creation of HSI models involves three main steps; (1) the selection of patches with suitable forest land covers, as required by the target focal species; for example a certain forest type with a certain age class and tree species structure; (2) removal of patches not satisfying the minimum areas required by the target focal species; and (3) identification of areas where patches are sufficiently concentrated to meet the species-specific critical thresholds at the landscape level [1]. This results in a probability map identifying areas where the focal species may be found.

### Operational landscape and habitat restoration

The long-term focus of traditional forest management on high wood and biomass yields has resulted in a predominance of even-aged forest management in Europe's West (e.g., [64]). This has simplified forest landscapes' composition,

structure and function, and has reduced the amount of habitats for both wild species and human well-being to low levels [37]. This calls for defining benchmarks for habitat and landscape restoration [56], and appropriate management methods be developed. For wild species emulation of natural forest disturbance regimes, to which species have adapted, is one approach to derive forest management alternatives (e.g., [44]). For studies of human well-being suitable survey-based approaches include semi-structured interviews with rural and urban citizens (e.g., [37]), and Discrete Choice Experiments (DCE) involving representative samples of a population as a means of defining the desired land cover types [86, 87].

### The social system

#### Mapping of stakeholders

According to the Aarhus Convention [26] citizens can more effectively conserve the environment if they can rely on this convention's three pillars (i) access to information, (ii) public participation in decision-making, and (iii) access to justice in environmental matters. To identify key actors and stakeholders linked to a particular place or topic, one must consider all people or groups that are affected by, can influence, or may have an interest [31]. Stakeholder mapping can be done by a research team, but works better in collaboration with relevant organisations and local key informants, and should be carried out throughout the project to ensure key groups are included. Identification of stakeholders is an iterative process, for example by following a snowball sampling approach until no new stakeholders are identified. Stakeholders can then be grouped, for example as belonging to private, public and civil sectors; local, regional and national levels of governance; and having different levels of participation in the topic at hand [36].

#### Barriers for policy implementation

To understand the extent to which a particular policy or norm is handled through governance, planning and management, one can define a normative model for how different societal actors should ideally act to implement policies (e.g., [24]. This can be applied to (1) the policy process, (2) to outputs (e.g., a planning process or management approach) or (3) the consequences the process has for the issue at hand (e.g., biodiversity conservation in terms of population viability) (see [67]). How does a particular policy take into account different stakeholders' realities and needs? Is the perspective rural or urban, or on goods, services or values? According to [55] there are three prerequisites need to be realised for the effective implementation of policies, say, through planning and management outputs. First, actors need to understand what is expected. This can be derived from policy documents and from existing scientific knowledge. Second, actors need to have essential resources (e.g., data, tools, staff, money). Third, they need to have the willingness to act. Finally, the consequences on the ground for economic, ecological and socio-cultural aspects of sustainability need to be assessed.

#### Horizon scanning for the future

Social science with a "phronetic (prudent) approach... is to carry out analyses and interpretations of the status of values and interests in society aimed at social commentary and social action, i.e. praxis..." [41]. This can be addressed through three questions: Where are we going? Is this desirable? What should be done? Horizon scanning for the future is an approach to address those questions. It is the formal process of gathering, processing and disseminating information to support decision-making in the future (e.g., [72]). Various methods exist and may comprise questionnaires, focus groups and workshops conducted in various forms but also use of

issue trees, literature search, trend analysis and scenario planning [23, 78]. A horizon scanning is both an approach to begin the process of knowledge production and learning with stakeholder groups, and to interpret and discuss the results. By comparing stakeholders' perceptions with contents of policies, such as the United Nation's sustainable development goals [84], a "gap analysis" also for human well-being in rural and urban development contexts can be made.

#### *Review of results*

##### The ecological system

###### Gap analysis for strategic planning

Angelstam P. and Andersson L. [1] estimated the need for protected areas to maintain forest biodiversity in Sweden. Using habitat loss thresholds for long-term survival of specialised species in different forest types they estimated that, depending on the type of natural forest dynamic, the long-term need of protected areas ranged from 9 % in northern Sweden to 16 % in southernmost Sweden. No need for protected areas was assumed for forest environments that can be emulated by forest management that mimics natural forest disturbance regimes, which is more difficult for forest types typical for southern Sweden. A follow-up 10 years later [3] concluded that existing area of protected and set-aside forests is presently too small and with too poor connectivity. However, because the ideas about novel biodiversity-friendly forest management system aimed at mimicking natural forest dynamic (e.g., [44]) were never realised, the need of protected areas is actually higher [8].

As an example, a gap analysis was conducted for the Ukrainian Carpathians as the first attempt to provide a quantitative estimation of the needs to maintain green infrastructures represented by both natural forests and biocultural landscape values in this ecoregion [16]. The results clearly indicate two patterns. Regarding natural forests, loss of forest areas (especially lowland broadleaved forests), tree species replacement (Norway spruce monoculture forestry, and forestry intensification) are the key problems threatening forest naturalness. Regarding cultural landscapes, they are currently maintained as a result of the need for people in rural areas to secure their livelihoods by subsistence farming. For NW Russia, Kobayakov K. and Jakovlev J. [18] reported gaps and limited representativeness of the protected area network.

When performing gap analyses for biodiversity conservation it is crucial to have evidence-based knowledge about thresholds for how much habitat that is needed to maintain viable populations of species that represent different levels of specialisation and land covers. Research on land-use history and land cover change forms an important avenue to define benchmarks for green infrastructure maintenance, and to facilitate learning towards understanding the development trajectories of functionality of habitat patch networks. Manton M. and Angelstam P. [56] defined an approach to derive evidence-based knowledge about how much (amount, quality, and patch size requirements) habitat is enough to maintain viable populations of species. Using a representative example of the European landscape gradient between agricultural and forest landscapes in southern Sweden [58], they analysed the historic range of variability of the total area, quality, and size of grassland patches, and compared this to the requirements of focal grassland species. To develop evidence-based performance targets also for aquatic habitats, a suite of representative aquatic species needs to be analysed with respect to their qualitative and quantitative habitat requirements

(e.g., [81–83]). In Sweden the application of aquatic gap analyses for fish species is enhanced due to available databases on fish and habitats (see [82]).

#### Habitat modelling for spatial planning

Manton M. et al. [57] applied Habitat Suitability Index (HSI) models using three different Swedish forest spatial land cover data sets. Results showed that this method is an appropriate way to gain insight into the functionality and connectivity of habitat networks. However, land cover data used must be carefully, evaluated and combined with other landscape information for effective conservation planning of particular forest stand types (e.g., [75]). Quality assurance through validation of HSI-models with independent field data is important [32].

Angelstam P. et al. [14] and Naumov V. et al. [63] used two types land cover data and a macroecological approach along the steep West-East gradient in the Baltic Sea Region and NW Russia to assess regional profiles of economic vs. ecological benefits delivered by forest landscapes. They found an inverse relationship between the opportunities for economic benefits based on intensive wood and biomass production on the one hand, and biodiversity conservation on the other (Figure 4).

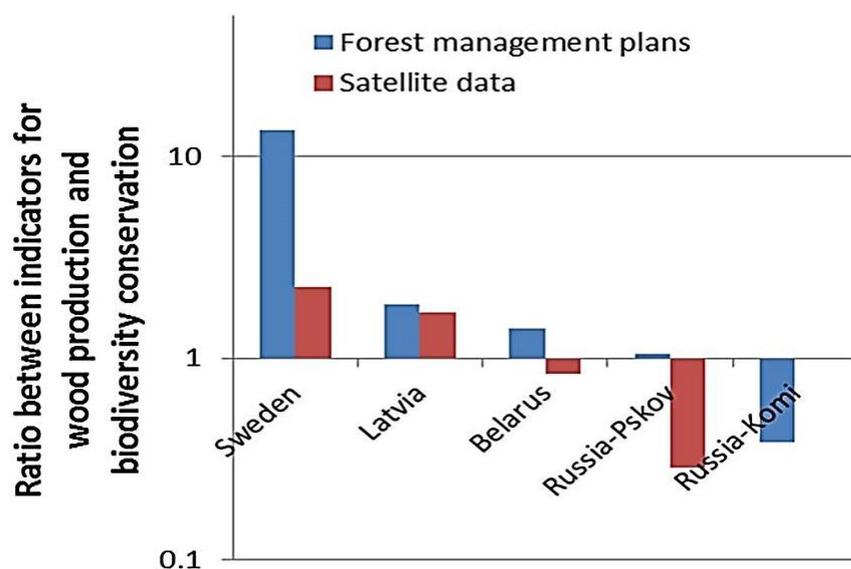


Fig. 4. Spatial data based on open access remote sensing [14] and forest management plans [63] showed that green infrastructures for wood production and biodiversity conservation, using for example resident birds as indicators, are inversely related among the case study regions. Therefore, while restoration for biodiversity conservation is needed in the West, intensified use of wood and biomass is possible in the East. However, a cautious approach should be applied because intensification of wood production threatens biodiversity

Study areas in NW Russia demonstrated the highest levels of biodiversity, whereas economic indicators were low. This can be explained by insufficient road network and undeveloped legislation that inhibit proper silvicultural treatments such as pre-commercial thinning [13, 61]. Comparing the contribution of voluntary set-asides within the framework of forest certification in Lithuania showed that formally protected areas were more important for green infrastructure than voluntary set-asides within forest certification [39]. Thus, HSI models are a tool that can help to resolve a wide range of barriers when managing landscapes for the maintenance of biodiversity.

### Operational landscape and habitat restoration

Maintenance of functional habitat networks requires restoration at different spatial scales. A study at the landscape scale conducted in Fulufjället National Park located across the border between Norway and Sweden revealed that restoration of naturalness of forest habitats in the surrounding managed matrix is viewed as an economically viable option by citizens in both countries [87]. In contrast, results of the twin study conducted in the Bialowieza National Park located across the border between Poland and Belarus provided rather mixed evidence [86]. This was due to the considerable proportion of respondents preferring status-quo in terms of the protected area.

Operational stream restoration and riparian forest conservation management requires both a local perspective, and integration at the catchment level [80, 89] of water, forest, nature conservation and forest education actors [15]. Using a local stream section and an entire river catchment Törnblom J. et al. [82] developed evidence-based knowledge about the habitat requirements of brown trout, and applied this to local practical dam removal in the field to get practical experience and build trust and confidence between involved stakeholders. Students of a forestry BSc programme regularly take part in planning activities for forest management close to aquatic environments, and local concrete actions and demonstration sites evolved with the vision to make an entire river catchment into a landscape based laboratory of different study and demonstration sites of different collaboration initiatives in space and time. The impact of this study was scrutinized using system thinking approach [27].

### The social system

#### Mapping of stakeholders

Governance includes structures and processes, through which stakeholders may make and implement decisions. Elbakidze M. et al. [36] compared Swedish (Vilhelmina and Bergslagen) and Russian (Komi and Pskov) Model Forest initiatives, and showed that the stakeholders encompassed all societal sectors, i.e., civil, private, and public. However, in three of the MFs, more than 40 % of stakeholders represented just one sector. In Bergslagen and Komi there was a balance between stakeholders at local to global levels. In Vilhelmina Model Forest, almost 50 of all stakeholders represented local-level stakeholders. Model Forest initiatives represent attempts to establish a new type of governance of forest landscapes in both the Russia and Sweden. In both countries stakeholders of the Model Forest initiatives had begun to develop a network-based type of governance system locally to internationally (e.g., [21]).

#### Barriers for policy implementation

As top-down approaches only cannot sustain forest goods, services and values in an effective way, new non-state-centred civil society and market oriented means of decision-making are emerging [46, 76]. Many studies describe new ways of governance that go beyond the centralised state [17, 46]. FSC certification is one example of an informal institutional governance instrument. At the policy level Elbakidze's et al. [39] study on FSC certification outcomes for biodiversity conservation in Lithuania shows that there was a clear mismatch between criteria and indicators related to biodiversity in the FSC standard and evidence-based knowledge. A key gap in the standard in Lithuania was the lack of any requirement to maintain connectivity of habitats. There are also context-specific differences in environmental policy implementation, both within and among countries. Henry L.A. and Tysiachniouk M. [47] showed that forest companies in NW Russia are more ecological-

ly responsible than those in the Russian Far East. This regional variation is explained by different levels of biodiversity, proximity to markets that are not sensitive to FSC certification and different degrees of penetration by multi-national companies. A comparison of the Russian and Swedish FSC standards by Elbakidze M. et al. [34] showed that the Russian standard included indicators for all spatial scales of biodiversity conservation (tree, stand, landscape, ecoregion) while the Swedish mainly on stand and tree scales. Additionally, set-aside areas for biodiversity conservation in Sweden were two orders of magnitude smaller than in Russia, had much lower structural and potential functional connectivity and were located in a fragmented forestland holding.

Spatial planning is a necessary tool to integrate economic, ecological, socio-cultural policy agendas. Regarding planning processes, as shown by Blicharska M. et al. [24] about biodiversity conservation including stakeholder participation in Poland, planners had insufficient knowledge about both those topics, limited resources and tools for planning of functional habitat networks and collaboration, poor connections between local and regional planning, and limited public participation. The key problem was related to planners' ability to act. In Sweden, comprehensive planning by municipalities aims to steer territorial development and help to solve conflicts among different interests. Also in the Swedish Bergslagen region, planners experienced difficulties to integrate different topics and engage stakeholders in long-term spatial planning [38]. Supplying data about the state and trends of different dimensions of sustainability is one way forward [19].

Blicharska et al. [24] also showed that participation in planning can be a challenge. The Aarhus Convention [26] and the Access to Environmental Information Directive [28] and the INSPIRE Directive [29] together create a legal foundation for the sharing of environmental information between public authorities and with the public in EU countries. However, implementation takes time. In Poland for example, according to The Environmental Implementation Review (EIR) (EU, 2017) not all spatial information needed for the evaluation and implementation of EU environmental law in Poland has been made available or is accessible on the INSPIRE geoportal. However, Poland has taken steps to centralise information about the data (i.e. metadata) using the national geoportal ([geoportal.gov.pl](http://geoportal.gov.pl)) and reforming the public environmental data policy, aiming for a higher level of transparency and the larger part of this missing spatial information is available under this service. At the same time the Environmental Implementation Review show that Sweden's performance on the implementation of the INSPIRE Directive as enabling framework to actively disseminate environmental information to the public is good, but needs some improvement in the part of accessibility of missing documented spatial data sets 'as is' to other public authorities and the public through the digital services.

#### Horizon scanning for the future

Here we present two examples of wicked problems, viz. large carnivore conservation at the expense of the rural population, and reconciling intensive forest management, biodiversity conservation and nature-based tourism.

Centralized management of large carnivore populations in rural and remote landscapes used by local people often leads to conflicts between the objectives of wildlife conservation and rural development. The return and recovery of wolf populations in Scandinavia is an example where the wolf's ecological needs for suitable habitat and prey may be satisfied [54, 88]; but where the social and economic pillars of the sustainability concept in rural settings are neglected [40, 50, 74]. In Norway,

recovery the wolf population have been politically decided at the international and national levels, but needs to be put into force and tolerated locally on privately owned property in rural and remote areas [49]. This may have economic costs to the rural population. The assumed mechanism is that hunters fear that their economically and culturally valuable hunting dogs may be killed by wolves [52], which results in reduced hunting and thus reduced revenues for the landowners. It is important to note that while the economic impacts of wolves may be compensated where governments have the will and the economic resources, the impacts on the lifestyles of rural people (e.g., hunter's fear of losing prized dogs to wolves) will remain controversial. Acknowledging these economic and social consequences of hosting wolves is important for successful wolf conservation.

Evoked by international policy developments, and a national strategy for long-term sustainable land use, Sweden developed a national forest programme in 2016 – 2018 that aims at increased wood and biomass production, biodiversity conservation and rural development. However, this involves conflicts between different types of use of forest landscapes at multiple scales. It also affects the portfolios of ecosystem services that can be delivered in a particular forest area. Laxå municipality in the informal Bergslagen region is a good example with most forests aimed at wood and biomass production [12]. During spring 2017, Laxå pronounced itself as an “ecotourism area”. The assets are the forests in the southernmost boreal forest massif in Sweden, and with Tiveden National Park as the focal area for nature-based tourism. How to plan for and satisfy different interests are key issues. Following the Model Forest concept's recipe of partnership towards sustainability in a landscape, “Collaboration Tiveden” was established. It represents the municipality Laxå, the state forest company Sveaskog, and local tourism businesses. The focus is on how to use a 20 square km “buffer zone” on Sveaskog's land around Tiveden National Park to develop other forest management methods than the prevailing clear-felling systems. The aims are to learn what visitor-friendly forestry methods involve, and to include both traditional and new forest benefits into spatial planning.

#### *Discussion*

##### Mutual learning for sustainable forest landscapes

Achieving sustainable development as an inclusive societal process, which results in sustainability and resilience on the ground in the relationship between human societies and the natural environment in real-world landscapes is a grand challenge. Comparing NW Russia and Sweden Nordberg M. et al. [64] showed that challenges and experiences are in some cases very different, and in other cases very similar. Thus, there is opportunity for mutual learning. This is emphasised by the fact that forestry is a global business, both in terms of trade and concerning international agreements, including conservation planning. Regions in different stages and trajectories of development can learn from each other to improve their approaches to forest governance, planning and management [4]. Border regions, such as between EU and non-EU countries are particularly interesting [11, 87].

To encourage the necessary collaborative learning among actors and stakeholders, there is a need to develop integrated place-based partnerships involving all key players across different sectors at multiple levels in local landscapes that matter to people living there. The term landscape approach captures this, and focuses on strengthening cultures of maintaining inclusive social processes on the one hand,

and sharing different actors' and stakeholders' views and needs of what multi-functional landscapes and regions should satisfy and how to accomplish that on the other. "Partnership towards sustainable landscapes", such as defined by IMFN [59] is one type of landscape approach that is applied globally, and with initiatives in both Sweden and NW Russia [21, 36].

The European continent's West and East form a 'time machine', which provides unique potential for mutual learning towards multi-functional landscapes and regions through collaborative learning. This is possible due to the steep gradients in land use history whereby the gradual exploitation and intensive management of forest resources has spread like a tidal wave from areas of high demand in the West to more and more remote regions in the East. Similarly, there are large regional differences in governance arrangements and social and cultural capital.

The contrast between landscape histories, land ownership, legacies of governance/government, cultural meanings and socio-economic situations, such as in the Baltic Sea Region and NW Russia, is the ideal base for twinning between regional clusters of rural landscape stakeholders towards locally and regionally adapted solutions. However, a key challenge is to determine the effectiveness of different approaches to maintain multi-functional landscapes. One dichotomy is the societal culture of land-sharing, which believes in wood/fibre/biomass/food commodity production is compatible with social and cultural sustainability as well as biodiversity conservation across the entire landscape; and land-sparing, in which intensive land use is segregated from multiple-use and protected area networks as functional green infrastructure. While land-sparing is not popular in the West, it is indeed supported by evidence-based analyses across the world, and has been applied through zoning forest landscapes for different purposes in for long time in today's Russia [62]. This means that social innovations that facilitate learning need to be encouraged in landscapes as social-ecological systems [21].

#### Environmental history and landscape as tools for integration

Implementing policies aiming at sustainable forest landscapes requires that the history and contemporary states and trajectories of forest landscapes, including both their biophysical, anthropogenic and intangible interpretations are understood [10]. As an interdisciplinary field of research, environmental history is an appropriate framework for studying the dynamics of landscapes as social-ecological systems. Worster's [90] environmental history framework is very useful when embarking on transdisciplinary research with stakeholders in a geographical area as space and place: (1) natural environments of the past, (2) human modes of production, and (3) ideology, perceptions and values.

Research on biophysical change of ecosystems is a crucial avenue to generate knowledge and facilitate learning about benchmarks for green infrastructure maintenance, understand the deviation from such benchmarks, and develop trajectories of habitat patch networks' functionality [51]. Comprehending the biophysical developments of a landscape and its habitat network can be achieved by using a time series of either or both spatial data and statistical data to determine spatial pattern (e.g., habitat amount, alteration, fragmentation and connectivity [56]), and altered processes affecting the functionality of a habitat network (Figure 5). Another approach is to compare contemporary landscapes with different histories [14, 63].

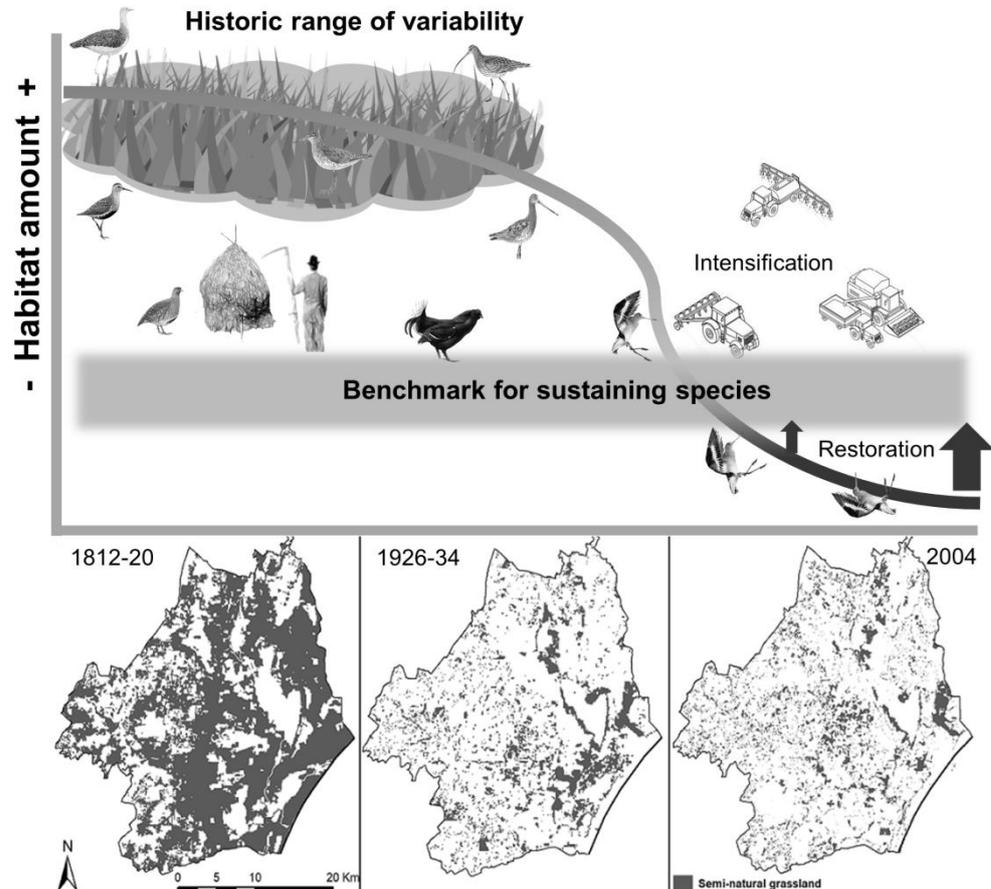


Fig. 5. Example of the historic range of variability of semi-natural grasslands in the Kristianstad Vattenrike Biosphere Reserve in Sweden presented in Manton M. and Angelstam P. [56]. This figure shows how data on the historic range of variability of a particular land cover and evidence-based knowledge about threshold interval for local extinction due to habitat loss can be combined to derive benchmarks as targets for landscape restoration and spatial planning towards a functional green infrastructure. The grassland cloud at the top represents the range of historical variability. The benchmark area illustrates the proportion of the historical range of variability that forms the benchmark level required for ecological sustainability. The grey line indicates the change over time in the amount of semi-natural grassland within Kristianstad. The three maps represent the three-time periods and show the loss and fragmentation of semi-natural grasslands over 2 centuries from 1812 to 2004. Finally, the arrows represent the need for landscape restoration and the need for pro-active spatial planning towards land-sparing. This study exemplifies this general approach using semi-natural grasslands and avian umbrella species. Illustration by M. Manton

To understand the proximate mechanisms behind biophysical landscape change it is important to consider the human technologies and ways of organizing production through land management strategies (including land abandonment) that have transformed natural systems. To identify the main actors that shaped the landscape, using a local area in the Komi Republic in Russia as a case study, Naumov V. et al. [61] reviewed literature about forest history, statistical reports, forest management plans and archive documents. To collect information about local stakeholders they employed focus group interviews as qualitative method to understand opinions and extract knowledge about societal barriers to intensification of forest

management. In parallel, Stryamets N. [76] studied the governance of non-wood forest products, the production of which is negatively affected by forestry intensification. Interviews with 70 stakeholders from different sectors and levels of governance showed a shift from top-down government to a multi-stakeholder form of governance. This was legitimised by informal institutions, such as the FSC forest certification standard, and by formal institutions on the level of the Komi Republic. Another example is landscape restoration. This is important to maintain functional green infrastructures [56]. Dawson L. et al. [27] analysed the causal structures underlying governance and management of landscape restoration in Sweden. Key solutions were to secure institutional flexibility, timely availability of sufficient funds, and effective learning and knowledge production processes.

Ideologies are linked to values and perceptions, which influence political and economic life of society. Naumov V. et al. [61] analysed the ideologies behind forest landscape changes was made using data from literature review, interviews and focus group discussions. The focus was on understanding (1) what interests different actors and stakeholders pursued, (2) what values the forest management decisions promoted, and (3) what market structures dominated in the study period.

#### Transdisciplinary research problem-based learning

Knowledge about both social and ecological systems is a necessary but insufficient criterion for the development of sustainable forest landscapes. Knowledge must also be co-produced in real world conditions with governors, planners and managers to help dissolve barriers and provide real solutions [82]. For ecosystems, a set of specialized species and knowledge about their habitat requirements is an effective tool [68]. Analogously, for social systems, the needs of different stakeholder groups must be understood, and good governance developed. This stresses the need for social sciences that complements natural science by discussing values and goals [41].

The diversity of landscape histories and governance legacies among regions and countries representing Europe's West and East offers grand opportunities for both knowledge production about habitat loss thresholds for green infrastructure functionality, and learning to adapt to regional contexts regarding different ecosystems, landscape histories and legacies of governance and land ownership [6]. The necessary transdisciplinary research process requires (1) avoiding disciplinary formal and informal control, (2) integrating project funding to fill the transdisciplinary research agenda, (3) engaging key stakeholders, and (4) long-term team building based on self-reflection and experienced leadership [2].

One approach to supporting this would be a transdisciplinary research school for PhD students, post-docs and junior researchers, which can support problem-based learning using real world landscapes as laboratories. Communication and dissemination will bring the research school idea to the research community, and to actors and stakeholders in private, public and civil sectors. The research school could be used to share knowledge on how to (1) craft peer-review publications, (2) design research and data collection, (3) write competitive research proposals, and (4) how to establish landscape approach laboratories by (i) integrating researchers from different disciplines, (ii) analysing quantitative and qualitative data, and (iii) engaging stakeholders in knowledge production and learning. This approach would support development of a new generation of young professionals capable to analyse

complex sustainability problems, of knowledge transfer, and of integration of academic and non-academic partners towards sustainable rural development in Europe.

## REFERENCES

1. Angelstam P., Andersson L. Estimates of the Needs for Forest Reserves in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research Supplement*, 2001, vol. 16, iss. sup003, pp. 38–51. DOI: 10.1080/028275801300090582
2. Angelstam P., Andersson K., Annerstedt M., Axelsson R., Elbakidze M., Garrido P., Grahn P., Jönsson K.I., Pedersen S., Schlyter P., Skärbäck E., Smith M., Stjernquist I. Solving Problems in Social-Ecological Systems: Definition, Practice and Barriers of Transdisciplinary Research. *AMBIO*, 2013, vol. 42(2), pp. 254–265. DOI: 10.1007/s13280-012-0372-4
3. Angelstam P., Andersson K., Axelsson R., Elbakidze M., Jonsson B.G., Roberge J.-M. Protecting Forest Areas for Biodiversity in Sweden 1991–2010: Policy Implementation Process and Outcomes on the Ground. *Silva Fennica*, 2011, vol. 45, no. 5, pp. 1111–1133. DOI: 10.14214/sf.90
4. Angelstam P., Axelsson R., Elbakidze M., Laestadius L., Lazdinis M., Nordberg M., Pătru-Stupariu I., Smith M. Knowledge Production and Learning for Sustainable Forest Management: European Regions as a Time Machine. *Forestry*, 2011, vol. 84, iss. 5, pp. 581–596. DOI: 10.1093/forestry/cpr048
5. Angelstam P., Elbakidze M. Forest Landscape Stewardship for Functional Green Infrastructures in Europe's West and East: Diagnosing and Treating Social-Ecological Systems. *The Science and Practice of Landscape Stewardship*. Ed. by Bieling C., Plieninger T. Cambridge University Press, 2017, pp. 124–144.
6. Angelstam P., Elbakidze M., Axelsson R. Special issue: Knowledge Production and Learning for Sustainable Landscapes: Europe's East and West as a Laboratory. *AMBIO*, 2013, vol. 43, iss. 2, pp. 111–265. Available at: <http://link.springer.com/journal/13280/42/2/page/1> (accessed 10.03.2013). DOI: 10.1007/s13280-012-0371-5
7. Angelstam P., Elbakidze M., Axelsson R., Lopatin E., Sandström C., Törnblom J., Dixelius M., Gorchakov V., Kovriga L. Learning for Sustainable Forest Management: Europe's East and West as a Landscape Laboratory. *Forest Facts*, 2007, vol. 1. 4 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/37808719\\_Learning\\_for\\_sustainable\\_forest\\_management](https://www.researchgate.net/publication/37808719_Learning_for_sustainable_forest_management) (accessed 21.05.2014).
8. Angelstam P., Elbakidze M., Lawrence A., Manton M., Melecis V., Pereira A. Barriers and Bridges for Landscape Stewardship and Knowledge Production to Sustain Functional Green Infrastructures. *Ecosystem Services from Forest Landscapes: Broadscale Considerations*. Ed. by Pereira A., Peterson U., Pastur G., Iverson L. Springer, 2018, pp. 127–167.
9. Angelstam P., Elbakidze M., Manton M., Törnblom J. Knowledge Production and Learning for Functional Green Infrastructure – Multiple Landscapes as a Research Platform. *Forest Facts*, 2017, no. 5. 4 p.
10. Angelstam P., Grodzynski M., Andersson K., Axelsson R., Elbakidze M., Khoroshev A., Kruhlov I., Naumov V. Measurement, Collaborative Learning and Research for Sustainable Use of Ecosystem Services: Landscape Concepts and Europe as Laboratory. *AMBIO*, 2013, vol. 42, iss. 2, pp. 129–145. DOI: 10.1007/s13280-012-0368-0
11. Angelstam P., Khauyuk O., Yamelynets T., Mozgeris G., Naumov V., Chmielewski T.J., Elbakidze M., Manton M., Prots B., Valasiuk S., Green Infrastructure at the European Union's Eastern Border: Effects of Road Infrastructure Development and Forest Habitat Loss. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 193, pp. 300–311. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.017
12. Angelstam P., Lundin H. *Visitor-Friendly or Bioeconomy? Place-Based Collaborative Learning towards Multiple Forest Use in Swedish Bergslagen*. International Model Forest Network. 2017. Available at: <http://imfn.net/visitor-friendly-or-bioeconomy-place-based-collaborative-learning-towards-multiple-forest-use> (accessed 15.10.2018).

13. Angelstam P., Naumov V., Elbakidze M. Transitioning from Soviet Wood Mining to Sustainable Forest Management by Intensification: Are Tree Growth Rates Different in Northwest Russia and Sweden? *Forestry*, 2017, vol. 90, iss. 2, pp. 292–303. DOI: 10.1093/forestry/cpw055

14. Angelstam P., Naumov V., Elbakidze M., Manton M., Priednieks J., Rendenieks Z. Wood Production and Biodiversity Conservation Are Rival Forestry Objectives in Europe's Baltic Sea Region. *Ecosphere*, 2018, vol. 9(3), pp. 1–26, article e02119.

15. Angelstam P., Törnblom J., Degerman E., Axelsson R., Elbakidze M. Demonstration Sites for River and Catchment Restoration in Bergslagen. *Euroscapes Report*, 2015, vol. 3.

16. Angelstam P., Yamelynets T., Elbakidze M., Prots B., Manton M. Gap Analysis as a Basis for Strategic Spatial Planning of Green Infrastructure: A Case Study in the Ukrainian Carpathians. *Écoscience*, 2017, vol. 24, iss. 1–2, pp. 41–58. DOI: 10.1080/11956860.2017.1359771

17. Arts B. Assessing Forest Governance from a 'Triple G' Perspective: Government, Governance, Governmentality. *Forest Policy and Economics*, 2014, vol. 49, pp. 17–22. DOI: 0.1016/j.forpol.2014.05.008

18. *Atlas of High Conservation Value Areas, and Analysis of Gaps and Representativeness of the Protected Area Network in Northwest Russia: Arkhangelsk, Vologda, Leningrad and Murmansk Regions, Republic of Karelia, and City of St. Petersburg*. Ed. by Kobayakov K. Jakovlev J. Helsinki, Edita Prima Oy, 2013. 517 p.

19. Axelsson R., Angelstam P., Degerman E., Teitelbaum S., Andersson K., Elbakidze M., Drotz M.K. Social and Cultural Sustainability: Criteria, Indicators and Verifier Variables for Measurement and Maps for Visualization to Support Planning. *AMBIO*, 2013, vol. 42, iss. 2, pp. 215–228.

20. Axelsson R., Angelstam P., Elbakidze M., Stryamets N., Johansson K.-E. Sustainable Development and Sustainability: Landscape Approach as a Practical Interpretation of Principles and Implementation Concepts. *Journal of Landscape Ecology*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 5–30.

21. Axelsson R., Angelstam P., Myhrman L., Sädbom S., Ivarsson M., Elbakidze M., Andersson K., Cupa P., Dyr C., Doyon F., Drotz M.K., Hjorth A., Hermansson J.O., Kullberg T., Lickers F.H., McTaggart J., Olsson A., Pautov Yu., Svensson L., Törnblom J. Evaluation of Multi-Level Social Learning for Sustainable Landscapes: Perspective of a Development Initiative in Bergslagen, Sweden. *AMBIO*, 2013, vol. 42, iss. 2, pp. 241–253. DOI: 10.1007/s13280-012-0378-y

22. Batisse M. The Biosphere Reserve: A Tool for Environmental Conservation and Management. *Environmental Conservation*, 1982, vol. 9, iss. 2, pp. 101–111. DOI: 10.1017/S0376892900019937

23. Bengston D.N. Horizon Scanning for Environmental Foresight: A Review of Issues and Approaches. *General Technical Report (GTR). NRS-121. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station*. 2013. 20 p. DOI: 10.2737/NRS-GTR-121

24. Blicharska M., Angelstam P., Antonson H., Elbakidze M., Axelsson R. Road, Forestry and Regional Planners' Work for Biodiversity Conservation and Public Participation: A Case Study in Poland's Hotspots Regions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2011, vol. 54, iss. 10, pp. 1373–1395. DOI: 10.1080/09640568.2011.575297

25. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe's Natural Capital*. Brussels, European Commission, 2013, COM(2013) 249 final. 2013. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52013DC0249> (accessed 11.02.2018).

26. *Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-Making and Access to Justice in Environmental Matters*. Aarhus, 1998. Available at: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43e.pdf> (accessed 11.02.2018).

27. Dawson L., Elbakidze M., Angelstam P., Gordon J. Governance and Management Dynamics of Landscape Restoration at Multiple Scales: Learning from Successful Environmental Managers in Sweden. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 197, pp. 24–40. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.03.019
28. Directive 2003/4/EC of the European Parliament and of the Council of 28 January 2003 on Public Access to Environmental Information and Repealing Council Directive 90/313/EEC. *Official Journal of the European Union*, 2003. 7 p. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32003L0004> (accessed 11.02.2018).
29. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*, 2007. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32007L0002> (accessed 11.02.2018).
30. Duckett D., Feliciano D., Martin-Ortega J., Munoz-Rojas J. Tackling Wicked Environmental Problems: The Discourse and Its Influence on Praxis in Scotland. *Landscape and Urban Planning*, 2016, vol. 154, pp. 44–56.
31. Durham E., Baker H., Smith, M., Moore E., Morgan V. *The BiodivERsA Stakeholder Engagement Handbook*. Paris, BiodivERsA, 2014. 108 p.
32. Edman T., Angelstam P., Mikusiński G., Roberge J.-M., Sikora A. Spatial Planning for Biodiversity Conservation: Assessment of Forest Landscapes' Conservation Value Using Umbrella Species Requirements in Poland. *Landscape and Urban Planning*, 2011, vol. 102, iss. 1, pp. 16–23.
33. Edwards P., Kleinschmit D. Towards a European Forest Policy – Conflicting Courses. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 33, iss. C, pp. 87–93.
34. Elbakidze M., Angelstam P., Andersson K., Nordberg M., Pautov Y. How Does Forest Certification Contribute to Boreal Biodiversity Conservation? Standards and Outcomes in Sweden and NW Russia? *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 262, no. 11, pp. 1983–1995. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.08.040
35. Elbakidze M., Angelstam P., Dawson L., Shushkova A., Naumov V., Rendenieks Z., Liepa L., Trasūne L., Ustin U., Yurhenson N., Uhlianets S., Manton M., Irbe A., Yermokhin M., Grebenzshikova A., Zhivotov A., Nestsiarenka M. Towards Functional Green Infrastructure in the Baltic Sea Region: Knowledge Production and Learning across Borders. *Ecosystem Services from Forest Landscapes: Broadscale Considerations*. Ed. by Pereira A., Peterson U., Pastur G., Iverson L. Springer, 2018, pp. 57–87.
36. Elbakidze M., Angelstam P., Sandström C., Axelsson R. Multi-Stakeholder Collaboration in Russian and Swedish Model Forest Initiatives: Adaptive Governance towards Sustainable Forest Management? *Ecology and Society*, 2010, vol. 15(2). 14 p.
37. Elbakidze M., Angelstam P., Yamelynets T., Dawson L., Gebrehiwot M., Stryamets N., Johansson K.E., Garrido P., Naumov V., Manton M. A Bottom-Up Approach to Map Land Covers as Potential Green Infrastructure Hubs for Human Well-Being in Rural Settings: A Case Study from Sweden. *Landscape and Urban Planning*, 2017, vol. 168, pp. 72–83. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.031
38. Elbakidze M., Dawson L., Andersson K., Axelsson R., Angelstam P., Stjernquist I., Teitelbaum S., Schlyter P., Thellbro C. Is Spatial Planning a Collaborative Learning Process? A Case Study from a Rural-Urban Gradient in Sweden. *Land Use Policy*, 2015, vol. 48, pp. 270–285. DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.05.001
39. Elbakidze M., Ražauskaite R., Manton M., Angelstam P., Mozgeris G., Brūmelis G., Brazaitis G., Vogt P. The Role of Forest Certification for Biodiversity Conservation: Lithuania as a Case Study. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, iss. 2, pp. 361–376. DOI: 10.1007/s10342-016-0940-4
40. Ericsson G., Heberlein T.A. Attitudes of Hunters, Locals, and the General Public in Sweden Now that the Wolves Are Back. *Biological Conservation*, 2003, vol. 111, pp. 149–159.
41. Flyvbjerg B. Making Social Science Matter. *Social Science and Policy Challenges Democracy, Values and Capacities*. Ed. by Papanagnou G. Cambridge, Cambridge University Press. 2001, ch. 1, pp. 25–56.

42. Flyvbjerg B. Case Study. *The Sage Handbook of Qualitative Research*. Ed. by Denzin N.K., Lincoln Y. Thousand Oaks, CA, Sage, 2011, ch. 17, pp. 301–316.
43. Freudenberger D., Brooker L. Development of the Focal Species Approach for Biodiversity Conservation in the Temperate Agricultural Zones of Australia. *Biodiversity & Conservation*, 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 253–274.
44. Fries C., Johansson O., Pettersson B., Simonsson P. Silvicultural Models to Maintain and Restore Natural Stand Structures in Swedish Boreal Forests. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 94, iss. 1–3, pp. 89–103. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00003-0
45. Haberl H., Winiwarter V., Andersson K., Ayres R.U., Boone C., Castillo A., Cunfer G., Fischer-Kowalski M., Freudenburg W.R., Furman E., Kaufmann R., Krausmann F., Langthaler E., Lotze-Campen H., Mirtl M., Redman Ch., Reenberg A., Wardell A., Warr B., Zechmeister H. From LTER to LTSER: Conceptualizing the Socioeconomic Dimension of Long-Term Socioecological Research. *Ecology and Society*, 2006, vol. 11, no. 2. 13 p.
46. Hackett R. From Government to Governance? Forest Certification and Crisis Displacement in Ontario, Canada. *Journal of Rural Studies*, 2013, vol. 30, pp. 120–129.
47. Henry L.A., Tysiachniouk M. The Uneven Response to Global Environmental Governance: Russia's Contentious Politics of Forest Certification. *Forest Policy and Economics*, 2018, vol. 90, pp. 97–105. DOI: 10.1016/j.forpol.2018.01.014
48. Humphrey J., Ray D., Brown T., Stone D., Watts K., Anderson R. Using Focal Species Modelling to Evaluate the Impact of Land Use Change on Forest and Other Habitat Networks in Western Oceanic Landscapes. *Forestry*, 2009, vol. 82, iss. 2, pp. 119–134. DOI: 10.1093/forestry/cpn042
49. Jacobsen K.S., Linnell J.D.C. Perceptions of Environmental Justice and the Conflict Surrounding Large Carnivore Management in Norway – Implications for Conflict Management. *Biological Conservation*, 2016, vol. 203, pp. 197–206. DOI: 10.1016/j.biocon.2016.08.041
50. Karlsson J., Sjöström M. Direct Use Values and Passive Use Values: Implications for Conservation of Large Carnivores. *Biodiversity and Conservation*, 2008, vol. 17(4), pp. 883–891. DOI: 10.1007/s10531-008-9334-3
51. Keane R.E., Hessburg P.F., Landres P.B., Swanson F.J. The Use of Historical Range and Variability (HRV) in Landscape Management. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 258, pp. 1025–1037. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.05.035
52. Kojola I., Kuittinen J. Wolf Attacks on Dogs in Finland. *Wildlife Society Bulletin*, 2002, vol. 30(2), pp. 498–501.
53. Lee K.N. *Compass and Gyroscope: Integrating Science and Politics for the Environment*. Washington, DC, Island Press, 1993. 290 p.
54. Liberg O., Aronson A., Brainerd S.M., Karlsson J., Pedersen H.C., Sand H., Wabakken P. Integrating Research into Management of a Recolonizing Wolf Population – The Scandinavian Model. *The World of Wolves: New Perspectives on Ecology, Behaviour and Policy*. Ed. by Musiani M., Boitani L., Paquet P. Calgary, University of Calgary Press, 2010. 352 p.
55. Lundquist L. *Implementation Steering: An Actor-Structure Approach*. Lund, Studentlitteratur, 1987. 227 p.
56. Manton M., Angelstam P. Defining Benchmarks for Restoration of Green Infrastructure: A Case Study Combining the Historical Range of Variability of Habitat and Species' Requirements. *Sustainability*, 2018, vol. 10, pp. 1–17. DOI: 10.3390/su10020326
57. Manton M.G., Angelstam P., Mikusiński G. Modelling Habitat Suitability for Deciduous Forest Focal Species – A Sensitivity Analysis Using Different Satellite Land Cover Data. *Landscape Ecology*, 2005, vol. 20, iss. 7, pp. 827–839.
58. Manton M., Angelstam P., Milberg P., Elbakidze M. Wet Grasslands as a Green Infrastructure for Ecological Sustainability: Wader Conservation in Southern Sweden as a Case Study. *Sustainability*, 2016, vol. 8, iss. 4, 20 p. DOI: 10.3390/su8040340
59. *Model Forest Development Guide*. Ottawa, Canada, International Model Forest Network Secretariat, 2008. 34 p.

60. *Multi-Functionality and Sustainability in the European Union's Forests. EASAC policy report 32*. 2017. 51 p.
61. Naumov V., Angelstam P., Elbakidze M. Barriers and Bridges for Intensified Wood Production in Russia: Insights from the Environmental History of a Logging Frontier. *Forest Policy and Economics*, 2016, vol. 66, iss. C, pp. 1–10.
62. Naumov V., Angelstam P., Elbakidze M. Satisfying Rival Forestry Objectives in the Komi Republic: Effects of Russian Zoning Policy Change on Wood Production and Riparian Forest Conservation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 47(10), pp. 1339–1349. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0516
63. Naumov V., Manton M., Elbakidze M., Rendenieks Z., Priedniek J., Uglyanets S., Yamelynets T., Zhivotov A., Angelstam P. How to Reconcile Wood Production and Biodiversity Conservation? The Pan-European Boreal Forest History Gradient as an “Experiment”. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 218, pp. 1–13.
64. Nordberg M., Angelstam P., Elbakidze M., Axelsson R. From Logging Frontier towards Sustainable Forest Management: Experiences from Boreal Regions of North-West Russia and North Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, iss. 8, pp. 797–810. DOI: 10.1080/02827581.2013.838993
65. Pohjanmies T. *Trade-offs among Intensive Forestry, Ecosystem Services and Biodiversity in Boreal Forests*. Academic Dissertation no. 342. University of Jyväskylä, Jyväskylä, 2018. 121 p.
66. Pülzl H., Kleinschmit D., Arts B. Bioeconomy – An Emerging Meta-Discourse Affecting Forest Discourses? *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 4, pp. 386–393. DOI: 10.1080/02827581.2014.920044
67. Rauschmayer F., Berghöfer A., Omann I., Zikos D. Examining Processes or/and Outcomes? Evaluation Concepts in European Governance of Natural Resources. *Environmental Policy and Governance*, 2009, vol. 19, iss. 3, pp. 159–173. DOI: 10.1002/eet.506
68. Roberge J.-M., Angelstam P. Indicator Species among Resident Forest Birds – A Cross-Regional Evaluation in Northern Europe. *Biological Conservation*, 2006, vol. 130, iss. 1, pp. 134–147.
69. Sayer J., Margules C., Boedhihartono A.K., Dale A., Sunderland T., Supriatna J., Saryanthi R. Landscape Approaches: What are the Pre-Conditions for Success? *Sustainability Science*, 2015, vol. 10(2), pp. 345–355. DOI: 10.1007/s11625-014-0281-5
70. Sayer J., Sunderland T., Ghazoul J., Pfund J.L., Sheil D., Meijaard E., Venter M., Boedhihartono A.K., Day M., Garcia C., van Oosten C., Buck L.E. Ten Principles for a Landscape Approach to Reconciling Agriculture, Conservation, and Other Competing Land Uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, vol. 110, iss. 21, pp. 8349–8356. DOI: 10.1073/pnas.1210595110
71. Scott J.M., Davis F., Csuti B., Noss R., Butterfield B., Groves C., Anderson H., Caicco S., D’Erchia F., Edwards T.C.Jr., Ulliman J., Wright R.G. Gap Analysis: A Geographic Approach to Protection of Biological Diversity. *Wildlife Monographs*, 1993, no. 123, pp. 3–41.
72. Shackleton P., Angelstam P., van der Waal B., Elbakidze M. Progress Made in Managing and Valuing Ecosystem Services: A Horizon Scan of Gaps in Research, Management and Governance in South Africa. *Ecosystem Services*, 2017, vol. 27, pp. 232–241.
73. Singh S.J., Haberl H., Chertow M., Mirtl M., Schmid M. Introduction. *Long Term Socio-Ecological Research*. Ed. by Singh S.J., Haberl H., Chertow M., Mirtl M., Schmid M. Springer Netherlands, 2013, pp. 1–26.
74. Skogen K., Kränge O. A Wolf at the Gate: The Anti-Carnivore Alliance and the Symbolic Construction of Community. *Sociologia Ruralis*, 2003, vol. 43, iss. 3, pp. 309–325. DOI: 10.1111/1467-9523.00247

75. Stighäll K., Roberge J.-M., Andersson K., Angelstam P. Usefulness of Biophysical Proxy Data for Modelling Habitat of an Endangered Forest Species: The White-Backed Woodpecker *Dendrocopos leucotos*. *Scandinavian Journal of Forestry*, 2011, vol. 26, iss. 6, pp. 576–585. DOI: 10.1080/02827581.2011.599813

76. Stryamets N. *Use and Governance of Non-Wood Forest Products in Transition and Market Economies: Case Studies from Sweden, Ukraine and the Russian Federation*. D.Sc. Thesis 2016:08. Skinnskatteberg, Swedish University of Agricultural Sciences, 2016. 101 p.

77. Stryamets N., Elbakidze M., Ceuterick M., Angelstam P., Axelsson P. From Economic Survival to Recreation: Contemporary Uses of Wild Food and Medicine in Rural Sweden, Ukraine and NW Russia. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2015, vol. 11, pp. 1–18. DOI: 10.1186/s13002-015-0036-0

78. Sutherland W.J., Woodroof H.J. The Need for Environmental Horizon Scanning. *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, vol. 24, no. 10, pp. 523–527.

79. Svancara L.K., Brannon R.J., Scott M., Groves C.R., Noss R.F., Pressey R.L. Policy-Driven Versus Evidence-Based Conservation: A Review of Political Targets and Biological Needs. *BioScience*, 2005, vol. 55, no. 11, pp. 989–995.

80. Törnblom J. *A Landscape Approach towards Ecological Integrity of Catchments and Streams*. D.Sc. Thesis. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, 2008. 70 p.

81. Törnblom J., Angelstam P., Degerman E., Henrikson L., Edman T., Temnerud J. Catchment Land Cover as a Proxy for Macroinvertebrate Assemblage Structure in Carpathian Mountain Streams. *Hydrobiologica*, 2011, vol. 673 (1), pp. 153–168. DOI: 10.1007/s10750-011-0769-2

82. Törnblom J., Angelstam P., Degerman E., Tamario C. Prioritizing Dam Removal and Stream Restoration Using Critical Habitat Patch Threshold for Brown Trout (*Salmo trutta* L.): A Catchment Case Study from Sweden. *Écoscience*, 2017, vol. 24, iss. 3–4, pp. 157–166. DOI: 10.1080/11956860.2017.1386523

83. Törnblom J., Degerman E., Angelstam P. Forest Proportion as Indicator of Ecological Integrity in Streams Using Plecoptera as a Proxy. *Ecological Indicators*, 2011, vol. 11, iss. 5, pp. 1366–1374. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.02.011

84. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. A/RES/70/1. United Nations, 2015. 41 p.

85. Triviño M., Juutinen A., Mazziotta A., Miettinen K., Podkopaev D., Reunanen P., Mönkkönen M. Managing a Boreal Forest Landscape for Providing Timber, Storing and Sequestering Carbon. *Ecosystem Services*, 2015, vol. 14, pp. 179–189. DOI: 10.1016/j.ecoser.2015.02.003

86. Valasiuk S., Czajkowski M., Giergiczyński M., Żylicz T., Veisten K., Elbakidze M., Angelstam P. Are Bilateral Conservation Policies for the Białowieża Forest Unattainable? Analyses of Stated Preferences of Polish and Belarusian Public. *Journal of Forest Economics*, 2017, vol. 27, pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.jfe.2017.03.001

87. Valasiuk S., Czajkowski M., Giergiczyński M., Żylicz T., Veisten K., Mata I.L., Halse A.H., Elbakidze M., Angelstam P. Is Forest Landscape Restoration Socially Desirable? A Discrete Choice Experiment Applied to the Scandinavian Transboundary Fulufjället National Park Area. *Restoration Ecology*, 2018, vol. 26, iss. 2, pp. 370–380. DOI: 10.1111/rec.12563

88. Wabakken P., Sand H., Liberg O., Bjärvall A. The Recovery, Distribution, and Population Dynamics of Wolves on the Scandinavian Peninsula, 1978–1998. *Canadian Journal of Zoology*, 2001, vol. 79, no. 4, pp. 710–725.

89. Wissmar R.C. *Historical Perspectives. Ch. 5. Watershed Restoration: Principles and Practices*. Ed. by Williams J.E., Wood C.A., Dombeck M.P. Bethesda, MD, American Fisheries Society, 1997, pp. 66–79.

90. Worster D. Doing Environmental History. *Major problems in American Environmental History*. Ed. by Merchant C. Boston, Houghton Mifflin Harcourt, 2005, pp. 2–9.

УДК [630\*1+502](4)  
OECD: 04.01.KA:01.06.GU  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.9

**ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ЗНАНИЙ И ОБУЧЕНИЕ  
В СФЕРЕ УСТОЙЧИВЫХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ:  
ЗАПАД И ВОСТОК ЕВРОПЫ КАК ЛАБОРАТОРИЯ**

*П. Ангельстам<sup>1,2</sup>, д-р наук, проф.*

*М. Мантон<sup>2</sup>, д-р наук, науч. сотр.*

*О. Хауляк<sup>3</sup>, магистр, инж.-исследователь*

*В. Наумов<sup>4</sup>, д-р наук, инж.-исследователь*

*С. Педерсен<sup>5</sup>, д-р наук, доц.*

*Н. Стрямец<sup>6</sup>, д-р наук, науч. сотр.*

*Й. Торнблом<sup>1</sup>, д-р наук, науч. сотр.*

*С. Валасюк<sup>7</sup>, д-р наук, науч. сотр.*

*Т. Ямельнец<sup>8</sup>, д-р наук, доц.*

<sup>1</sup>School for Forest Management, Faculty of Forest Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, PO Box 43, Skinnskatteberg, SE-739 21, Sweden; e-mail: per.angelstam@slu.se, johan.tornblom@slu.se

<sup>2</sup>Institute of Forest Biology and Silviculture, Faculty of Forest Science and Ecology, Aleksandras Stulginskis University, Studentu, 13, Akademija, Kauno, LT-53362, Lithuania; e-mail: michael.manton@asu.lt

<sup>3</sup>Agency for Development and Cooperation, Chornovola Avenue, 63, Office 706, Lviv, 79000, Ukraine; e-mail: okhauyak@gmail.com

<sup>4</sup>Metria AB, Gävle, SE-801 23, Sweden; e-mail: vladimir.v.naumov@gmail.com

<sup>5</sup>Department of Forestry and Wildlife Management, Faculty of Applied Ecology, Agricultural Sciences and Biotechnology, Inland Norway University of Applied Sciences, Campus Evenstad, Koppang, N-2480, Norway; e-mail: simen.pedersen@inn.no

<sup>6</sup>Foscari University of Venice, Via Torrino 155, Venice, Italy; e-mail: natastr@gmail.com

<sup>7</sup>University of Warsaw, Długa str., 44/50, Warszawa, 00-241, Poland; e-mail: svalasiuk@wne.uw.edu.pl

<sup>8</sup>Ivan Franko National University, Faculty of Geography, Doroshenko str., 41, Lviv, 79000, Ukraine; e-mail: taras.yamelynets@gmail.com

В целях поддержания благоприятной для человека среды зеленая (экологическая) инфраструктура должна обеспечивать функционирование наземных и водных экосистем для экологически безопасного и рассчитанного на длительную перспективу получения от них разнообразных полезностей (экосистемных услуг). Сложность взаимодействия социальных и экологических систем в пространственных масштабах и на разных уровнях управления требует понимания. Ключевым фактором в достижении этой цели является получение новых знаний и обучение на местах за счет объединения различных исследовательских дисциплин при сотрудничестве всех заинтересованных сторон (т. е. проведение междисциплинарных исследований). Используя ландшафтные зоны регионов на западе и востоке Европы в качестве лаборатории, мы разработали и применили пошаговый подход к получению новых знаний и поддержке обучения в отношении функционирования зеленой инфраструктуры. Наш анализ лесных ландшафтов показывает, что обеспечение заготовки древесины и сохранение

---

*Для цитирования:* Ангельстам П., Мантон М., Хауляк О., Наумов В., Педерсен С., Стрямец Н., Торнблом Й., Валасюк С., Ямельнец Т. Получение новых знаний и обучение в сфере устойчивых лесных ландшафтов: запад и восток Европы как лаборатория // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 9–31. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.9

---

биологического разнообразия плохо совместимы с точки зрения лесоустройства. На западе Европы существует потребность в увеличении количества охраняемых территорий, диверсификации методов управления и восстановлении ландшафтов. На северо-востоке России есть возможности для интенсификации лесопользования и применения берегающего земледелия, которое предусматривает районирование, позволяющее сократить потери биологического разнообразия. Примеры диагностики социальных систем включали оценку комплексного планирования в Швеции, результаты сохранения биоразнообразия в рамках лесной сертификации в Литве и обучение инженерами по охране окружающей среды. Основной проблемой в обеспечении функционирования зеленой инфраструктуры является слабое межотраслевое взаимодействие. Взаимодействие с социально-экологическими системами требует внедрения наукоемкого сотрудничества и обучения. Разнообразие ландшафтных изменений и практика управления на западе и востоке Европы, включая Россию, открывают широкие возможности как для получения знаний о целевых показателях функционирования зеленой инфраструктуры, так и для обучения в целях адаптации управления к региональным условиям. Интегрированное финансирование проектов, предполагающее сотрудничество ученых и групп заинтересованных лиц, необходимо для проведения успешных междисциплинарных исследований. Тем не менее, формальные и неформальные дисциплинарные и административные барьеры могут ограничивать их коллективную работу, несмотря на проведенный анализ и опыт исследования.

*Ключевые слова:* биоразнообразие, биоэкономика, сотрудничество, экосистемные услуги, экологические изменения, анализ разрывов, госуправление, зеленая инфраструктура, моделирование среды обитания, интенсификация, ландшафтный подход, планирование, определение круга заинтересованных сторон, трансдисциплинарность, развитие сельской местности.

Поступила 11.02.18

---

УДК 630\*161.4:630\*174.754  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.32

## ФОРМИРОВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ СТВОЛА *PICEA ABIES* (L.) KARST. В РАЗНЫХ ТИПАХ СООБЩЕСТВ ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ

*И.Т. Кищенко, д-р биол. наук, проф., чл.-кор. РАН*

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

При изучении биологической продуктивности древостоев наибольшее внимание уделяется древесине стволов лесообразующих видов коренных типов лесных сообществ. Для установления влияния условий местопроизрастания на анатомические показатели древесины ствола *Picea abies* (L.) Karst. в 2014 г. нами проведены исследования в средней подзоне тайги (Южная Карелия). Объектами исследований служили наиболее распространенные в данном регионе типы лесных сообществ. Заложено 5 пробных площадей, на каждой из которых выбрано по 20 учетных деревьев II-III классов роста и развития (по Крафту). Высечки древесины ствола отобраны в конце вегетационного периода на высоте 1,3 м, проанализированы приросты за последние 3 года. Из высечек готовили препараты, на которых в трех местах измеряли ширину годичного кольца, ширину зоны поздней древесины и число трахеидных рядов. Установлено, что с ухудшением условий местопроизрастания качество древесины снижается, ширина годичного кольца уменьшается. Последний показатель в ельнике кисличном составляет 3,59 мм, что на 3,6; 5,6; 8,8 и 11,6 % выше, чем в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом. Кроме того, в ельнике кисличном формируется большее число трахеидных рядов (51 шт.) по сравнению с ельниками черничным, брусничным, болотно-травяным и сфагновым соответственно на 5,9; 15,7; 20,0 и 27,5 %, а также наибольшая ширина зоны поздней древесины (1,37 мм). Последний показатель в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом меньше соответственно на 7,9; 13,6; 20,0 и 28,6 %. При формировании годичного кольца доля поздней древесины максимальной величины достигает в ельнике кисличном (38,9 %), а в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом она составляет соответственно 37,1; 36,0; 34,6 и 34,1 %.

*Ключевые слова:* *Picea abies* (L.) Karst., анатомия, годичное кольцо, древесина, типы леса.

### *Введение*

При изучении биологической продуктивности древостоев наибольшее внимание уделяется древесине стволов лесообразующих видов коренных типов лесных сообществ. При этом исследуются как количественные, так и качественные показатели анатомического строения древесины ствола. Такими надежными критериями качества древесины являются доля поздней древесины, толщина клеточных оболочек и размеры трахеид, формирующих у хвойных растений более 90 % массы ствола.

В отечественной и зарубежной литературе количественным показателям прироста древесины ствола хвойных растений всегда уделялось большое внимание [1–4, 6, 7, 10, 12–22]. Установлено, что технические свойства древесины

---

*Для цитирования:* Кищенко И.Т. Формирование древесины ствола *Picea abies* (L.) Karst. в разных типах сообществ таежной зоны // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 32–39. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.32

во многом определяются особенностями ее анатомического строения. При этом авторы подчеркивают, что судить о качестве древесины только по ее анатомическим показателям некорректно, а необходимо изучать ее физико-механические свойства, помня о том, что между первыми и вторыми существуют вполне определенные зависимости. Все эти характеристики древесины связаны в основном с особенностями биологии вида растений и экологическими условиями их произрастания [1–4, 6, 7, 10, 12–22]. Условия произрастания обусловлены как погодными факторами, так и конкретными особенностями среды данного фитоценоза. Поэтому анатомические показатели древесины ствола должны изучаться как во всех растительных зонах, так и во всех типах лесных сообществ. Подобные исследования в таежной зоне России носят фрагментарный характер.

Цель наших исследований – установить влияние условий местопроизрастания на анатомические показатели древесины ствола ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.) в таежной зоне (Южная Карелия).

#### Объекты и методы исследования

Работы проводили в средней подзоне тайги (Южная Карелия, Суоярвский муниципальный район, 61°55' с. ш., 32°49' в. д.) в 2014 г. Объектами исследования служили древостои ельников кисличного, черничного, брусничного, болотно-травяного и сфагнового типов, наиболее распространенных среди лесных сообществ данного региона (табл. 1).

Таблица 1

#### Характеристика древостоев в разных типах еловых сообществ

Тип сообщества	Средний возраст, лет	Состав пород	Средние		Относительная полнота	Класс бонитета	Число стволов, шт.	Запас древесины в коре, м <sup>3</sup>
			высота, м	диаметр ствола, см				
Ельник кисличный	51	10Е	15,7	14,8	0,9	I.6	1280	238
Е. черничный	55	10Е+Б	16,7	16,2	0,8	II.1	1367	243
Е. брусничный	53	9Е1Б	16,1	15,9	0,7	II.4	1276	231
Е. болотно-травяной	54	10Е	11,7	13,7	0,8	III.2	1988	131
Е. сфагновый	59	8Е2Б	10,9	10,5	0,6	V.0	2338	92

На склоне песчаных возвышений (на абрупте) почвы сравнительно плодородные (супесчаные). Связано это с тем, что туда поступают растворы минеральных элементов из вышележащих биогеоценозов с поверхностным и внутрипочвенным стоками, а также с грунтовыми водами [11]. Здесь создаются условия для сравнительно хорошего роста фитоценозов ельников кисличного, черничного и брусничного I и II классов бонитета.

По берегам рек формируются заболоченные почвы с проточным увлажнением, достаточно хорошо обеспечивающие корни растений минеральными солями и кислородом. Тут произрастают фитоценозы ельника болотно-травяного III класса бонитета.

Режим увлажнения в пониженных элементах рельефа (на плакате) обусловлен выпадающими атмосферными осадками, притоком воды с вышеле-

жащих территорий и выходами грунтовых вод. Сюда по склону поступает значительное количество минеральных и органических веществ, которые, однако, усваиваются растениями с трудом из-за недостатка кислорода вследствие застойного увлажнения. На торфянисто-подзолисто-глеевых почвах, крайне неблагоприятных для роста леса (IV-V классы бонитета), формируются фитоценозы ельника сфагнового.

В связи с этим произрастающие в разных экологических условиях деревья одного вида очень заметно отличаются по различным таксационным показателям, в том числе и по продуктивности. Поэтому тип лесного сообщества является надежным интегральным показателем, характеризующим различия в интенсивности протекания биопродукционных процессов.

Закладку пробных площадей (ПП) и геоботаническое описание лесных фитоценозов проводили по общепринятым методикам [8, 9]. Заложено 5 ПП, на каждой из которых выбрано по 20 учетных деревьев II-III классов роста и развития (по Крафту). Высечки древесины ствола отбирали в конце вегетационного периода на высоте 1,3 м. Из высечек готовили препараты. На них в трех местах измеряли ширину годичного кольца, ширину зоны поздней древесины, а также число трахеидных рядов (по радиусу) с помощью микрометра окулярного винтового МОВ-1 с точностью  $\pm 0,25$  мкм [13]. Выборка по данным показателям составляла 30 измерений. Известно, что под влиянием погодных условий, а также в процессе онтогенеза интенсивность формирования камбия древесины ствола изменяется. Поэтому анализировали приросты за последние 3 года.

Данные всех выборок проверены законом нормального распределения. Математическая обработка данных включала получение средних арифметических величин, их ошибок и среднеквадратических отклонений. Гипотезу о зависимости анатомических особенностей от условий местопроизрастания контролировали, устанавливая достоверность различий между одноименными показателями деревьев разных типов лесных сообществ. Из полученных элементарных статистик следует, что показатель точности опыта – 3...5 %, коэффициент вариации – 18...22 %.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В ходе проведенного исследования по усредненным за 3 года данным установлена зависимость анатомического строения древесины от условий местопроизрастания. Показано (табл. 2), что наиболее широкое годичное кольцо формируется в ельнике кисличном – 3,59 мм. По сравнению с этим типом сообщества в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом данный показатель меньше соответственно на 3,6; 5,6; 8,8 и 11,6 %. Обнаруженная зависимость ширины годичного кольца от условия местопроизрастания для разных типов леса за исследуемые годы сохранялась без изменения. Увеличение ширины годичного кольца хвойных растений в лучших условиях местопроизрастания отмечено и другими учеными [2, 5, 7, 14, 17, 18]. Вполне понятно, что с ростом ширины годичного кольца число трахеидных рядов, его формирующих, соответственно возрастает. Поэтому их наибольшее число в годичном кольце обнаружено в ельнике кисличном, что составило в среднем (за 3 года) 51 шт. (табл. 2). Данный показатель для ельников черничного, брусничного, болотно-травяного и сфагнового по сравнению с кисличным меньше соответственно на 5,9; 15,7; 20,0 и 27,5 %. Выявленная закономерность в величине данного показателя в связи с условиями произрастания за исследуемые 3 года оставалась постоянной.

Таблица 2

**Общая ширина годичного кольца ствола (в числителе, мм)  
и число трахеидных рядов (в знаменателе, шт.), его формирующих,  
у деревьев *Picea abies* (L.) Karst. в разных типах еловых сообществ**

Тип сообщества	Год образования годичного кольца		
	2012	2013	2014
Ельничек кисличный	$\frac{3,62 \pm 0,07}{51}$	$\frac{3,57 \pm 0,04}{50}$	$\frac{3,59 \pm 0,07}{52}$
Е. черничный	$\frac{3,49 \pm 0,09}{49}$	$\frac{3,45 \pm 0,06}{49}$	$\frac{3,46 \pm 0,10}{48}$
Е. брусничный	$\frac{3,41 \pm 0,09}{44}$	$\frac{3,32 \pm 0,13}{42}$	$\frac{3,39 \pm 0,03}{43}$
Е. болотно-травяной	$\frac{3,20 \pm 0,07}{41}$	$\frac{3,25 \pm 0,04}{40}$	$\frac{3,29 \pm 0,03}{41}$
Е. сфагновый	$\frac{3,15 \pm 0,05}{36}$	$\frac{3,16 \pm 0,06}{38}$	$\frac{3,18 \pm 0,07}{37}$

Ширина зоны поздней древесины и процент ее участия в формировании годичного кольца являются одними из важнейших показателей, характеризующих технические свойства древесины: чем больше их величина, тем прочнее древесина как на излом, так и на сжатие. Установлено, что качество формирующейся древесины ствола напрямую связано с особенностями почвенно-грунтовых условий: чем они лучше, тем выше качество древесины. Так, наибольшая ширина зоны поздней древесины формируется в ельнике кисличном и составляет в среднем 1,37 мм (табл. 3). В ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом этот показатель меньше соответственно на 7,9; 13,6; 20,0 и 28,6 %. Подобная зависимость установлена для деревьев, произрастающих и в других растительных зонах [2, 7].

Таблица 3

**Ширина зоны поздней древесины в годичном кольце ствола  
(в числителе, мм) и число трахеидных рядов (в знаменателе, шт.) в данной зоне  
у деревьев *Picea abies* (L.) Karst. в разных типах еловых сообществ**

Тип сообщества	Год образования годичного кольца		
	2012	2013	2014
Ельничек кисличный	$\frac{1,43 \pm 0,09}{25}$	$\frac{1,39 \pm 0,07}{26}$	$\frac{1,37 \pm 0,04}{25}$
Е. черничный	$\frac{1,29 \pm 0,07}{21}$	$\frac{1,26 \pm 0,10}{22}$	$\frac{1,31 \pm 0,06}{22}$
Е. брусничный	$\frac{1,21 \pm 0,04}{18}$	$\frac{1,23 \pm 0,04}{19}$	$\frac{1,20 \pm 0,08}{17}$
Е. болотно-травяной	$\frac{1,14 \pm 0,06}{16}$	$\frac{1,12 \pm 0,10}{15}$	$\frac{1,11 \pm 0,07}{16}$
Е. сфагновый	$\frac{1,08 \pm 0,05}{18}$	$\frac{1,07 \pm 0,08}{19}$	$\frac{1,09 \pm 0,03}{18}$

Доля поздней древесины при формировании годичного кольца максимальна также в ельнике кисличном – в среднем 38,9 % (табл. 4).

Таблица 4

**Доля поздней древесины (%) в годичном кольце  
у деревьев *Picea abies* (L.) Karst. в разных типах еловых сообществ**

Тип сообщества	Год образования годичного кольца		
	2012	2013	2014
Ельник кисличный	39,5	38,9	38,2
Е. черничный	37,0	36,5	37,9
Е. брусничный	35,5	37,0	35,4
Е. болотно-травяной	35,6	34,5	33,7
Е. сфагновый	34,2	33,9	34,3

В ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом данный показатель составляет соответственно 37,1; 36,0; 34,6 и 34,1 %. Другие исследователи также отмечают снижение доли поздней древесины в менее продуктивных типах леса [2, 7].

Все установленные различия в значениях анатомических показателей деревьев, произрастающих в различных типах сообществ, оказались достоверными.

*Выводы*

1. С ухудшением условий местопроизрастания ширина годичного кольца уменьшается. По сравнению с ельником кисличным, где этот показатель составляет 3,59 мм, в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом он меньше соответственно на 3,6; 5,6; 8,8 и 11,6 %.

2. Наибольшее число трахеидных рядов формируется в ельнике кисличном (51 шт.), тогда как в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом этот показатель меньше соответственно на 5,9; 15,7; 20,0 и 27,5 %.

3. Как и число трахеидных рядов, наибольшая ширина зоны поздней древесины формируется в ельнике кисличном (1,37 мм). По сравнению с сообществом этого типа в ельниках черничном, брусничном, болотно-травяном и сфагновом данный показатель меньше соответственно на 7,9; 13,6; 20,0 и 28,6 %.

4. Доля поздней древесины в формировании годичного кольца максимальной величины достигает в ельнике кисличном (38,9 %). Значения данного показателя для ельников черничного, брусничного, болотно-травяного и сфагнового составляют соответственно 37,1; 36,0; 34,6 и 34,1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Г.Ф., Стасова В.В. Формирование годичного слоя древесины стволов сосны обыкновенной и лиственницы сибирской // Лесоведение. 1992. № 5. С. 19–27.
2. Бабич Н.А., Мелехов В.И., Антонов А.М., Клевцов Д.Н., Коновалов Д.Ю. Влияние условий местопроизрастания на качество древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) в посевах // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. XXIV, № 1. С. 54–58.
3. Ванин С.И. Об изучении анатомического строения древесины // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1949. № 4. С. 26–43.
4. Кищенко И.Т. Влияние условий местопроизрастания на анатомическое строение годичного кольца *Pinus sylvestris* L. в таежной зоне // Принципы экологии. 2014. Т. 3, № 2. С. 26–32. DOI: 10.15393/j1.art.2014.3602
5. Кроткевич П.Г. Выращивание высококачественной древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 180 с.

6. Мелехов И.С. О качестве северной сосны. Архангельск: Сев. изд-во, 1932. 21 с.
7. Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. 110 с.
8. Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. М.; Л.: Наука, 1964. Т. 3. 530 с.
9. Программа и методика биогеоценологических исследований / отв. ред. Н.В. Дылис. М.: Наука, 1974. 404 с.
10. Сахаров М.И. Анатомическое строение древесины сосны (*Pinus silvestris* L.) в связи с условиями местопроизрастания // Тр. Брянск. с.-х. ин-та. 1940. Т. 2. С. 287–301.
11. Сукачев В.Н. Избр. тр.: в 3 т. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. 418 с.
12. Чуmachenko С.И., Степаненко И.И. Влияние классов роста и размеров крон деревьев на строение древесины сосны с внесением минеральных удобрений // Лесн. вестн. 2007. № 6. С. 7–13.
13. Яценко-Хмелевский А.А. Основы и методы анатомического исследования древесины. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 338 с.
14. Blokhina N.I., Bondarenko O.V., Osipov S.V. Age Variation of Wood Anatomical Characteristics in *Larix cajanderi* Tree // Wood Research Journal. 2011. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–12.
15. Deslauriers A., Morin H. Intra-Annual Tracheid Production in Balsam Fir Stems and the Effect of Meteorological Variables // Trees. 2005. Vol. 19, iss. 4. Pp. 402–408.
16. Fritts H.C. Tree-Ring and Climate. London: Academic Press., 1976. 582 p.
17. Iawa List of Microscopic Features for Softwood Identification / ed. by Richter H.G., Grosser D., Heinz I. and Gasson P.E. // IAWA Journal. 2004. Vol. 25(1). Pp. 1–70.
18. Larson P.R. The Vascular Cambium. Development and Structure. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 1994. 725 p.
19. Odin H. Studies of the Increment Rhythm of Scots Pine and Norway Spruce Plants // Studia Forestalia Suecica. 1972. No. 97. Pp. 1–32.
20. Rossi S., Deslauriers A., Morin H. Application of the Gompertz Equation for the Study of Xylem Cell Development // Dendrochronologia. 2003. Vol. 21, iss. 1. Pp. 33–39.
21. Whitmore F.W., Zahner R. Development of the Xylem Ring in Stems of Young Red Pine Trees // Forest Science. 1966. Vol. 12, iss. 2. Pp. 198–210.
22. Wilson R., Elling W. Temporal Instability of Tree-Growth/Climate Response in the Lower Bavarian Forest Region: Implications for Dendroclimatic Reconstruction // Trees. 2004. Vol. 18(1). Pp. 19–28.

Поступила 18.04.18

UDC 630\*161.4:630\*174.754  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.32

### Formation of *Picea abies* (L.) Karst. Trunk Wood in Different Taiga Zone Communities

**I.T. Kishchenko**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of RANH  
Petrozavodsk State University, pr. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185035, Russian Federation;  
e-mail: ivanki@karelia.ru

Much attention is given to the trunk wood of forest-forming species of primary forest communities in studying biological productivity of forest stands. We have carried out the

---

For citation: Kishchenko I.T. Formation of *Picea abies* (L.) Karst. Trunk Wood. in Different Taiga Zone Communities. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 32–39. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.32

research in the middle taiga subzone (South Karelia) in 2014 in order to determine the influence of site conditions on anatomical indicators of trunk wood of *Picea abies* (L.) Karst. Study objects were the most common types of forest communities for the region. Five test plots were grounded. Twenty trees of II–III classes of growth and development (according to Kraft's classification) were chosen on each of the plots. Hewings of the trunk wood were picked at the end of the vegetation period at a height of 1.3 m; increments for the last 3 years were analyzed. Preparations were made from the hewings. Width of the tree-ring, width of the autumn wood zone and number of tracheid rows were measured on the preparations in three spots. It was found that tree-ring width and wood quality decrease with deterioration of the site conditions. This indicator in sorrel spruce forest (3.59 mm) is 3.6, 5.6, 8.8 and 11.6 % higher in comparison with myrtillus, vaccinium, swampy with grass and sphagnum spruce forests respectively. Furthermore, larger number of tracheid rows (51 pcs) is formed in sorrel spruce forest in comparison with myrtillus, vaccinium, swampy with grass and sphagnum spruce forests by 5.9, 15.7, 20.0 and 27.5 % respectively; as well as the greatest width of autumn wood zone (1.37 mm). The last indicator in myrtillus, vaccinium, swampy with grass and sphagnum spruce forests is 7.9, 13.6, 20.0 and 28.6 % less respectively. Proportion of autumn wood reaches its maximum in sorrel spruce forest (38.9 %) during the tree-ring formation. Values of this indicator in myrtillus, vaccinium, swampy with grass and sphagnum spruce forests are 37.1, 36.0, 34.6 and 34.1 % respectively.

*Keywords:* *Picea abies* (L.) Karst., anatomy, annual ring, wood, forest types.

#### REFERENCES

1. Antonova G. F., Stasova V. V. Formirovaniye godichnogo sloya drevesiny stvolov sosny obyknovennoy i listvennitsy sibirskoy [Annual Layers Formation of Trunk Wood of Scots Pine and Siberian Larch]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1992, no. 5, pp. 19–27.
2. Babich N.A., Melekhov V.I., Antonov A.M., Klevtsov D.N., Konovalov D.Yu. Vliyaniye usloviy mestoproizrastaniya na kachestvo drevesiny sosny (*Pinus sylvestris* L.) v posevakh [Influence of Site Conditions on the Quality of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood in Crops]. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Area], 2007, vol. XXIV, no. 1, pp. 54–58.
3. Vanin S.I. Ob izuchenii anatomicheskogo stroyeniya drevesiny [On the Study of Wood Anatomical Structure]. *Tr. In-ta lesa AN SSSR* [Proc. of the Institute of Forest Sciences of the USSR]. 1949, no. 4, pp. 26–43.
4. Kishchenko I.T. Vliyaniye usloviy mestoproizrastaniya na anatomicheskoye stroyeniye godichnogo kol'tsa *Pinus sylvestris* L. v tayezhnoy zone. [Influence of Site Conditions on Anatomical Structure of a Tree-Ring of *Pinus sylvestris* L. in the Taiga Zone]. *Printsipy ekologii* [Principles of the Ecology], 2014, no. 2, pp. 26–32. DOI: 10.15393/j1.art.2014.3602
5. Krotkevich P.G. *Vyrashchivaniye vysokokachestvennoy drevesiny* [Cultivation of High Quality Wood]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1955. 180 p. (In Russ.)
6. Melekhov I.S. *O kachestve severnoy sosny* [On the Quality of Northern Pine]. Arkhangelsk, Severnoye izdatel'stvo, 1932. 21 p. (In Russ.)
7. Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Kachestvo drevesiny sosny v kul'turakh* [Quality of Pine Wood in Cultures]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2003. 110 p. (In Russ.)
8. *Polevaya geobotanika* [Field Geobotany]. Ed. by Lavrenko E.M. and Korchagin A.A. Moscow, Nauka Publ., 1964. Vol. 3. 530 p. (In Russ.)
9. *Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* [Program and Methodology of Biogeocenological Research]. Editor in Chief Dylis N.V. Moscow, Nauka Publ., 1974. 404 p. (In Russ.)

- 
10. Sakharov M.I. Anatomicheskoye stroeniye drevesiny sosny (*Pinus silvestris* L.) v svyazi s usloviyami mestoproizrastaniya [Anatomical Structure of Pine (*Pinus silvestris* L.) Wood in Connection with the Site Conditions]. *Tr. Bryansk. s.-kh. in-ta* [Proc. of the Bryansk Agricultural Institute], 1940, vol. 2, pp. 287–301.
  11. Sukachev V.N. *Izbr. tr.: v 3 t. T. 1. Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii* [Selected Papers: in 3 vol. Vol. 1. Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology]. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 418 p. (In Russ.)
  12. Chumachenko S.I., Stepanenko I.I. Vliyaniye klassov rosta i razmerov kron der-ev'yev na stroeniye drevesiny sosny s vnoseniyem mineral'nykh udobreniy [Effect from Growth Classes and Sizes of Tree Crowns on the Structure of Pine Wood with Mineral Fertilizing]. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2007, no. 6, pp. 7–13.
  13. Yatsenko-Khmelevskiy A.A. *Osnovy i metody anatomicheskogo issledovaniya drevesiny* [Fundamentals and Methods of Anatomical Study of Wood]. Moscow, AN SSSR Publ., 1954. 338 p. (In Russ.)
  14. Blokhina N.I., Bondarenko O.V., Osipov S.V. Age Variation of Wood Anatomical Characteristics in *Larix cajanderi* Tree. *Wood Research Journal*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 1–12.
  15. Deslauriers A., Morin H. Intra-Annual Tracheid Production in Balsam Fir Stems and the Effect of Meteorological Variables. *Trees*, 2005, vol. 19, iss. 4, pp. 402–408.
  16. Fritts H.C. *Tree-Ring and Climate*. London, Academic Press, 1976. 582 p.
  17. Iawa List of Microscopic Features for Softwood Identification. Ed. by Richter H.G., Grosser D., Heinz I. and Gasson P.E. *IAWA Journal*, 2004, vol. 25(1), pp. 1–70.
  18. Larson P.R. *The Vascular Cambium. Development and Structure*. Berlin, Springer-Verlag GmbH, 1994. 725 p.
  19. Odin H. Studies of the Increment Rhythm of Scots Pine and Norway Spruce Plants. *Studia Forestalia Suecica*, 1972, no. 97, pp. 1–32.
  20. Rossi S., Deslauriers A., Morin H. Application of the Gompertz Equation for the Study of Xylem Cell Development. *Dendrochronologia*, 2003, vol. 21, iss. 1, pp. 33–39.
  21. Whitmore F.W., Zahner R. Development of the Xylem Ring in Stems of Young Red Pine Trees. *Forest Science*, 1966, vol. 12, iss. 2, pp. 198–210.
  22. Wilson R., Elling W. Temporal Instability of Tree-Growth/Climate Response in the Lower Bavarian Forest Region: Implications for Dendroclimatic Reconstruction. *Trees*, 2004, vol. 18(1), pp. 19–28.
- 

Received on April 18, 2018

УДК 630\*181.9(470.22)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.40

## ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ В СПЕЛЫХ СОСНЯКАХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ)\*

*С.А. Мошников, канд. с.-х. наук, и.о. зав. лаб.*

*В.А. Ананьев, канд. с.-х. наук, доц.*

*В.А. Матюшкин, гл. инж.*

Институт леса Карельского научного центра Российской академии наук,  
ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910;  
e-mail: moshniks@krc.karelia.ru, vladimir.ananyev@krc.karelia.ru, matyush@krc.karelia.ru

На основании данных 73 пробных площадей, заложенных в подзоне средней тайги (Карельский таежный район), определены запасы крупных древесных остатков (древесного дебриса) сосновых насаждений в возрасте 81–120 лет. Показатель запаса крупных древесных остатков отличается высокой вариабельностью (0...180 м<sup>3</sup>/га) и в среднем оценивается в 50,9±5,62 м<sup>3</sup>/га, т. е. может достигать 15...20 % наличного запаса. В разрезе типологической структуры лесного фонда Республики Карелия наибольшими запасами крупных древесных остатков характеризуются сосняки черничные (63 м<sup>3</sup>/га), наименьшими – лишайниковые (12 м<sup>3</sup>/га); запасы в брусничных и багульниковых типах леса составляют 34 и 35 м<sup>3</sup>/га соответственно. Установлено, что снижение класса бонитета насаждений приводит к уменьшению запаса крупных древесных остатков. Подтверждена зависимость этого показателя от запаса древостоя – с его увеличением возрастает и количество древесных остатков (коэффициент корреляции для сгруппированных данных – 0,90). Указанная закономерность отчетливо прослеживается в диапазоне 150...400 м<sup>3</sup>/га, что предполагает возможность использования полученных данных в расчетах для дальнейшего определения объемов крупных древесных остатков и массы углерода соответствующего пула на основе данных Государственного лесного реестра. Статистически подтверждена связь запаса крупных древесных остатков с другими таксационными показателями древостоев – средними диаметром и высотой, суммой площадей сечений, относительной полнотой, количеством растущих деревьев. Выявлена тенденция снижения запаса крупных древесных остатков в насаждениях, пройденных рубками разной давности и интенсивности, по сравнению с незатронутыми ими. Закономерность проявляется в древостоях с интенсивностью изреживания до 15 % по числу стволов (150 пней/га).

*Ключевые слова:* порубочные остатки, углерод, сосновые насаждения, запас, возраст, бонитет, рубки.

### *Введение*

Леса Российской Федерации занимают площадь около 800 млн га. На фоне приобретающих все большую важность вопросов углеродного баланса наземных экосистем наличие столь огромной территории с различными климатическими и лесорастительными условиями требует точной и адекватной оценки не только природных ресурсов, но и пулов органического углерода.

\**Финансирование:* Работа выполнена в рамках госзадания КарНЦ РАН.

*Для цитирования:* Мошников С.А., Ананьев В.А., Матюшкин В.А. Особенности аккумуляции порубочных остатков в спелых сосняках средней тайги (на примере Республики Карелия) // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 40–51. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.40

Известно, что мертвое органическое вещество – обязательная составляющая любой экологической системы [14, 16]. В лесных биогеоценозах оно представлено в виде крупных древесных остатков (КДО, древесного детрита, дробиса) и лесной подстилки. Древесный детрит является одним из важных структурных компонентов лесного биоценоза, поскольку в зависимости от него находится целый ряд организмов разных таксономических групп [10]. Кроме того, КДО имеют большое значение в глобальном углеродном цикле [13–15, 17, 18 и др.]. По данным Д.Г. Замолотчикова с соавт. [1], вклад пула мертвой древесины лесов может достигать 8 % общей величины стока углерода. По мнению Р.Ф. Трейфельда и О.Н. Кранкиной [8], именно недостаток информации о запасах КДО в лесах России является одной из основных причин расхождений в существующих оценках общих запасов и потоков углерода в них.

В настоящее время существует несколько основных методик определения запасов углерода лесных экосистем. В нашей стране широкое распространение имеет система РОБУЛ, позволяющая рассчитать запасы углерода всех основных пулов [5]. Сравнительная оценка запасов углерода пула КДО сосняков Карелии с применением указанной методики выявила более чем двукратное превышение над нашими результатами, полученными на начальном этапе исследований [6]. Столь существенные различия и обусловили необходимость их дальнейшего проведения.

Таким образом, общей целью исследования явилась оценка запасов КДО в сосновых лесах среднетаежной подзоны на территории Республики Карелия, выявление закономерностей, связей с таксационными показателями насаждений и оценка их тесноты. В дальнейшем это позволило бы актуализировать данные по общим запасам КДО и соответствующего пула углерода на региональном уровне. Сосна в качестве изучаемой породы выбрана ввиду ее доминирования в лесном фонде Карелии. В качестве исследуемого объекта выступила группа древостоев в возрасте 81–120 лет.

#### *Объекты и методы исследования*

Республика Карелия расположена на северо-западе европейской части России. Протяженность ее территории с севера на юг составляет 660 км, общая площадь – 180,5 тыс. км<sup>2</sup>. Географическое положение республики, вытянутость ее территории в широтном направлении, наличие большого количества водоемов и пересеченность рельефа определяют различия в климате, почвах и растительности отдельных ее частей.

Исследования проводились в восьми районах, расположенных в южной части Республики Карелия. В более широком географическом аспекте объект находится в пределах подзоны средней тайги. Полученные в ходе исследования результаты предполагается использовать для уточнения пула КДО в лесах Карелии и, возможно, в регионах со сходными естественно-географическими и климатическими условиями.

Наблюдения выполнялись на постоянных и временных пробных площадях (ПП) Института леса Карельского научного центра РАН. Форма пробных площадей прямоугольная или круговая постоянного радиуса. Площадь временных ПП составляла от 400 до 800 м<sup>2</sup>, постоянных – от 2000 до 4000 м<sup>2</sup>. На ПП производились сплошной переčet растущей части древостоя, описание подроста, подлеска и живого напочвенного покрова. Отдельно учитывались КДО, сухостой по 2-сантиметровым ступеням толщины, валеж – путем обмера длины и диаметра в верхнем и нижнем концах бревна. Объем корней

определялся по данным Н.И. Казиминова и А.Е. Митрукова [2]. Учет запасов КДО на ПП производился с учетом класса разложения в соответствии со шкалой, предложенной Е.В. Шороховой и А.А. Шороховым [10]. Всего учет был осуществлен на 73 ПП, расположенных в основных типах леса сосняков. Количество ПП по типам леса распределялось следующим образом: лишайниковая группа (лишайниковый тип) – 14 %; зеленомошная группа – 75 % (брусничные – 27 %, черничные – 48 %); сфагновая группа (багульниковые, осоково-сфагновые и т. п.) – 11 %. Участие главной породы в составе насаждений колебалось от 5,3 до 10 ед. (в среднем – 8,4 ед.), лиственных – от 0 до 3 ед. (в среднем 0,7 ед.). Класс бонитета варьировал от I до IV,5, относительная полнота – от 0,43 до 1,30. Большая часть древостоев была пройдена рубками ухода различной давности (10–30 лет).

При камеральной обработке рассчитывались основные таксационные показатели насаждения (состав, запас, полнота, бонитет и т. д.) и запас мертвой древесины. Для более детального анализа данных обработка полученных материалов проводилась по массовым материалам таксации насаждений, а также в целях повышения согласованности статистических результатов – по сгруппированным данным. Необходимое количество групп определялось в соответствии с правилом Стерджесса:

$$n = 1 + 3,322 \lg N, \quad (1)$$

где  $N$  – общее число наблюдений.

Интервал (шаг) группировки вычислялся по следующей формуле:

$$I = (X_{\max} - X_{\min}) / n, \quad (2)$$

где  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  – минимальное и максимальное значение показателя.

Для выявления зависимости между запасом КДО и таксационными показателями выполнены корреляционный и регрессионный анализ полученных данных с использованием пакета Statistica 10.

Оценка влияния ранее проведенных рубок на запас крупных древесных остатков осуществлялась следующим образом: кроме таксационных показателей и запасов КДО, на ПП были учтены следы рубок, а именно количество и размеры пней, а также класс разложения их древесины. Интенсивность рубки определялась через число пней на единице площади. Изначально в обработку были вовлечены все насаждения указанной группы, но в дальнейшем исключены ПП, расположенные в недостаточно благоприятных условиях (лишайниковые, багульниковые, сфагновые и т.п.). Причиной этого служили выявленные в ходе исследования значительные отличия запасов КДО в насаждениях разных типов леса. В конечном варианте при анализе использовались материалы девяти ПП площадью 0,2...0,4 га. Все указанные ПП расположены в черничном типе леса.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Согласно полученным данным запас КДО ( $M_{\text{КДО}}$ ) в спелых сосняках варьирует в довольно широких пределах – от 0 до 180 м<sup>3</sup>/га (в среднем 50,9 м<sup>3</sup>/га), что составляет 15...20 % наличного запаса древостоя. Такая особенность изучаемого показателя, как высокая вариабельность, отмечалась и ранее [4]. На величину запаса влияет несколько основных факторов: лесорастительные условия, структура и состав насаждения, а также ранее проведенные рубки. К важным факторам также можно отнести поврежденность пожарами различной давности, снеголомами, насекомыми и грибными болезнями, большое значение может иметь рекреационная нагрузка на леса.

Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе. Довольно близкими оказались данные, рассчитанные на основе исследования Р.Ф. Трейфельда и О.Н. Кранкиной [4], – 53 м<sup>3</sup>/га (+4 %), несколько большие отклонения обнаруживаются при сопоставлении с результатами Д.Г. Замолодчикова с соавт. [1] – 67 м<sup>3</sup>/га (+31 %). Наибольшие отличия получены с оценкой, основанной на материалах А.З. Швиденко с соавт. [9], – почти 72 м<sup>3</sup>/га (+41 %). Следует уточнить, что расчеты согласно [9] предназначены для оценки запаса КДО в возрастной группе «спелые и перестойные насаждения», что отчасти может объяснять разброс результатов. Еще большие отличия, но уже с обратным знаком, наблюдаются при сравнении с показателями, полученными для Западной Европы. Так, по данным В. Ekbohm et al. [11], запас КДО в сосняках и ельниках бореальной зоны Европы составляет в среднем 14 м<sup>3</sup>/га, а, по информации J. Fridman, M. Walheim [12], в сосновых лесах Швеции – всего 4,9 м<sup>3</sup>/га. Столь заметные расхождения могут косвенно свидетельствовать о сравнительно невысокой интенсивности ведения лесного хозяйства, по крайней мере в части проведения рубок ухода в России в целом и Карелии в частности.

Выполненное исследование несколько расширило понимание структуры КДО, а также позволило выявить ряд закономерностей. Запас древесного детрита распределен по категориям в указанной возрастной группе почти поровну: 25,7 м<sup>3</sup>/га приходится на сухостой, 25,2 м<sup>3</sup>/га – на валеж. Средняя численность – 570 шт./га, при этом распределение по категориям уже иное – здесь 60 % представлено валежными стволами. Объем среднего сухостойного ствола составляет 0,112 м<sup>3</sup>, или 23,8 % от объема среднего растущего дерева.

Проведена оценка запасов и структуры древесного детрита в разрезе типологической структуры республики. Для этого на предварительном этапе были выделены четыре основных типа леса: лишайниковый, брусничный, черничный и сфагновый. Согласно полученным результатам, наибольшими значениями характеризуются сосняки черничные, наименьшими – лишайниковые (см. таблицу и рис. 1).

Брусничный и сфагновый типы леса обладают близкими показателями. Минимальные значения в сосняках лишайниковых определяются невысокими густотой, темпами роста и, соответственно, низким уровнем конкуренции в древостое. Нельзя также исключать и вероятность периодического уничтожения части валежа в ходе пожаров, следы которых очень часто регистрировались в таких местообитаниях.

**Таксационная характеристика спелых сосняков Карелии по типам леса**

Тип леса	Количество ПП, шт.	Средние		Наличный запас, м <sup>3</sup> /га	Полнота относительная	Класс бонитета	Запас КДО, м <sup>3</sup> /га		
		диаметр на высоте 1,3 м, см	высота, м				Сухостой	Валеж	Всего
Лишайниковый	10	22,3	17,8	206	0,72	IV,2	5,4	6,7	12,1
Брусничный	20	21,9	22,6	283	0,83	III,0	16,2	17,5	33,7
Черничный	32	26,2	23,4	384	1,05	II,4	30,8	32,2	63,0
Сфагновый	11	15,2	16,2	179	0,70	IV,6	23,4	11,9	35,3

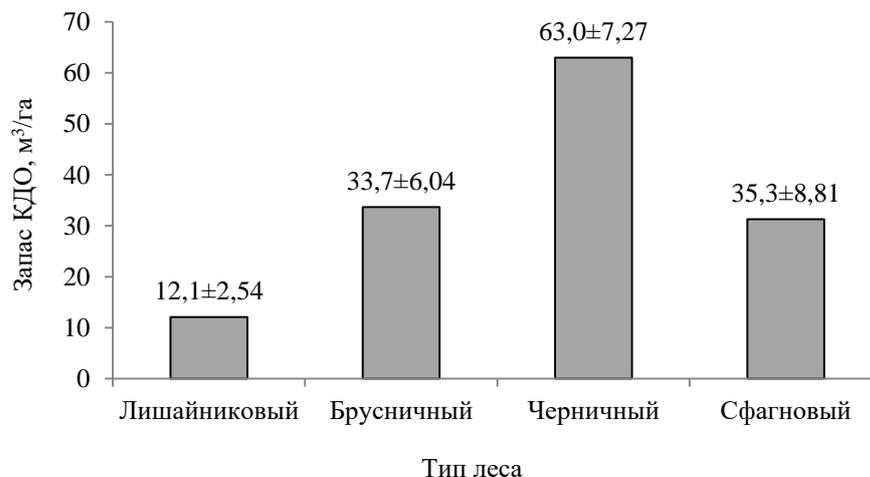


Рис. 1. Запас КДО спелых сосняков Карелии по типам леса

Fig. 1. CWD stock of mature pine forests in Karelia according to forest types

Сравнение распределения древесного детрита по категориям (сухостой/валеж) на типологической основе не выявило существенных отличий. Минимальное количество отмерших древесных растений зарегистрировано в сосняках лишайниковых, максимальное – в сфагновых. Эти два типа леса характеризуются наименьшими объемами среднего дерева сухостоя, наибольшая величина ( $0,13 \text{ м}^3$ ) отмечена в сосняках черничных. Вне зависимости от типа леса объем среднего дерева сухостоя составляет 21...30 % от объема среднего растущего дерева насаждения.

Важным аспектом исследования запасов КДО является установление статистически достоверных связей с таксационными показателями насаждений, особенно с наиболее значимыми – возрастом и запасом. Достоверного влияния возраста насаждений на  $M_{\text{КДО}}$  не обнаружено, что подтверждается низким значением коэффициента корреляции (0,22). По-видимому, это объясняется узкими возрастными рамками исследования. Использование данных без столь строгого ограничения (в диапазоне возрастов от 15 до 200 лет) демонстрирует достаточно высокую согласованность показателей [7].

Выявлена связь КДО с запасом насаждения ( $M_{\text{нас}}$ ). Увеличение последнего закономерно сопровождается ростом количества древесного детрита в древостое. Предполагаем, что это явление обусловлено усилением внутри- и межвидовой конкуренции в более продуктивных насаждениях, что приводит к более активному изреживанию среди древесных растений. Коэффициент корреляции составляет 0,76.

При этом довольно важные результаты дает раздельная (по категориям сухостой/валеж) оценка полученных данных. Проведенный анализ свидетельствует о значительно большей согласованности  $M_{\text{нас}}$  с запасом валежа ( $M_{\text{вал}}$ ): коэффициент корреляции составляет 0,83 против 0,53 для сухостоя. Таким образом, несмотря на сходный характер динамики показателей, запасы сухостоя ( $M_{\text{сух}}$ ) характеризуются более выраженной флуктуационной составляющей. Вероятно, это во многом определяется не только продуктивностью древостоя, но и другими (взаимосвязанными и нет) факторами, такими как возраст дерева,

размеры ствола, период времени до изменения категории, а также различными видами природного и антропогенного воздействий на ценоз. Запас валежа в меньшей степени подвержен случайным колебаниям, в том числе, возможно, в силу достаточно длительного сдвига (смещения) во времени с момента усыхания дерева до его падения. Поэтому он может считаться более стабильным и репрезентативным показателем.

Группировка данных с применением правила Стерджесса (6 групп, интервал  $50 \text{ м}^3$ ) приводит к значительному усилению связи (рис. 2). Коэффициент корреляции возрастает до 0,90. Некоторым недостатком линейной функции можно считать нулевые значения исследуемого показателя в насаждениях с запасом менее  $70 \text{ м}^3/\text{га}$ . Наибольшая репрезентативность модели достигнута в диапазоне наличных запасов  $150...400 \text{ м}^3/\text{га}$ .

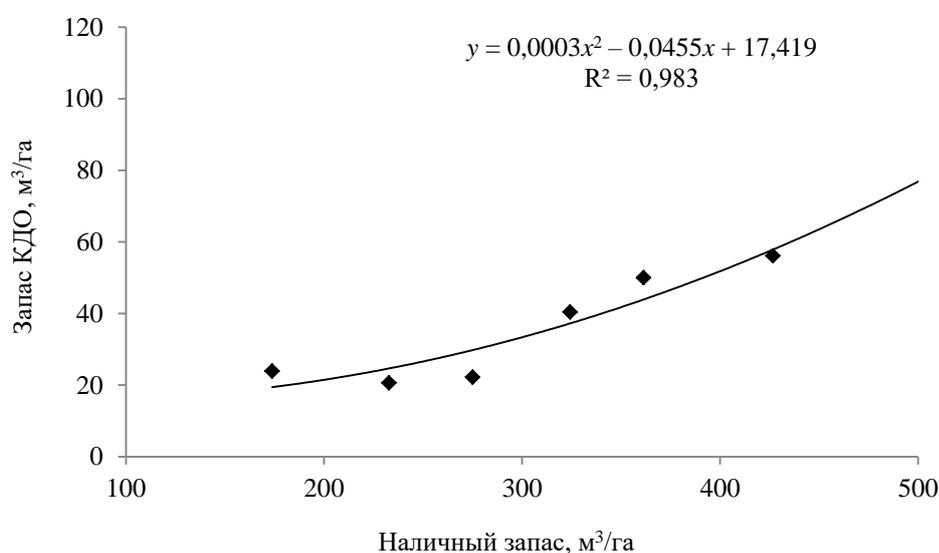


Рис. 2. Зависимость запаса КДО от запаса насаждения в спелых сосняках Карелии (сгруппированные данные)

Fig. 2. Dependence of CWD stock on plantation stock in mature pine forests in Karelia (grouped data)

Обнаружена сходная по характеру и степени сопряженности связь исследуемого показателя с другими таксационными показателями древостоя – средними диаметром и высотой, суммой площадей сечения, густотой. Наибольшей согласованностью характеризуется зависимость  $M_{\text{КДО}}$  от суммы площадей сечений ( $r = 0,74$ ), наименьшей – от густоты ( $r = 0,52$ ). Коэффициенты корреляции для средних диаметра и высоты составляют 0,70 и 0,68 соответственно.

В ходе исследования оценена связь запаса КДО с классом бонитета насаждения. Попытка оценить влияние показателей без учета возраста (во всем массиве данных) древостоя показала почти полное отсутствие связи. Полученный результат, на наш взгляд, вполне закономерен, поскольку близкими классами бонитета могут характеризоваться насаждения, не только произрастающие в разных условиях (например, сосняки багульникового и верескового типов леса), но и разных возрастов/стадий сукцессии и, соответственно, со своими

особенностями процессов естественного изреживания, накопления и разложения мертвой древесины. Поэтому важным элементом при оценке взаимосвязей между этими показателями становится возраст.

При анализе данных в сосняках исследуемого возрастного диапазона связь показателей становится очевидной. Зависимость характеризуется отрицательным знаком и умеренной теснотой – с ухудшением условий произрастания снижается  $M_{\text{КДО}}$ . Коэффициент корреляции составляет  $-0,66$  на уровне значимости  $0,05$ . Однако использование линейной функции в дальнейших расчетах было бы не совсем корректно, поскольку явно прослеживается искажение результатов в высших (I) и низших (IV и ниже) классах бонитета. Особенно четко оно проявляется в классах бонитета ниже IV, где  $M_{\text{КДО}}$  может быть равен нулю и даже отрицателен. Более корректно использование полиномиальной или степенной функции – до  $0,60$  возрастает коэффициент детерминации, снижается отклонение в «крайних» классах бонитета. Недостатком полиномиальной функции в данном случае можно считать сложнообъяснимое увеличение показателя в IV и ниже классах бонитета.

Здесь также была применена группировка согласно формуле Стерджесса (7 групп, интервал –  $0,5$  класса бонитета). После предварительной оценки полученных результатов было принято решение объединить две нижних (последних) группы (III,6–IV,0 и IV,1–IV,5) из-за малого количества данных и существенно возросшей по этой причине стандартной ошибки. Проведенная обработка заметно усилила сопряженность показателей (рис. 3).

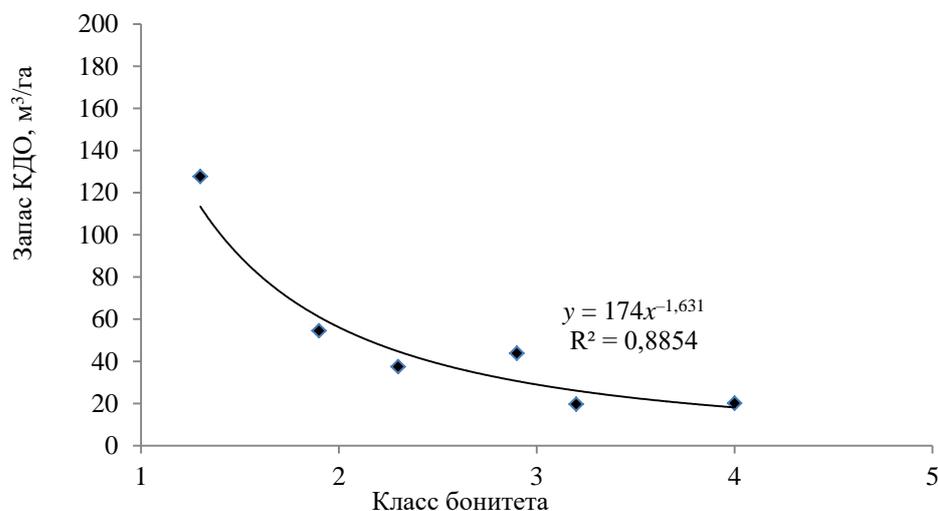


Рис. 3. Зависимость запаса КДО от класса бонитета спелых сосняков Карелии (сгруппированные данные)

Fig. 3. Dependence of the CWD stock on bonitet class of mature pine forests in Karelia (grouped data)

Коэффициент корреляции вырос до  $0,83$ , однако, так же как и при оценке несгруппированных данных, использование линейной функции сопровождается искажениями в крайних значениях. Связь показателей наиболее корректно описывается полиномиальной и степенной функциями. Оценка зависимости отдельно по категориям (сухой/валеж) продемонстрировала большую согласованность  $M_{\text{вал}}$  с бонитетом.

Таким образом, проведенное исследование, основанное на анализе данных по типу леса, наличному запасу древостоя и классу бонитета, выявило и математически подтвердило зависимость  $M_{\text{КДО}}$  от продуктивности насаждения. Именно этот показатель, в любом его представлении, во многом определяет особенности роста и развития древесных растений, формирования породного состава, внутри- и межвидовых отношений, а в дальнейшем сроки и интенсивность естественного изреживания в насаждении. Наиболее продуктивным дендроценозам свойственны не только высокие показатели роста, но и соответствующая эффективность механизма регуляции численности. Значительный отпад в таких условиях, по-видимому, не компенсируется даже большей активностью ксилотрофных грибов, обусловленной сравнительно высокой их численностью. Эту особенность наиболее продуктивных сосняков Карелии – черничных, в сравнении с брусничными и лишайниковыми, отмечали В.И. Крутов с соавт. [3].

Выявлено влияние рубок различных видов и давности на запас КДО сосняков черничных. Естественно, что вести речь об однозначных математических моделях, учитывая разброс ПП по продуктивности, а также вид и давность проведения рубок, сложно. Однако этот анализ позволил выявить тенденции изменения запасов КДО в зависимости от наличия/отсутствия следов рубок, а также их интенсивности. Полученные результаты свидетельствуют о наличии связи между  $M_{\text{КДО}}$  и численностью вырубленных деревьев (рис. 4). Количество древесного дебриса в не затронутых рубками насаждениях превышает показатель пройденных ими в 2 раза и более. Необходимо отметить, что участки с полным отсутствием следов рубок (2 ПП) характеризовались и наиболее высокой продуктивностью. Однако и после исключения этих данных из обработки тенденция уменьшения запаса КДО с увеличением численности пней сохраняется.

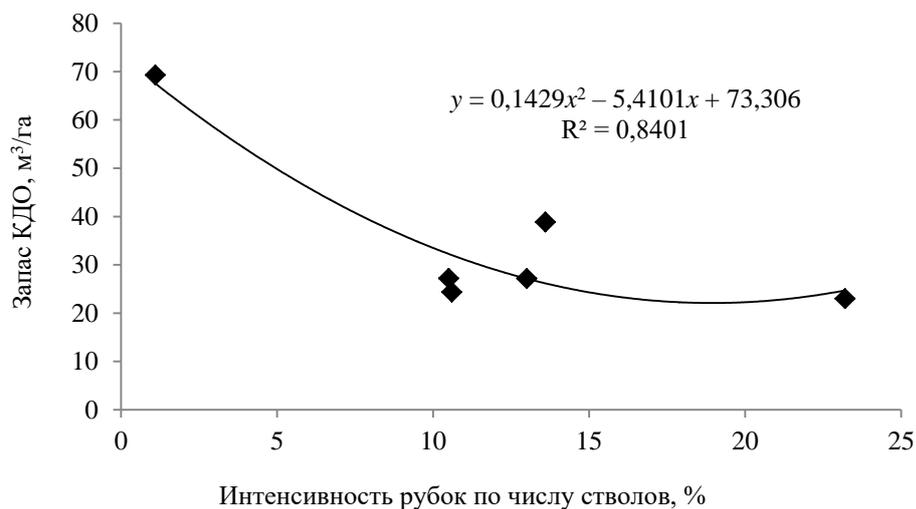


Рис. 4. Связь запаса КДО с интенсивностью рубок ухода в спелых сосняках Карелии

Fig. 4. Relation between CWD stock and improvement thinning intensity in mature pine forests in Karelia

Резюмируя изложенную в этой части исследования информацию, нужно отметить следующее: наиболее высокопродуктивные спелые сосновые насаждения средней тайги – сосняки черничные, характеризуются весьма высоким запасом КДО – в среднем  $63 \text{ м}^3/\text{га}$ . Более того, в не затронутых рубками насаждениях его величина может превышать  $100 \text{ м}^3/\text{га}$ , т. е. достигать 20...30 % от наличного запаса. В целом это косвенно подтверждает высказанное в начале статьи мнение о сравнительно невысокой эффективности применения рубок ухода в системе лесного хозяйства Республики Карелия. Осуществление этих хозяйственных мероприятий позволит повысить размер пользования древесиной с единицы лесной площади не только за счет создания оптимальных условий для оставшихся, но и за счет активного и своевременного изъятия из древостоя старых, отставших в росте и усыхающих деревьев, в перспективе формирующих исследуемый компонент биогеоценоза. Учитывая выявленный запас КДО и покрытую лесом площадь, предполагаем, что рубки ухода, при условии качественного и своевременного их проведения, могут стать серьезным дополнительным источником древесного сырья для лесного комплекса России.

#### *Заключение*

Запас крупных древесных остатков в сосняках средней тайги в возрасте 81–120 лет варьирует в широких пределах – от 0 до  $180 \text{ м}^3/\text{га}$  (в среднем  $51 \text{ м}^3/\text{га}$ , или 15...20 % от наличного запаса насаждения). Среди наиболее распространенных типов леса наибольшим показателем характеризуются черничные ( $63 \text{ м}^3/\text{га}$ ), наименьшим – лишайниковые ( $12 \text{ м}^3/\text{га}$ ). Сосняки брусничные и сфагновые обладают близкими величинами запаса ( $34$  и  $35 \text{ м}^3/\text{га}$  соответственно).

Запас КДО напрямую зависит от таксационных показателей древостоя – запаса, средних диаметра и высоты, густоты, суммы площадей сечений. Наиболее применимым для оценки запаса КДО является наличный запас древостоя. Его увеличение приводит к закономерному росту количества древесного дебриса в ценозе. Выявленная зависимость отчетливо проявляется в диапазоне от 150 до  $400 \text{ м}^3/\text{га}$  и характеризуется высокой степенью сопряженности показателей (0,76 – для не сгруппированных, 0,90 – для сгруппированных данных). Полученные закономерности могут быть использованы для оценки запасов КДО и углерода соответствующего пула на основе данных Государственного лесного реестра.

Обнаружена тенденция снижения запасов крупных древесных остатков в сосняках черничных, пройденных рубками различной интенсивности. Закономерность прослеживается в древостоях с интенсивностью изреживания от 1 до 23 % по числу стволов. Полученные данные свидетельствуют о важности своевременного проведения рубок ухода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–34.
2. Казимиров Н.И., Митруков А.Е. Изменчивость и математическая модель фитомассы сосновых деревьев и древостоев // Формирование и продуктивность сосновых насаждений Карельской АССР и Мурманской области: сб. ст. Петрозаводск: Ин-т леса Карел. фил. АН СССР. 1978. С. 142–149.

3. Крутов В.И., Коткова В.М., Руоколайнен А.В. Видовое разнообразие афиллофороидных грибов в различных типах лесных сообществ заповедника «Кивач» // Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги. М.: Наука, 2006. С. 234–246.

4. Курбанов Э.А., Кранкина О.Н. Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья // Лесн. журн. 2001. № 4. С. 28–33. (Изв. высш. учеб. заведений).

5. Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесов на региональном уровне. Режим доступа: <http://www.cepl.rssi.ru/carbondoc/region/region.doc> (дата обращения: 01.11.2010).

6. Мошников С.А., Ананьев В.А. Запас древесного детрита в сосновых насаждениях Южной Карелии // Тр. СПбНИИЛХ. 2013. № 2. С. 22–28.

7. Мошников С.А., Ананьев В.А., Матюшкин В.А. Запасы крупных древесных остатков в сосновых лесах среднетаежной подзоны Северо-Запада России (на примере Карелии) // Материалы II Всерос. науч. конф. (с междунар. участием) «Научные основы устойчивого управления лесами», Москва, 25–27 окт. 2016 г. М.: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов, 2016. С. 91–92.

8. Трейфельд Р.Ф., Кранкина О.Н. Определение запасов и фитомассы древесного детрита на основе данных лесоустройства // Лесн. хоз-во. 2001. № 4. С. 23–26.

9. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. Вып. 1(41). С. 133–147.

10. Шорохова Е.В., Шорохов А.А. Характеристика классов разложения древесного детрита ели, березы и осины в ельниках подзоны средней тайги // Тр. СПбНИИЛХ, 1999. Вып. 1(2). С. 17–23.

11. Ekblom B., Schroeder L.M., Larson S. Stand Specific Occurrence of Coarse Woody Debris in a Managed Boreal Forest Landscape on Central Sweden // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 221(1/3). Pp. 2–12. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.10.038

12. Fridman J., Walheim M. Amount, Structure, and Dynamics of Dead Wood on Managed Forestland in Sweden // Forest Ecology and Management. 2000. Vol. 131. Pp. 23–36. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00208-X

13. Harmon M.E., Fasth B., Woodall C.W., Sexton J. Carbon Concentration of Standing and Downed Woody Detritus: Effects of Tree Taxa, Decay Class, Position and Tissue Type // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 291. Pp. 259–267.

14. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack K.Jr., Cummins K.W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems // Advances in Ecological Research. Orlando, FL: Academic Press, 1986. Vol. 15. Pp. 133–202.

15. Kurbanov E.A., Krankina O.N. Woody Detritus in Temperate Pine Forests of Western Russia // World Resource Review. 2000. Vol. 12, no. 4. Pp. 741–754.

16. Meyer P. Totholzuntersuchungen in nordwestdeutschen Naturwäldern: Methodik und erste Ergebnisse // Forstw. Clb. 1999. B. 118. S. 167–180.

17. Woodall C.W., Heath L.S., Smith J.E. National Inventories of Down and Dead Woody Material Forest Carbon Stocks in the United States: Opportunities and Challenges // Forest Ecology and Management. 2008. Vol. 256. Pp. 221–228. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.04.003

18. Woodall C.W., Rondeux J., Verkerk P.J., Ståhl G. Estimating Dead Wood during National Forest Inventories: A Review of Inventory Methodologies and Suggestions for Harmonization // Environmental Management. 2009. Vol. 44(4). Pp. 624–631. DOI: 10.1007/s00267-009-9358-9

UDC 630\*181.9(470.22)

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.40

### Accumulation Features of Debris in Mature Pine Forests of Middle Taiga in the Republic of Karelia

S.A. *Moshnikov*, Candidate of Agricultural Sciences, Acting for Head of Laboratory

V.A. *Anan'yev*, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

V.A. *Matyushkin*, Chief Engineer

Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: moshniks@krc.karelia.ru, vladimir.ananyev@krc.karelia.ru, matyush@krc.karelia.ru

Stocks of coarse woody debris (CWD) in pine plantations of 81–120 years old were determined according to the data from 73 sample plots grounded in the middle taiga subzone (Karelian taiga district). Index of CWD stocks differs by the high variability (0–180 m<sup>3</sup>/ha) and is estimated at an average of 51 m<sup>3</sup>/ha, i.e. up to 15–20 % of the total available stock. Myrtillus pine forests (63 m<sup>3</sup>/ha) are characterized by the largest stocks of coarse woody debris in the context of typological structure of the Republic of Karelia forest fund; lichen pine forests (12 m<sup>3</sup>/ha) are characterized by the smallest stocks. Stocks in vaccinium and ledum pine forests are 34 and 35 m<sup>3</sup>/ha respectively. The CWD stock was found to positively correlate with plantation bonitet class. The dependence of CWD stock on stand stock was confirmed. The higher the stand stock the higher the amount of woody debris (correlation coefficient for the grouped data is 0.90). This relationship is seen quite clearly in the 150–400 m<sup>3</sup>/ha range. This allows to use these data in future calculations for further determination of CWD amounts and carbon mass of the respective pool based on data from the State Forest Register. A positive correlation between the stock of coarse woody debris and other stand valuation parameters (mean diameter and height, sum of basal areas, relative density, number of growing trees) was statistically confirmed. A tendency in reduction of CWD stocks in plantations after thinning of different recentness and intensity in comparison with plantations without thinning was detected. This patterns is observed in stands with a removal rate of up to 15 % of trees (150 stumps/ha).

*Keywords:* coarse woody debris, carbon, pine plantations, stock, age, bonitet, thinning.

#### REFERENCES

1. Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Ginarskiy M.L. Byudzhet ugleroda upravlyayemykh lesov Rossiyskoy Federatsii [Carbon Budget of Managed Forests of the Russian Federation]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 6, pp. 23–34.
2. Kazimirov N.I., Mitrukov A.E. Izmenchivost' i matematicheskaya model' fitomassy sosnovykh derev'yev i drevostoyev [Variability and Mathematical Model of Phytomass of Pine Trees and Forest Stands]. *Formirovaniye i produktivnost' sosnovykh nasazhdeniy Karelskoy ASSR i Murmanskoy oblasti*: sb. st. [Formation and Productivity of Pine Plantations of the Karelian Autonomous Soviet Socialist Republic and Murmansk Region: Collection of Articles]. Petrozavodsk, In-t lesa Karel. fil. AN SSSR Publ., 1978, pp. 142–149.
3. Krutov V.I., Kotkova V.M., Ruokolaynen A.V. Vidovoye raznoobraziye afillofoidnykh gribov v razlichnykh tipakh lesnykh soobshchestv zapovednika «Kivach» [Species Diversity of Aphylophoroid Fungi in Various Types of Forest Communities of the Kivach Nature Reserve]. *Raznoobraziye pochv i bioraznoobraziye v lesnykh ekosistemakh sredney taygi* [Soil Diversity and Biodiversity in the Middle Taiga Forest Ecosystems]. Moscow, Nauka Publ., 2006, pp. 234–246. (In Russ.)

---

*For citation:* Moshnikov S.A., Anan'yev V.A., Matyushkin V.A. Accumulation Features of Debris in Mature Pine Forests of Middle Taiga in the Republic of Karelia. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 40–51. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.40

4. Kurbanov E.A., Krankina O.N. Drevesnyy detrit v sosnovykh nasazhdeniyakh Srednego Zavolzh'ya [Wood Detritus in Pine Stands of Middle Volga Area]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2001, no. 4, pp. 28–33.

5. *Metodika informatsionno-analiticheskoy otsenki byudzheta ugleroda lesov na regional'nom urovne* [Methods of Information and Analytical Assessment of Forest Carbon Budget at the Regional Level]. Available at: <http://www.cepl.rssi.ru/carbondoc/region/region.doc> (accessed 01.11.2010).

6. Moshnikov S.A., Anan'yev V.A. Zapas drevesnogo detrita v sosnovykh nasazhdeniyakh Yuzhnoy Karelii [Stock of Wood Detritus in Pine Plantations of South Karelia]. *Tr. SPbNIILKH* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute]. 2013, no. 2, pp. 22–28.

7. Moshnikov S.A., Anan'yev V.A., Matyushkin V.A. Zapasy krupnykh drevesnykh ostatkov v sosnovykh lesakh srednetayezhnoy podzony Severo-Zapada Rossii (na primere Karelii) [Stocks of Large Woody Debris in Pine Forests of the Middle Taiga Subzone in North-West of Russia (on the Example of Karelia)]. *Materialy II Vseros. nauch. konf. (s mezhdunar. uchastiyem) «Nauchnyye osnovy ustoychivogo upravleniya lesami», Moskva, 25–27 okt. 2016 g.* [Materials of the II All-Russian Sci. Conf. with Int. Particip. “Scientific Basis for Sustainable Forest Management”, Moscow, October 25–27, 2016]. Moscow, Tsentr po problemam ekologii i produktivnosti lesov Publ., 2016, pp. 91–92.

8. Treyfel'd P.F., Krankina O.N. Opredeleniye zapasov i fitomassy drevesnogo detrita na osnove dannykh lesoustroystva [Determination of Stocks and Phytomass of Wood Detritus Based on Forest Management Data]. *Lesnoye khozyaystvo*, 2001, no. 4, pp. 23–26.

9. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S. Otsenka zapasov drevesnogo detrita v lesakh Rossii [Assessment of Wood Detritus Stocks in the Forests of Russia]. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest Valuation], 2009, iss. 1(41), pp. 133–147.

10. Shorokhova E.V., Shorokhov A.A. Kharakteristika klassov razlozheniya drevesnogo detrita eli, berezy i osiny v el'nikakh podzony sredney taygi [Characteristics of Wood Detritus Decomposition Classes of Spruce, Birch and Aspen in Spruce Forests of the Middle Taiga Subzone]. *Trudy SPbNIILKH* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute]. 1999, iss. 1(2), pp. 17–23.

11. Ekbohm B., Schroeder L.M., Larson S. Stand Specific Occurrence of Coarse Woody Debris in a Managed Boreal Forest Landscape on Central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 221(1/3), pp. 2–12. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.10.038

12. Fridman J., Walheim M. Amount, Structure, and Dynamics of Dead Wood on Managed Forestland in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 131, pp. 23–36. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00208-X

13. Harmon M.E., Fasth B., Woodall C.W., Sexton J. Carbon Concentration of Standing and Downed Woody Detritus: Effects of Tree Taxa, Decay Class, Position, and Tissue Type. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 291, pp. 259–267.

14. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack K.Jr., Cummins K.W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. *Advances in Ecological Research*. Orlando, FL, Academic Press, 1986, vol. 15, pp. 133–202.

15. Kurbanov E.A., Krankina O.N. Woody Detritus in Temperate Pine Forests of Western Russia. *World Resource Review*, 2000, vol. 12, no. 4, pp. 741–754.

16. Meyer P. Totholzuntersuchungen in nordwestdeutschen Naturwäldern: Methodik und erste Ergebnisse. *Forstw. Clb.*, 1999, B. 118, S. 167–180.

17. Woodall C.W., Heath L.S., Smith J.E. National Inventories of Down and Dead Woody Material Forest Carbon Stocks in the United States: Opportunities and Challenges. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 256, pp. 221–228. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.04.003

18. Woodall C.W., Rondeux J., Verkerk P.J., Ståhl G. Estimating Dead Wood during National Forest Inventories: A Review of Inventory Methodologies and Suggestions for Harmonization. *Environmental Management*, 2009, vol. 44(4), pp. 624–631. DOI: 10.1007/s00267-009-9358-9

Received on February 05, 2018

УДК 630\*176.322:630\*181.61:630\*453

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.52

## ДЕКОРАТИВНОСТЬ *AÉSCULUS HIPPOCÁSTANUM* В УСЛОВИЯХ УРБОЛАНДШАФТА «НОВОЧЕРКАССК»

*И.И. Ревяко*<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доц.

*В.С. Манченко*<sup>1</sup>, магистрант

*Е.И. Ревяко*<sup>2</sup>, студент

<sup>1</sup>Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова Донского государственного аграрного университета, ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Россия, 346428; e-mail: Igor2165@yandex.ru, vmanchenko96@gmail.com

<sup>2</sup>Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета, пер. Некрасовский, д. 44, корп. Д, г. Таганрог, Ростовская обл., Россия, 347922; e-mail: ekaterina-revyako@yandex.ru

В статье приведены результаты анализа декоративности 410 одновозрастных деревьев каштана конского обыкновенного (*Aésculus hippocástanum*), произрастающих в урбонасаждениях юга-запада Ростовской области (историческая часть г. Новочеркаска). Эстетические качества рассматривали по шкале комплексной оценки декоративности растений. Изменение декоративности связывали с фенофазами каштана и присущими им суммами эффективных температур. Согласно результатам исследований, максимальная декоративность каштана отмечается в период цветения на протяжении 22 дней. Ведущим эстетическим признаком является архитектура кроны. Однако негативные факторы окружающей среды оказывают влияние на внешний облик этого растения. Так, воздействие суховейных ветров на фоне низкой влажности воздуха приводит к подгоранию краев листьев. С начала XXI в. каштан начал повсеместно повреждаться охридской минирующей молью (*Cameraria ohridella*). Возникающий при этом некроз листьев в большей степени обусловлен энтомологическим фактором. Совокупное поражение ассимиляционного аппарата молью и ожогом приводит к последовательно сменяющим друг друга деформации, дефолиации листьев и увеличению ажурности кроны. В конечном итоге это сказывается на сроках и степени декоративности растений. Установлено, что эстетике урбонасаждений каштана присущ ритмический характер, обусловленный фенологией этого растения и средой произрастания. Результаты исследования представляют научный и практический интерес для ландшафтных архитекторов, экологов, озеленителей, работающих по программе формирования комфортной городской среды.

*Ключевые слова:* каштан конский, декоративность, некроз листьев, охридский минер, ажурность кроны.

### Введение

Декоративность растения (от лат. *decoro* – украшаю) – совокупность внешних свойств организма, определяющих облик, эмоциональную выразительность и эстетическую роль вида в окружающей человека среде. Декоративный образ, формируемый габитусом, предопределен генотипом и корректируется средой обитания. Морфологические признаки, создающие облик растения и его эстетическое восприятие, носят название декоративных качеств.

---

*Для цитирования:* Ревяко И.И., Манченко В.С., Ревяко Е.И. Декоративность *Aésculus hippocástanum* в условиях урболандшафта «Новочеркасск» // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 52–62. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.52

Каштан конский обыкновенный (*Aësculus hippocástanum*) – высокодекоративное растение, получившее широкое распространение в озеленении городов многочисленных стран Европы, Средней и Восточной Азии, Северной Америки. Выдающимися эстетическими качествами вида являются: сложно-пальчатые 5–7-лопастные зеленые листья, образующие не менее привлекательную плотную широкоовальную крону с оригинальным ветвлением; крупные белые прямостоячие соцветия с приятным ароматом; плоды – раскрывающиеся коробочки с шипообразными выступами; пластинчатая кора, придающая дереву эффект возраста. Максимальной декоративности каштан достигает в период цветения при свободном произрастании [4], в юго-западных и южных районах Ростовской области используется в рядовых, солитерных и групповых посадках парков и улиц [3].

До середины 80-х гг. XX в. каштан считался высокоустойчивым к повреждению энто- и фитовредителями видом, входил в состав основного ассортимента пород для озеленения большинства городов Центральной и Восточной Европы. Начавшаяся с этого времени интенсивная экспансия каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka, Dimič) привела к повсеместному поражению растений во всех странах Европы [7–28]. В процессе развития личинки насекомого поэтапно питаются клеточным соком и тканями верхнего слоя палисадной паренхимы, формируя вдоль листовых жилок характерные мины, содержащие экскременты, личинные экзувии и обесцвеченные ходы. В результате поражения ассимиляционного аппарата нарушается продуктивность фотосинтеза, ослабляется рост и состояние деревьев, снижается их декоративность [2].

Цель исследования – фенологическая оценка декоративности каштана конского в условиях экспансии минирующей моли.

#### *Объекты и методы исследования*

Изучение декоративности проводили на протяжении вегетационных периодов 2016–2017 гг. в одновозрастных насаждениях урболандшафта «Новочеркасск», расположенного в исторической части города (бывший Первомайский р-н). На исследуемых объектах каштан представлен однородными посадками или солитерами, произрастающими в рабатках или на газонах, расположенных вдоль проезжей части улиц.

Декоративность каштана определяли в соответствии со шкалой комплексной оценки декоративности растений О.С. Залывской, Н.А. Бабича [1], сроками начала и окончания фенофаз [5, 6]. В период цветения декоративность оценивали через день, в остальные периоды – один раз в неделю. Степень повреждения листьев устанавливали глазомерно, ажурность кроны – методом оптической плотности при помощи мобильного приложения HabitApp. В качестве показателя потенциальной декоративности растения принимали эстетическое состояние деревьев, произрастающих по ул. Московской в условиях регулярного сбора опада. Регрессионный анализ результатов наблюдений осуществляли с использованием статистического пакета Statistica 7.0 для операционной системы Windows.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В связи с тем, что габитус растения подвержен сезонным изменениям, степень декоративности изучали в динамике с учетом веса признаков и продолжительности их проявления (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

## Потенциальная декоративность признаков

Признак	Дата		Число дней	Балл	Суммарный балл за вегетационный период	Вес признака в среднем балле
	Начало	Конец				
Архитектоника кроны	01.I	31.XII	365	4	1460	4,00
Длительность цветения	30.IV	22.V	22	4	88	0,24
Степень цветения	30.IV	22.V	22	5	110	0,30
Окраска и величина цветов	30.IV	22.V	22	5	110	0,30
Привлекательность внешнего вида плодов	29.V	18.IX	109	5	545	1,49
Осенняя окраска листьев	25.IX	13.X	18	4	72	0,20
Продолжительность облиствения	15.IV	13.X	178	4	712	1,95
Аромат цветков, плодов	30.IV	22.V	22	4	88	0,24
<i>Итого</i>					3185	8,72

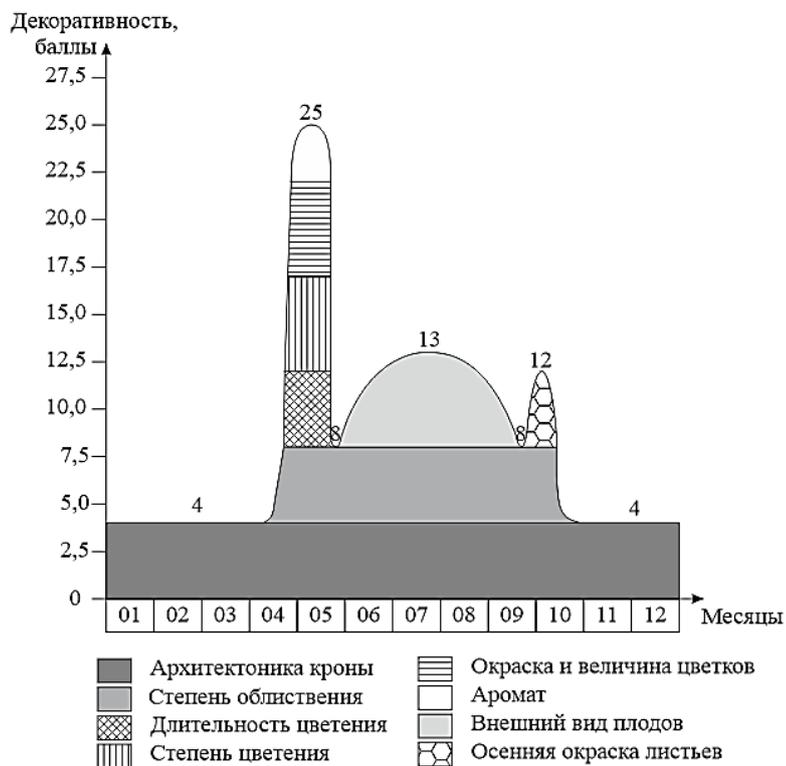


Рис. 1. Динамика потенциальной декоративности каштана конского

Fig. 1. Potential decorative effect dynamics of horse chestnut

Как следует из представленного на рис. 1 распределения, декоративность вида подвержена сезонным изменениям. Наивысшего своего значения (первый пик) она достигает в период цветения растений, когда суммы эффективных температур воздуха находятся в диапазоне от  $195,7 \pm 2,5$  °C (30 апреля) до  $418,0 \pm 4,2$  °C (22 мая) [5]. Второй пик декоративности связан с фазой образования плодов, отмечающейся в период с 1-й декады июня и до высвобождения семян из околоплодника ( $2314,5 \pm 32,9$  °C, 18 сентября) [6]. Третий пик сопряжен с осенним расцветиванием листьев, приходящимся на период с конца сентября по 2-ю декаду октября. Наименьшую декоративность каштан имеет в период осенне-зимнего анабиоза. В целом средневзвешенный балл декоративности составляет 8,72. Доминантным признаком декоративности растения выступает архитектура кроны. Наряду с этим признаком весомыми являются продолжительность облиствения (1,95 балла) и привлекательность плодов (1,49 балла).

Следует отметить, что степень декоративности зависит от агрессивности факторов внешней среды, которым в значительной степени подвержен каштан. Так, с начала XXI в. листья каштана в Ростовской области повсеместно и массово поражает каштановая минирующая моль – охридский минер (рис. 2).



Рис. 2. Повреждение листьев каштана охридским минером

Fig. 2. Leaf blight by horse chestnut leaf miner

Кроме моли, ассимиляционный аппарат подвергается воздействию суховейных ветров, которые в совокупности с высокими температурами воздуха вызывают подгорание краев листовой пластинки (рис. 3).



Рис. 3. Ожог листьев каштана

Fig. 3. Chestnut leaf burn

Некроз тканей ассимиляционного аппарата из-за суховейных ветров в сочетании с высокой температурой воздуха сопровождается последовательно сменяющимися друг друга дехромацией, деформацией и дефолиацией листьев. В результате этого отмечаются увеличение ажурности и снижение плотности кроны (рис. 4, табл. 2).

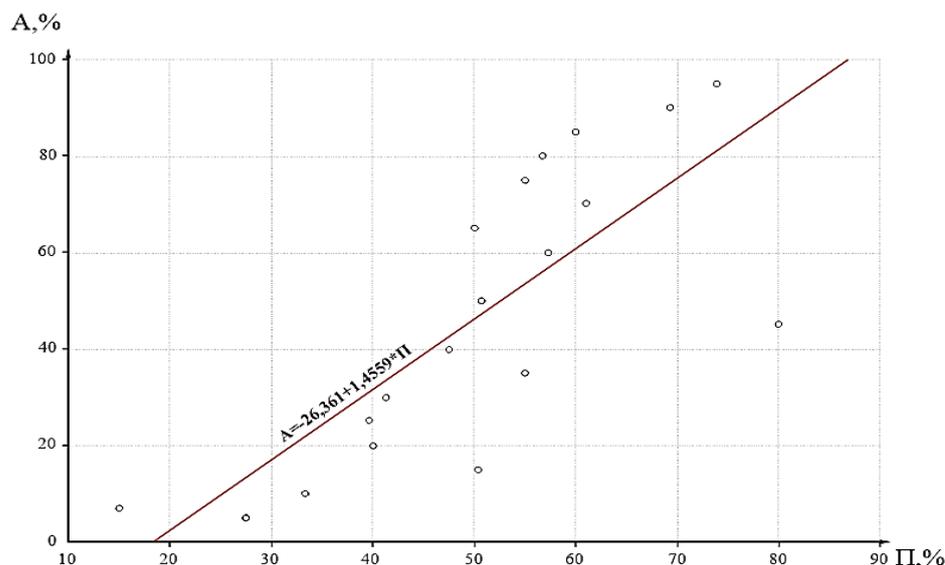


Рис. 4. Зависимость ажурности (А) кроны от общей поврежденности листьев (П) ( $r = 0,773 \pm 0,154$ ) (здесь и далее, на рис. 5: точки – совокупность экспериментальных данных; прямая линия – графическое выражение связи признаков)

Fig. 4. Dependence of crown openness (A) from total damage of leaves (П) ( $r = 0.773 \pm 0.154$ ) (hereinafter, fig. 5: points – experimental dispersion; straight line – a graphic expression of relationship between the parameters)

Таблица 2

## Связь поражения листьев с ажурностью кроны

Ажурность кроны, %	Число деревьев, шт.	Повреждение, %		Суммарное повреждение, %
		минером	ожогом	
5	42	16,47	11,03	27,50
7	3	18,33	11,67	30,00
10	36	21,25	12,08	33,33
15	23	37,13	13,26	50,39
20	30	26,17	13,83	40,00
25	16	26,88	12,81	39,69
30	44	26,36	14,88	41,24
35	7	41,43	13,57	55,00
40	46	28,15	19,34	47,49
45	1	70,00	10,00	80,00
50	27	32,59	18,14	50,73
60	31	39,52	17,74	57,26
65	4	23,75	26,25	50,00
70	31	43,06	17,90	60,96
75	2	45,00	10,00	55,00
80	28	38,82	16,93	56,75
85	6	45,00	15,00	60,00
90	24	48,33	20,96	69,29
95	9	58,89	15,00	73,89
<i>Итого</i>	410			

Из двух рассматриваемых факторов возникновения некроза наиболее влиятельным является энтомологический (рис. 5).

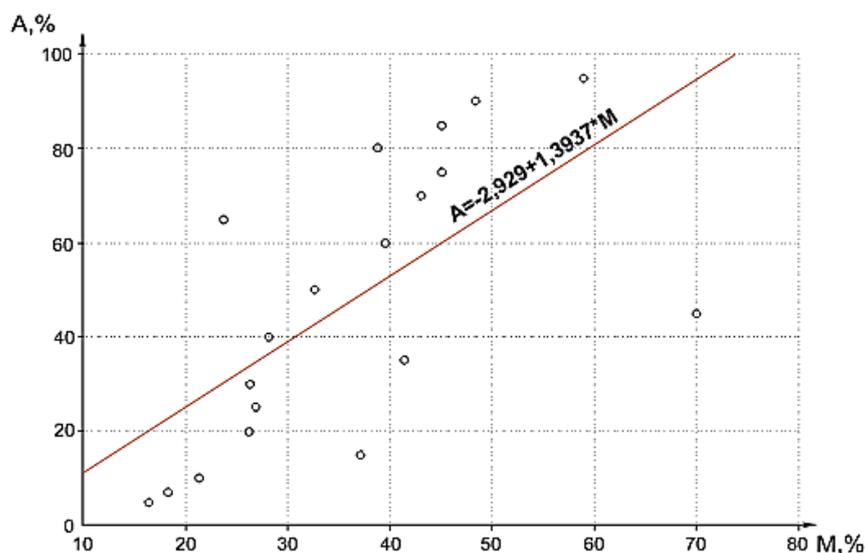


Рис. 5. Зависимость ажурности кроны (А) от степени поражения листьев (М) личинками охридского минера ( $r = 0,653 \pm 0,184$ )

Fig. 5. Dependence of crown openness (A) on degree of leaf damage (M) by larvae of horse chestnut leaf miner ( $r = 0.653 \pm 0.184$ )

В результате некроза листьев также сокращаются период облиствения, вес признаков и, как следствие, балл эстетического восприятия (табл. 3, рис. 6).

Таблица 3

**Фактическая декоративность признаков**

Признак	Дата		Число дней	Балл	Суммарный балл за вегетационный период	Вес признака в среднем балле
	Начало	Конец				
Архитектоника кроны	01.I	31.XII	365	4	1460	4,00
Длительность цветения	30.IV	22.V	22	4	88	0,24
Степень цветения	30.IV	22.V	22	5	110	0,30
Окраска и величина цветов	30.IV	22.V	22	5	110	0,30
Привлекательность внешнего вида плодов	29.V	18.IX	109	5	545	1,49
Осенняя окраска листьев	25.IX	13.X	18	1	18	0,05
Продолжительность облиствения	15.IV	01.IX	136	3	408	1,12
Аромат цветков, плодов	30.IV	22.V	22	4	88	0,24
			<i>Итого</i>		2827	7,74

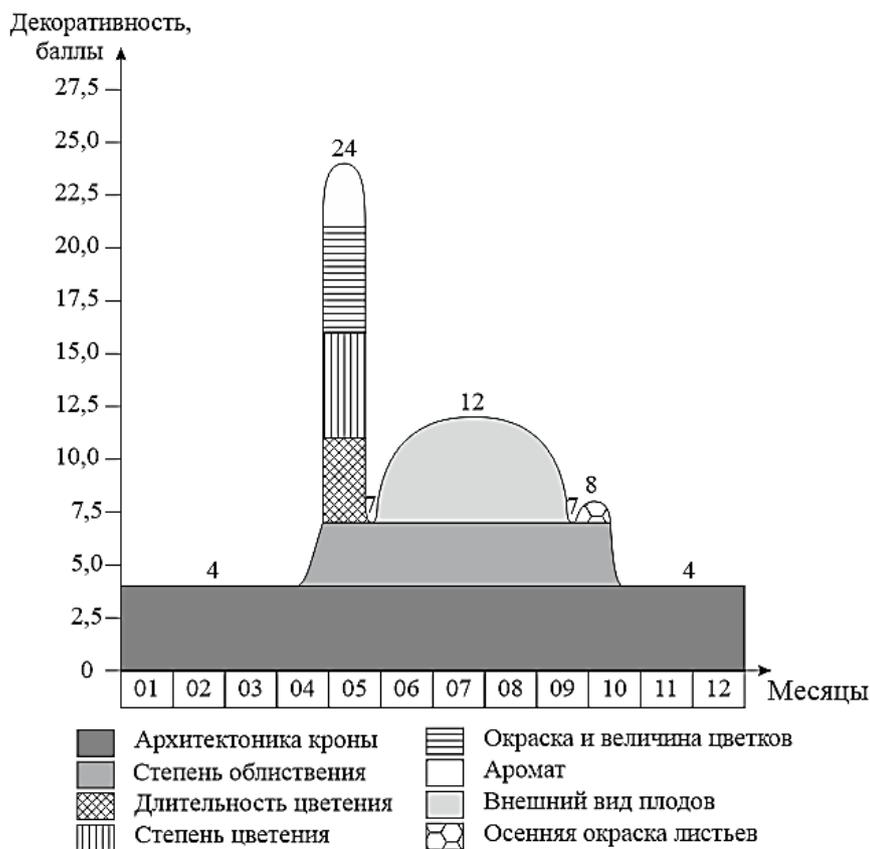


Рис. 6. Динамика фактической декоративности каштана конского

Fig. 6. Dynamics of actual decorative effect of horse chestnut

В сравнении с потенциальной декоративностью (см. рис. 1) фактическая ниже на 0,98 бал. Это обусловлено сокращением продолжительности и степени облиствения кроны (0,83 балла), снижением привлекательности окраски листьев (0,15 балла).

#### Заключение

Как показали результаты исследования, декоративность каштана конского подвержена сезонному влиянию. Максимального значения (первый пик) она достигает в период цветения растений (25,0 балла), второй и третий пики эстетического восприятия приходятся на фазу созревания плодов (13,0 балла) и осеннего расцветивания листьев (12,0 балла).

Потенциальный средневзвешенный балл эстетического восприятия вида в условиях г. Новочеркасска может достигать 8,7. При этом ведущим декоративным признаком каштана является архитектура кроны. Фактическая доля признака в средневзвешенном балле эстетического восприятия – 51,6 %.

Ассимиляционный аппарат каштана подвержен массовому поражению минирующей молью и ожогом. Совместное действие этих факторов приводит к последовательной смене дехромации, деформации, дефолиации листьев и увеличению ажурности кроны ( $r = 0,773 \pm 0,154$ ).

Наибольшее влияние на ажурность кроны каштана оказывает некроз, вызванный поражением листьев личинками охридского минера ( $r = 0,653 \pm 0,184$ ), что снижает декоративность облиственной кроны (на 0,83 балла) и осенней окраски листьев (на 0,15 балла). Как следствие, фактическая эстетичность вида уменьшается на 0,98 балла (11,2 %) и достигает средневзвешенного значения 7,7 балла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залывская О.С., Бабич Н.А. Шкала комплексной оценки декоративности деревьев и кустарников в городских условиях на Севере // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. № 1(15). С. 96–104.
2. Зерова М.Д., Никитенко Г.Н., Нарольский Н.Б., Гершензон З.С., Свиридов С.В., Лукаш О.В., Бабидорич М.М. Каштановая минирующая моль в Украине. К.: ТОВ «Велес», 2007. 87 с.
3. Козловский Б.Л., Огородникова Т.К., Куропятников М.В., Федоринова О.И. Ассортимент древесных растений для зеленого строительства в Ростовской области: моногр. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 416 с.
4. Колесников А.И. Декоративная дендрология. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 704 с.
5. Кулыгин А.А. Сроки цветения древесных растений в г. Новочеркасске и его окрестностях. Новочеркасск: Новочеркас. гос. мелиоратив. акад., 1999. 50 с.
6. Кулыгин А.А. Роль температурного фактора в созревании плодов древесных растений // Лесн. журн. 2001. № 5-6. С. 7–10 (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Рогинский А.С., Синчук О.В., Сауткин Ф.В., Буга С.В. Распространение и вредоносность каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka, Dimič) в зеленых насаждениях Беларуси // Тр. Белорус. гос. ун-та. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2014. Т. 9, ч. 2. С. 95–103.
8. Balder H., Jackel B. Die Kastanienminiermotte und mögliche Gegenmassnahmen // Stadt+Grün. 2003. N. 5. S. 44–49.
9. Butin H., Kehr R. Zum Auftreten von *Erysiphe flexuosa* – Erreger einer neuen Mehltaukrankheit an Rosskastanie // Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes. 2002. Bd. 54. S. 185–187.
10. Celes M. Novy škodca pagastana konského // Záhradníctví. 1996. Č. 1. S. 4–5.
11. Dautbašić M., Dimič N. Occurrence of *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič in Bosnia-Herzegovina // Radovi Šumarskog Fakulteta Univerziteta u Sarajevu. 1999. Č. 1. S. 11–14.
12. Deschka G., Dimič N. *Cameraria ohridella* n. sp. aus Mazedonien, Jugoslawien (Lepidoptera, Lithocolletidae) // Acta Entomol. Jugosl. 1986. Bd. 22, h. 1. S. 11–23.
13. Heitland W., Kopelke J.-P., Freise J., Metzger J. Ein Kleinschmetterling erobert Europa – Die Roßkastanien-Miniermotte *Cameraria ohridella* // Natur und Museum. 1999. Bd. 129(6). S. 186–195.
14. Hellrigl K. Zum Auftreten der Robinien-Miniermotte, *Phyllonorycter robiniella* (Clem.) und der Roßkastanien-Miniermotte, *Cameraria ohridella* Desch. & Dim. (Lep., Gracillariidae) in Südtirol // Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz. 1998. Vol. 71, iss. 4. Pp. 65–68.
15. Kenis M., Froster B. Die Rosskastanien – Miniermotte: neu in der Schweiz // Der Gartenbau. 1998. Bd. 39. S. 16–17.
16. Łabanowski G., Soika G. Szrotówek kasztanowcowiaczek zagraża kasztanowcom w Polsce // Ochrona Roślin. 1998. T. 42. S. 12.
17. Liska J. Verbreitung der Roßkastanienminiermotte in der Tschechischen Republik // Forstschutz Aktuell. 1997. Bd. 21. S. 5.
18. Maceljski M., Bertie D. Kestenov moljac miner *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič (Lepidoptera, Gracillariidae) novi opasni stetnik u Hrovatskoj // Fragmenta Phyto-medica et Herbologia. 1995. T. 23, n. 2. S. 9–18.

19. Milevoj L., Macek J. Horse Chestnut Leafminer (*Cameraria ohridella*) in Slovenia // Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes. 1997. Vol. 49, no. 1. 14 p.
20. Nikolaos A., Dimitrios A. Zusammenfassende Betrachtung über die Verbreitung und die Biologie von *Cameraria ohridella* Deschka & Dimic (Lep., Gracillariidae) in Griechenland // Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. 2006. Bd. 15. S. 177–182.
21. Pelov V., Tomov R., Trenchev G. *Cameraria ohridella* Deschka et Dimič (Gracillariidae, Lepidoptera) – novnepijatl na konskija kesten (*Aesculus hippocastanum* L.) v Bulgarija // Proc. Nat. sc. Forest Protection Conf., Sofia. Sofia, Bulgaria, 1993. S. 95–98.
22. Pschorn-Walcher H. Zur Biologie und Populationsentwicklung der eingeschleppten Roßkastanen – Miniermotte, *Cameraria Ohridella* // Forstschutz Aktuell. 1997. Nr. 21. S. 7–10.
23. Šefrova H., Lastuvka Z. Dispersal of the Horse-Chestnut Leafminer *Cameraria ohridella* in Europe: Its Course, Ways and Causes // Entomol. Zeit. Stuttgart. 2001. Vol. 111. Pp. 195–198.
24. Snieškienė V., Baležentienė L., Stankevičienė A. State of Horse-Chestnut, *Aesculus hippocastanum* L. in Lithuania: Diseases and Pest Damages // Ekologija. 2011. T. 57, no. 2. Pp. 62–69.
25. Stigner H. De paardenkastan-jeminier-motte, *Cameraria ohridella*, een nieuwe bladmineerder voor Nederland (Lepidoptera: Gracillariidae) // Entomol. Berichten. 2000. O. 60. P. 159–163.
26. Szabóky Cs. A *Cameraria ohridella* (Deschka & Dimič 1986) előfordulása Magyarországon [Occurrence of *Cameraria ohridella* in Hungary] // Növényvédelem [Plant Protection]. 1994. Vol. 30, iss. 11. Pp. 529–530.
27. Tilbury C., Straw N.A., Evans H. Recent Establishment of Horse Chestnut Leaf-Miner, *Cameraria ohridella*, in the United Kingdom // Proceedings of 1<sup>st</sup> International *Cameraria* Symposium. *Cameraria ohridella* and Other Invasive Leaf-Miner in Europe. IOCB, Prague, March 24–27, 2004. Prague, Czech Republic, 2004. 43 p.
28. Villalva S., Del Estal P. Presencia en España de *Cameraria ohridella* Deska & Dimič (Lepidoptera: Gracillariidae) plaga del castaño de Indias // III. Congreso Nacional de Entomología Aplicada. IX. Jornadas científicas de la Sociedad Española de Entomología Aplicada, Ávila, España, October 20–24, 2003: Programa de sesiones. Avila, Spain, 2003. 39 p.

Поступила 23.04.18

UDC: 630\*176.322:630\*181.61:630\*453

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.52

### Decorative Effect of *Aésculus hipocástanum* under the Conditions of Novocherkassk Urban Landscape

**I.I. Revyako<sup>1</sup>**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

**V.S. Manchenko<sup>1</sup>**, Master Degree Student

**E.I. Revyako<sup>2</sup>**, Postgraduate Student

<sup>1</sup>Novoherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Don State Agrarian University, ul. Pushkinskaya, 111, Novoherkassk, Rostov Region, 346428, Russian Federation; e-mail: Igor2165@yandex.ru, vmanchenko96@gmail.com

<sup>2</sup>SFedU Engineering and Technology Academy, per. Nekrasovskiy, 44, korp. D, Taganrog, Rostov Region, 347922, Russian Federation; e-mail: ekaterina-revyako@yandex.ru

Decorative effect analysis results of 410 even-aged horse chestnut trees (*Aésculus hipocástanum*) growing in urban areas of the south-west of Rostov region (Novoherkassk historical part) are represented in the article. Esthetical features were considered by a scale of comprehensive assessment of plant decorative effect. Dynamics of the decorative effect

*For citation:* Revyako I.I., Manchenko V.S., Revyako E.I. Decorative Effect of *Aésculus hipocástanum* under the Conditions of Novoherkassk Urban Landscape. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 52–62. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.1.52

were associated with chestnut phenophases and their inherent resulting temperature sums. According to the research results the maximum decorative effect of the chestnut can be observed during the flowering stage for 22 days. Crown architectonics is a key esthetical plant feature. However, environmental threats affect the chestnut habit. Thus, the impact of dry winds against the background of low air humidity leads to leaf edge burns. Chestnut has widely been damaged by the horse chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella*) since the beginning of the 21st century. Leaf necrosis occurs as a result. This is more due to entomological factor. Cumulative damage of assimilation apparatus caused by leaf miner and burn leads to successive dechromation, deformation and defoliation of leaves and increasing of crown openness. Ultimately, this affects the timescales and degree of the plant decorative effect. It was established that the rhythmic character determined by the chestnut phenology and its habitat is peculiar to urban areas esthetics. The research results are of scientific and practical interest to landscape architects, green space workers, ecologists, who work on a program basis of creating a comfortable urban environment.

**Keywords:** horse chestnut, decorative effect, leaf necrosis, horse chestnut leaf miner, crown openness.

#### REFERENCES

1. Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Shkala kompleksnoy otsenki dekorativnosti derev'yev i kustarnikov v gorodskikh usloviyakh na Cevere [Scale of Complex Assessment of Tree and Shrub Decorativeness in Northern Cities]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2012, no. 1(15), pp. 96–104.
2. Zerova M.D., Nikitenko G.N., Narol'skiy N.B., Gershenson Z.S., Sviridov S.V., Lukash O.V., Babidorich M.M. *Kashtanovaya miniruyushchaya mol' v Ukraine* [Horse Chestnut Leaf Miner in the Ukraine]. Kiev, TOV "Veles" Publ., 2007. 87 p. (In Russ.)
3. Kozlovskiy B.L., Ogorodnikova T.K., Kuropyatnikov M.V., Fedorinova O.I. *Assortiment drevesnykh rasteniy dlya zelenogo stroitel'stva v Rostovskoy oblasti: monogr.* [Woody Plant Assortment for Green Building in Rostov Region: Monography]. Rostov-on-Don, SFedU Publ., 2009. 416 p. (In Russ.)
4. Kolesnikov A.I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Decorative Dendrology]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 704 p. (In Russ.)
5. Kulygin A.A. *Sroki tsveteniya drevesnykh rasteniy v g. Novocherkasske i ego okrestnostyakh* [Time of Woody Plant Flowering in Novocherkassk and Its Surroundings]. Novocherkassk, Novocherkasskaya gosudarstvennaya meliorativnaya akademiya Publ., 1999. 50 p. (In Russ.)
6. Kulygin A.A. Rol' temperaturnogo faktora v sozrevanii plodov drevesnykh rasteniy [Role of Temperature in Mature Growth of Woody Plant Fruits]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2001, no. 5–6, pp. 7–10.
7. Roginskiy A.S., Sinchuk O.V., Sautkin F.V., Buga S.V. Rasprostraneniye i vredonosnost' kashtanovoy miniruyushchey moli (*Cameraria ohridella* Deschka, Dimič) v zelenykh nasazhdeniyakh Belarusi [Distribution and Harmfulness of Horse Chestnut Leaf Miner (*Cameraria ohridella* Deschka, Dimič) in Green Areas of Belarus]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziologicheskiye, biokhimicheskiye i molekulyarnyye osnovy funktsionirovaniya biosistem* [Proceedings of the Belarusian State University. Series Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences], 2014, vol. 9, part. 2, pp. 95–103.
8. Balder H., Jackel B. Die Kastanienminiermotte und mögliche Gegenmassnahmen. *Stadt+Grün*, 2003, N. 5, S. 44–49.
9. Butin H., Kehr R. Zum Auftreten von *Erysiphe flexuosa* – Erreger einer neuen Mehltaukrankheit an Rosskastanie. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 2002, Bd. 54, S. 185–187.
10. Celes M. Novy škodca pagastana konského. *Záhradníctví*, 1996, Č. 1, S. 4–5.
11. Dautbašić M., Dimič N. Occurrence of *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič in Bosnia-Herzegovina. *Radovi Šumarskog Fakulteta Univerziteta u Sarajevu*, 1999, Č. 1, S. 11–14.

12. Deschka G., Dimič N. *Cameraria ohridella* n. sp. aus Mazedonien, Jugoslawien (Lepidoptera, Lithocolletidae). *Acta Entomol. Jugosl.*, 1986, Bd. 22, h. 1, S. 11–23.
13. Heitland W., Kopelke J.-P., Freise J., Metzger J. Ein Kleinschmetterling erobert Europa – Die Roßkastanien-Miniermotte *Cameraria ohridella*. *Natur und Museum*, 1999, Bd. 129(6), S. 186–195.
14. Hellrigl K. Zum Auftreten der Robinien-Miniermotte, *Phyllonorycter robiniella* (Clem.) und der Roßkastanien-Miniermotte, *Cameraria ohridella* Desch. & Dim. (Lep., Gracillariidae) in Südtirol. *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, 1998, vol. 71, iss. 4, pp. 65–68.
15. Kenis M., Froster B. Die Rosskastanien – Miniermotte: neu in der Schweiz. *Der Gartenbau*, 1998, Bd. 39, S. 16–17.
16. Łabanowski G., Soika G. Szrotówek kasztanowcowiaczek zagraża kasztanowcom w Polsce. *Ochrona Roślin*, 1998, T. 42, s. 12.
17. Liska J. Verbreitung der Roßkastanienminiermotte in der Tschechischen Republik. *Forstschutz Aktuell*, 1997, Bd. 21, S. 5.
18. Maceljčki M., Bertie D. Kestenov moljac miner *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič (Lepidoptera, Gracillariidae) novi opasni stetnik u Hrvatskoj. *Fragmenta Phytomedica et Herbologia*, 1995, T. 23, n. 2, s. 9–18.
19. Milevoj L., Macek J. Horse Chestnut Leafminer (*Cameraria ohridella*) in Slovenia. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 1997, vol. 49, no. 1, p. 14.
20. Nikolaos A., Dimitrios A. Zusammenfassende Betrachtung über die Verbreitung und die Biologie von *Cameraria ohridella* Deschka & Dimic (Lep., Gracillariidae) in Griechenland. *Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew.*, 2006, Bd. 15, S. 177–182.
21. Pelov V., Tomov R., Trenchev G. *Cameraria ohridella* Deschka et Dimič (Gracillariidae, Lepidoptera) – novnepijatli na konskija kesten (*Aesculus hippocastanum* L.) v Bulgarija. *Proc. Nat. sc. Forest Protection Conf. – Sofia*. Sofia, Bulgaria, 1993, s. 95–98.
22. Pschorn-Walcher H. Zur Biologie und Populationsentwicklung der eingeschleppten Roßkastanien – Miniermotte, *Cameraria Ohridella*. *Forstschutz Aktuell*, 1997, Nr. 21, S. 7–10.
23. Šefrova H., Lastuvka Z. Dispersal of the Horse-Chestnut Leafminer *Cameraria ohridella* in Europe: Its Course, Ways and Causes. *Entomol. Zeit. Stuttgart*, 2001, vol. 111, pp. 195–198.
24. Snieškienė V., Baležentienė L., Stankevičienė A. State of Horse-Chestnut, *Aesculus hippocastanum* L. in Lithuania: Diseases and Pest Damages. *Ekologija*, 2011, t. 57, nr. 2, pp. 62–69.
25. Stigner H. De paardenkastan-jeminier-motte, *Cameraria ohridella*, een nieuwe bladmineerder voor Nederland (Lepidoptera: Gracillariidae). *Entomol. Berichten.*, 2000, O. 60, P. 159–163.
26. Szabóky Cs. A *Cameraria ohridella* (Deschka & Dimič 1986) előfordulása Magyarországon. *Növényvédelem*, 1994, vol. 30, iss. 11, pp. 529–530.
27. Tilbury C., Straw N.A., Evans H. Recent Establishment of Horse Chestnut Leaf-Miner, *Cameraria ohridella*, in the United Kingdom. *Proceedings of 1<sup>st</sup> International Cameraria Symposium. Cameraria ohridella and Other Invasive Leaf-Miner in Europe. IOCB, Prague, March 24–27, 2004*. Prague, Czech Republic, 2004, p. 43.
28. Villalva S., Del Estal P. Presencia en España de *Cameraria ohridella* Deska & Dimič (Lepidoptera: Gracillariidae) plaga del castaño de Indias. *III. Congreso Nacional de Entomología Aplicada. IX. Jornadas científicas de la Sociedad Española de Entomología Aplicada, Ávila, España, October 20–24, 2003: Programa de sesiones*. Avila, Spain, 2003. 39 p.

Received on April 23, 2018

УДК 630\*232.12:582.475.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.63

## ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ПИГМЕНТНОГО СОСТАВА ХВОИ ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ\*

*Н.Н. Бессчетнова, д-р с.-х. наук*

*В.П. Бессчетнов, д-р биол. наук, проф.*

*П.В. Ершов, аспирант*

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; e-mail: besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru

Изучен пигментный состав 1- и 2-летней хвои плюсовых деревьев (ортетов) ели европейской из состава архива клонов № 3 Государственного бюджетного учреждения Нижегородской области «Семеновский спецсемлесхоз», где они представлены привитыми растениями (клонами или раметами). Цель исследований – выявление факта наличия генотипически обусловленной специфики плюсовых деревьев ели европейской по составу пигментов, участвующих в фотосинтезе, и установление масштабов ее проявления в 1- и 2-летней хвое. Все учетные растения имели одинаковые площади питания и схемы размещения, получали единый перечень лесоводственных и агротехнических уходов. Отбор образцов хвои проведен одновременно с учетом ее возраста и принадлежности к ортетам и раметам. Анализируемые показатели: содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов, их суммарное количество, соотношение между ними. В эксперименте использован спектрофотометрический анализ как наиболее эффективный способ количественного выявления важнейших пластидных пигментов. Экстракционный агент – 96 %-й этанол. Максимумы поглощения при количественной фиксации оптической плотности вытяжек соответствовали следующим длинам волн: 663 нм – для хлорофилла *a*; 645 нм – для хлорофилла *b*; 440 нм – для недифференцированных каротиноидов. Для статистической обработки привлечен одно- и двухфакторный дисперсионный анализ. Установлены заметные различия пигментного состава листового аппарата плюсовых деревьев ели европейской при выращивании на выровненном фоне. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил их существенность для 1- и 2-летней хвои по всем задействованным в опыте признакам. Влияние специфики генотипов плюсовых деревьев, эффект которого признается в качестве коэффициента наследуемости в широком смысле, достаточно велико и достоверно по всем рассматриваемым признакам. Раздельное влияние специфики генотипов плюсовых деревьев и различий в возрасте их хвои на формирование фенотипической изменчивости зафиксировано в двухфакторном дисперсионном анализе. Влияние возраста хвои на формирование различий в содержании отдельных пигментов и их групп достоверно, но невелико и в целом составило от  $7,10 \pm 0,16$  % (содержание каротиноидов) до  $9,40 \pm 0,15$  % (суммарное содержание хлорофилла). Доля дисперсии, связанной со спецификой генотипов плюсовых деревьев, в большинстве случаев значительна: до 48,87 %. Взаимодействие организованных факторов чаще вызывает достоверный эффект, однако доля этого организованного фактора в структуре общей фенотипической дисперсии практически

\**Благодарность:* Авторы выражают благодарность Государственному бюджетному учреждению Нижегородской области «Семеновский спецсемлесхоз».

*Для цитирования:* Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Ершов П.В. Генотипическая обусловленность пигментного состава хвои плюсовых деревьев ели европейской // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 63–76. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.63

никогда не преобладает. Наличие остаточной дисперсии обусловлено неизбежной пестротой экологического фона.

*Ключевые слова:* ель европейская, плюсовые деревья, архив клонов, хвоя, пигментный состав, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды, генотипическая обусловленность.

### *Введение*

Одним из главных условий устойчивого развития отечественного лесного хозяйства является наличие эффективно функционирующей постоянной лесосеменной базы [7]. В качестве ключевого аспекта ее формирования в России и в других государствах рассматриваются плюсовые деревья основных лесобразующих пород [3, 14, 15, 26, 34]. В их числе ель европейская по праву занимает лидирующие позиции [14, 15, 22]. Обладая хозяйственно важными признаками в сочетании с выраженной устойчивостью и экологической пластичностью, она выступает предметом многочисленных и разноплановых исследований отечественных [4, 5, 8, 13, 16] и зарубежных [22, 25, 40] ученых. Немалая часть этих работ посвящена всестороннему изучению листового аппарата.

Пигментный состав хвои вполне справедливо относят к важнейшим биологическим характеристикам древесных видов, связанным с режимом фотосинтеза, продуктивностью и адаптивностью [12]. Обоснованно признается его защитная роль: присутствие хлорофилла и каротиноидов усиливает резистентность растений [10, 37]. Динамику пигментного состава считают адаптивной реакцией хвойных, в том числе и ели европейской, на условия освещенности [20, 35, 36, 38, 39, 41]. Известно, что в направлении с юга на север в географическом масштабе более устойчивы растения с повышенной пигментацией листового аппарата [10]. Обнаружив преобладание сильно пигментированных форм в центрах формообразования, Н.И. Вавилов рассматривал это явление как защитную реакцию растений на действие мутагенных факторов [6]. Сдвиги в содержании хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, их суммарном количестве и концентрации каротиноидов являются реакцией на изменение концентрации углекислого газа в атмосфере [28, 33]. Известна зависимость содержания зеленых пигментов хвои от температуры почвы и других почвенных характеристик [40]. Сообщается о фотопериодической реакции, которая выражается в изменении содержания пигментов [40], реакции на содержание озона [23], на загрязнение [27]. Вместе с тем у псевдотсуги Мензиса существенных изменений в концентрации пигментов под влиянием ультрафиолетовых лучей не отмечено [19]. Пигментный состав хвои в значительной мере контролируется генотипом и является в значительной степени наследуемым показателем [2, 3], что подтверждается испытаниями потомств от контролируемых скрещиваний [33] и генетическими исследованиями [32]. Другие специалисты [14], напротив, считают, что степень генотипической детерминации признаков пигментного состава хвойных невысока. Отсутствие единого мнения о наследственной специфике указанных признаков и свойств у древесных растений служит достаточным основанием для продолжения работ в указанном направлении, в частности в отношении ели европейской.

Цель исследований – выявление факта наличия генотипически обусловленной специфики плюсовых деревьев ели европейской по составу пигментов, участвующих в фотосинтезе, и установление масштабов ее проявления в 1- и 2-летней хвое.

*Объекты и методы исследования*

Объектами исследований выступали плюсовые деревья ели европейской, выделенные в естественных насаждениях Нижегородской области согласно действовавшим на момент отбора инструкциям и нормативам. Они входили в состав природных популяций данного вида, типичных для лесорастительного района хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации. Их вегетативные репродукции зарезервированы в архиве клонов № 3 Государственного бюджетного учреждения Нижегородской области «Семеновский спецлесхоз». Возраст привитых растений одинаков и согласно паспорту архива клонов составляет 34 года. Все клоны (раметы) каждого из изученных плюсовых деревьев (ортетов) в пределах указанного архива были размещены по единой посадочной схеме с одинаковой площадью питания. Режим содержания архива предполагал общий комплекс агротехнических и лесоводственных мероприятий, прочие условия произрастания также были идентичными. Следует учитывать, что существующий регламент создания и содержания таких объектов единого генетико-селекционного комплекса направлен на механическое выравнивание поверхности участка, отводимого под них, на сглаживание расхождений в его локальных почвенных характеристиках. Такой организационный подход не создавал ни одному учетному дереву преимуществ в доступе к ресурсам роста и развития и обеспечивал принцип единственного логического различия. Возраст хвои выступал одним из организованных факторов дисперсионного анализа. В соответствии с этим все остальные эффекты, связанные с возможным возникновением временной изменчивости, нивелировались или исключались полностью. Это достигалось одновременным выполнением отбора биологических образцов для анализа и одинаковыми сроками проведения всех его этапов. Формирование выборочных совокупностей и включение в их состав первичных единиц выборки выполнены в общепринятом порядке [9, 11]. Реализованы полевой стационарный и лабораторный опыты. Их организационная схема позволила сформировать двухфакторные равномерные и пропорциональные дисперсионные комплексы, в которых каждый ортет был представлен 3 раметами. С периферии среднего яруса хорошо освещенного участка из кроны срезали по 5 ветвей, из средней части которых отделяли хвою для последующей экстракции пигментов. В итоге по каждому признаку получено 315 первичных единиц выборки. Поскольку присутствие хлорофилла и каротиноидов в хвое коррелирует с устойчивостью растений к лимитирующим факторам среды [1, 12, 37], проведение анализов установлено на декабрь 2016 г.

Определение содержания пигментов, участвующих в фотосинтезе, реализовано традиционными методами в ходе камерального этапа исследований [17, 18, 29–31, 40, 42]. Вполне результативным и достаточно точным методом исследования пигментного состава листового аппарата признан спектрофотометрический анализ [17, 18, 21, 24, 31, 42]. С его помощью удастся оценить концентрацию пигментов по оптической плотности вытяжки из измельченной хвои в оптически чистом ацетоне или в 96 %-м этаноле. В работе был задействован электроспектрофотометр Grating 722, при этом максимумы поглощения при количественной фиксации оптической плотности вытяжек соответствовали следующим длинам волн: 663 нм – для хлорофилла *a*; 645 нм – для хлорофилла *b*; 440 нм – для недифференцированных каротиноидов. Известно, что положение максимума поглощения в спектральном анализе сдвигается в ту или иную сторону при использовании разных экстрагентов [17, 18, 21, 31, 42]. Это учитывалось в эксперименте. Содержание анализируемых пигментов

рассчитывали по уравнениям Ветштейна и Хольма [17, 42], при этом для нахождения концентрации, выраженной в миллиграммах на грамм, по каждой навеске определяли содержание абсолютно сухого вещества. В построении алгоритмов для указанных расчетов учитывали известные методические приемы [28–31]. Анализировали содержание и соотношения хлорофилла  $a$ , хлорофилла  $b$ , каротиноидов, их доли и суммарное количество. Работу строили на платформе комплексности многопараметрических исследований [2, 3], целесообразность которых общепризнана [28–31, 40]. Первичную лесоводственную информацию обрабатывали с использованием известных статистических схем [9, 11].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Установлены заметные различия пигментного состава листового аппарата плюсовых деревьев ели европейской при выращивании на выровненном экофоне. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил их существенность для 1- и 2-летней хвои по всем задействованным в опыте признакам (табл. 1).

Таблица 1

#### Существенность различий пигментного состава хвои плюсовых деревьев ели европейской

Признак	F <sub>оп</sub>	Доля влияния фактора ( $h^2 \pm s_{h^2}$ )				Критерии различий	
		по Плохинскому		по Снедекору		НСР <sub>05</sub>	D <sub>05</sub>
		$h^2$	$\pm s_{h^2}$	$h^2$	$\pm s_{h^2}$		
<i>1-летняя хвоя</i>							
Хлорофилл $a$ ( $a$ )	22,38	0,6036	0,0270	0,5814	0,0285	0,190	0,343
Хлорофилл $b$ ( $b$ )	28,95	0,6632	0,0229	0,6448	0,0242	0,037	0,068
Сумма хлорофиллов ( $a+b$ )	22,67	0,6066	0,0268	0,5846	0,0283	0,114	0,205
Каротиноиды ( $k$ )	15,37	0,5111	0,0333	0,4828	0,0352	0,031	0,056
Отношение $a/b$	11,71	0,4435	0,0379	0,4104	0,0401	0,163	0,293
Отношение $a/k$	26,24	0,6409	0,0244	0,6212	0,0258	0,373	0,672
Отношение $b/k$	31,54	0,6821	0,0216	0,6649	0,0228	0,221	0,398
Доля хлорофилла $a$	10,42	0,4148	0,0398	0,3796	0,0422	0,015	0,028
Доля хлорофилла $b$	10,42	0,4148	0,0398	0,3796	0,0422	0,015	0,028
Доля каротиноидов	20,52	0,5827	0,0284	0,5592	0,0300	0,007	0,013
Отношение $k/(a+b)$	18,76	0,5607	0,0299	0,5358	0,0316	0,009	0,017
Сумма пигментов	25,44	0,6338	0,0249	0,6136	0,0263	0,279	0,504
<i>2-летняя хвоя</i>							
Хлорофилл $a$ ( $a$ )	18,50	0,5572	0,0301	0,5320	0,0318	0,195	0,351
Хлорофилл $b$ ( $b$ )	13,80	0,4842	0,0351	0,4540	0,0371	0,044	0,079
Сумма хлорофиллов ( $a+b$ )	18,43	0,5563	0,0302	0,5311	0,0319	0,123	0,222
Каротиноиды ( $k$ )	6,38	0,3027	0,0474	0,2590	0,0504	0,047	0,084
Отношение $a/b$	4,98	0,2530	0,0508	0,2054	0,0541	0,155	0,280
Отношение $a/k$	2,48	0,1442	0,0582	0,0876	0,0621	0,638	1,152
Отношение $b/k$	4,44	0,2318	0,0523	0,1825	0,0556	0,257	0,463
Доля хлорофилла $a$	4,21	0,2228	0,0529	0,1727	0,0563	0,014	0,026
Доля хлорофилла $b$	4,72	0,2431	0,0515	0,1946	0,0548	0,013	0,023
Доля каротиноидов	2,95	0,1671	0,0567	0,1124	0,0604	0,010	0,018
Отношение $k/(a+b)$	3,63	0,1979	0,0546	0,1458	0,0581	0,011	0,021
Сумма пигментов	17,57	0,5444	0,0310	0,5184	0,0328	0,308	0,556

Примечание: F<sub>оп</sub> – опытное значение критерия Фишера;  $h^2$  – доля влияния организованного фактора;  $\pm s_{h^2}$  – ошибка доли влияния организованного фактора; НСР<sub>05</sub> – наименьшая существенная разность на 5-процентном уровне значимости; D<sub>05</sub> – критерий Тьюки на 5-процентном уровне значимости.

Для хвои всех возрастов опытные значения критерия Фишера (табл. 1) преодолели критический порог как на 5-, так и на 1-процентном уровне значимости. В большой мере это обусловлено достаточным числом первичных единиц выборки, введенных в каждый дисперсионный комплекс. Влияние специфики генотипов плюсовых деревьев, эффект которой рассматривается как коэффициент наследуемости в широком смысле, по всем анализируемым показателям достоверно и достаточно велико. В частности, для 1-летней хвои в вычислениях по алгоритму Плохинского содержание хлорофилла *a* составило  $60,36 \pm 2,70$  %, для хлорофилла *b* оно было еще выше –  $66,32 \pm 2,29$  %. Максимум ( $68,21 \pm 2,16$  %) достигнут для отношения содержания хлорофилла *b* к содержанию каротиноидов. Расчетный метод Снедекора адекватно показал близкие по значениям итоги вычислений.

Для 2-летней хвои указанный эффект оказался несколько ниже, но вполне сопоставим по значениям: по содержанию хлорофилла-*a* –  $55,72 \pm 3,01$  %, хлорофилла-*b* –  $48,42 \pm 3,51$  %. Достаточно высокие результаты в этом случае отмечены для суммарного содержания хлорофилла ( $55,63 \pm 3,02$  %) и общей суммы пигментов ( $54,44 \pm 3,10$  %). Вместе с тем оценки наследственной обусловленности наличия каротиноидов в 2-летней хвое были ниже, чем в 1-летней хвое. Снизились результаты и других признаков. Критерии существенности различий ( $HC_{P_{05}}$  и  $D_{05}$ ) определяют уровень, достигнув которого, разница между средними значениями характеристик плюсовых деревьев признается существенной, т. е. обусловленной преимущественно их наследственными особенностями.

Существенность различий плюсовых деревьев ели европейской по пигментному составу, подтвержденная для 1- и 2-летней хвои, определила возможность выявления эффекта индивидуального влияния каждого из организованных факторов на общую фенотипическую дисперсию. В частности учтено влияние различий между самими плюсовыми деревьями и различий в возрасте их хвои отдельно по каждому из этих факторов (табл. 2).

Практически во всех случаях учета организованные факторы генерируют дисперсию, уровень проявления которой соответствует существенным различиям между элементами дисперсионного комплекса. Опытные критерии Фишера оказались значительно больше соответствующих нормативных значений на 5-процентном уровне значимости. Исключением явились оценки по разновозрастной хвое для отношений содержания хлорофилла *a* к содержанию каротиноидов и содержания хлорофилла *b* к содержанию каротиноидов. Это указывает на индифферентность баланса различных форм хлорофилла и каротиноидов в отношении увеличения возраста хвои. Выраженная хронографическая стабильность указанных характеристик плюсовых деревьев при достаточно высокой их генотипической обусловленности ( $22,48 \pm 2,64$  % и  $30,59 \pm 2,36$  % соответственно) позволяет признать значительную информативность и большое идентификационное значение соотношений между двумя формами хлорофилла и каротиноидами. В соответствии с этим указанные признаки можно рекомендовать к использованию для оценки (при определении) специфичности плюсовых деревьев в процессе селекционной инвентаризации объектов постоянной лесосеменной базы и единого генетико-селекционного комплекса, а также при выработке рекомендаций по их включению в состав лесосеменных плантаций.

Таблица 2

Анализируемый признак	Источник дисперсии	Критерий Фишера		Доля влияния фактора ( $H^2$ - $s_{H^2}$ )		
		$F_{об}$	$F_{ис}$	по Плохнскому		$H^2$ по Снедекору
				$H^2$	$s_{H^2}$	
Хлорофилл $a$ ( $a$ )	Возраст хвои	111,68	3,86	0,0737	0,0016	0,1284
	Орталы	37,03	1,59	0,4887	0,0174	0,4390
	Взаимодействие	3,76	1,59	0,0496	0,0323	0,0672
Хлорофилл $b$ ( $b$ )	Остаток	—	—	0,3880	0,6120	0,3655
	Возраст хвои	108,21	3,86	0,0719	0,002	0,1224
	Орталы	34,65	1,59	0,4605	0,0183	0,4034
Сумма хлорофиллов ( $a+b$ )	Взаимодействие	5,78	1,59	0,0769	0,0314	0,0301
	Остаток	—	—	0,3907	0,6093	0,3596
	Возраст хвои	145,66	3,86	0,0940	0,0015	0,1607
Сумма пигментов ( $a+b+k$ )	Орталы	36,56	1,59	0,4721	0,0180	0,4148
	Взаимодействие	4,20	1,59	0,0543	0,0322	0,0747
	Остаток	—	—	0,3796	0,6204	0,3499
Отношение $a/b$	Возраст хвои	121,58	3,86	0,0782	0,0016	0,1348
	Орталы	37,76	1,59	0,4859	0,0175	0,4314
	Взаимодействие	4,48	1,59	0,0576	0,0321	0,0817
Отношение $a/k$	Остаток	—	—	0,3783	0,6217	0,3521
	Возраст хвои	5,74	3,86	0,0061	0,0017	0,0093
	Орталы	13,04	1,59	0,2793	0,0245	0,2487
Отношение $b/k$	Взаимодействие	3,96	1,59	0,0848	0,0311	0,1223
	Остаток	—	—	0,6297	0,3703	0,6197
	Возраст хвои	0,57	3,86	0,0006	0,0017	-0,0008
Доля хлорофилла $a$	Орталы	10,44	1,59	0,2248	0,0264	0,1867
	Взаимодействие	6,59	1,59	0,1418	0,0292	0,2210
	Остаток	—	—	0,6328	0,3672	0,5931
Доля хлорофилла $b$	Возраст хвои	0,05	3,86	0,0004	0,0017	-0,0013
	Орталы	18,76	1,59	0,3059	0,0236	0,2466
	Взаимодействие	13,18	1,59	0,2148	0,0267	0,3382
Доля каротиноидов	Остаток	—	—	0,4793	0,5207	0,4165
	Возраст хвои	2608,00	3,86	0,7456	0,0004	0,8437
	Орталы	11,19	1,59	0,0640	0,0318	0,0346
Отношение $k(a+b)$	Взаимодействие	3,89	1,59	0,0223	0,0333	0,0197
	Остаток	—	—	0,1681	0,8319	0,1019
	Возраст хвои	350,22	3,86	0,2775	0,0012	0,4143
Отношение $k(a+b)$	Орталы	12,36	1,59	0,1959	0,0274	0,1415
	Взаимодействие	3,83	1,59	0,0607	0,0319	0,0705
	Остаток	—	—	0,4659	0,5341	0,3737
Отношение $k(a+b)$	Возраст хвои	4,99	3,86	0,0053	0,0017	0,0076
	Орталы	11,96	1,59	0,2552	0,0253	0,2198
	Взаимодействие	5,25	1,59	0,1120	0,0302	0,1706
Отношение $k(a+b)$	Остаток	—	—	0,6275	0,3725	0,6020
	Возраст хвои	5,88	3,86	0,0060	0,0017	0,0089
	Орталы	13,57	1,59	0,2774	0,0246	0,2401
Отношение $k(a+b)$	Взаимодействие	5,66	1,59	0,1156	0,0301	0,1779
	Остаток	—	—	0,6010	0,3990	0,5731

Влияние возраста хвои на формирование различий в содержании отдельных пигментов и их групп (табл. 2) достоверно, но невелико и в целом составило от  $7,10 \pm 0,16$  % (содержание каротиноидов) до  $9,40 \pm 0,15$  % (суммарное содержание двух форм хлорофилла). Оценки мало различаются, и наибольшая из них превосходит наименьшую в 1,32 раза, при том что общий размах значений в вариантах с подтвержденной существенностью различий оценивается соотношением 124,27. Изменение с возрастом доли содержания в хвое хлорофилла  $a$  более заметно по сравнению с другими характеристиками пигментного состава. В частности, влияние фактора «возраст хвои» достигает

74,56±0,04 % и может быть связано с ощутимым повышением содержания данного пигмента в 2-летней хвое. Отчетливо выражена реакция на увеличение возраста хвои в содержании хлорофилла *b*: 27,75±0,12 %.

Влияние различий между плюсовыми деревьями на общий фон изменчивости анализируемых характеристик пигментного состава их листового аппарата занимает значительную часть в большинстве случаев. Величина этого эффекта составляет от 23,62±2,60 % (содержание каротиноидов) до 48,87±1,74 % (содержание хлорофилла *a*) и 48,59±1,75 % (сумма пигментов), что зафиксировано в отношении содержания отдельных пигментов и их суммарного количества. Характеристики соотношения исследуемых пластидных пигментов в большей мере связаны с наследственной спецификой ортетов и меньше зависят от возраста хвои. Вместе с тем наследственная обусловленность различий между плюсовыми деревьями в этом случае выражена в несколько меньшей степени, чем для оценок содержания пигментов.

Взаимодействие организованных факторов чаще вызывает достоверный эффект, однако доля этого организованного фактора в структуре общей фенотипической дисперсии практически никогда не преобладает. Остаточная дисперсия, наличие которой, как правило, связывают с пестротой параметров среды на объектах постоянной лесосеменной базы и единого генетико-селекционного комплекса, к которым относится исследованный архив клонов, имеет неоднозначные оценки. При этом в ряде рассматриваемых признаков она доминирует, что зафиксировано в отношении содержания хлорофилла-*a* к содержанию каротиноидов (62,97 %) и содержания каротиноидов к суммарному содержанию хлорофилла (60,10 %). В целом указанные результаты вполне адекватны сведениям, полученным в процессе однофакторного дисперсионного анализа как по 1-летней, так и по 2-летней хвое.

#### *Заключение*

Плюсовые деревья ели европейской существенно различаются по широкому спектру показателей пигментного состава 1- и 2-летней хвои. Степень наследственной обусловленности проявлений разных признаков неодинакова. Оценки содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и их суммарного количества, содержания каротиноидов и общей суммы пигментов тесно связаны с генотипом исследованных клонов. Показатели соотношения между пластидными пигментами в целом имеют меньшую степень генотипической обусловленности по сравнению с количественными оценками их содержания. Оценки отношения хлорофилла *a* и хлорофилла *b* к содержанию каротиноидов весьма стабильны в онтогенетическом плане, что свидетельствует об их большом идентификационном значении и указывает на целесообразность применения при ревизии чистоты сортиментного состава лесосеменных плантаций и архивов клонов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барская Е.И. Изменения хлоропластов и вызревание побегов в связи с морозоустойчивостью древесных растений. М.: Наука, 1967. 223 с.
2. Бессчетнова Н.Н. Многомерная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной по показателям пигментного состава хвои // Вестн. ПГТУ Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 1. С. 5–13.

3. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Морфометрия и физиология хвои плюсовых деревьев. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2014. 368 с.
4. Бессчетнова, Н.Н., Кулькова А.В. Сравнительная оценка представителей рода ель (*Picea* L.) по содержанию жиров в тканях годичных побегов // Научные и инновационные разработки молодых ученых-аграриев: сб. тр. молодых ученых ФГБОУ ВПО Нижегородская ГСХА за 2014–2015 гг. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2015. С. 53–58.
5. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кулькова А.В., Мишукова И.В. Содержание крахмала в тканях побегов разных видов ели (*Picea* A. Dietr.) в условиях интродукции // Лесн. журн. 2017. № 4. С. 57–68. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.57
6. Вавилов Н.И. Учение о происхождении культурных растений после Дарвина // Избр. тр. в 2 т. Т. 1. Л.: Наука, 1967. С. 303–327.
7. Государственная программа Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства» на 2013–2020 годы: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 дек. 2012 г. № 2593-р // Собр. законодательства Российской Федерации. 2013. № 2. Ст. 124. Режим доступа: [http://www.nbchr.ru/PDF/042\\_oos.pdf](http://www.nbchr.ru/PDF/042_oos.pdf) (дата обращения: 17.09.2013).
8. Дерюгин А.А., Рубцов М.В. Динамика состояния популяции ели под пологом березняков южной тайги Русской равнины // Лесн. журн. 2016. № 2. С. 47–58. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.47
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (С основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 5-е, доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
10. Моссэ И.Б., Молофей В.П., Кострова Л.Н. Развитие идеи Н.И. Вавилова о защитной роли пигментов в генетических экспериментах // Селекция, генетические ресурсы и сохранение генофонда лесных древесных растений (Вавиловские чтения): сб. науч. тр. Гомель, 2003. Вып. 59. С. 220–223.
11. Никитин К.Е., Швиденко А.З. Методы и техника обработки лесоводственной информации М.: Лесн. пром-сть, 1978. 272 с.
12. Озолина И.А., Мочалкин А.И. Роль пигментов в защитно-приспособительных реакциях растений // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1972. № 1. С. 96–102.
13. Пеккоев А.Н. Качество древесины культур ели при ускоренном лесовыращивании // Лесн. журн. 2016. № 1. С. 89–99. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.89
14. Роне В.М. Исследование и проверка наследственности плюсовых деревьев // Лесн. селекция. М.: Лесн. пром-сть, 1972. С. 180–199.
15. Роне В.М. Межсемейный и клоновый отбор ели обыкновенной // Генетические исследования древесных в Латвийской ССР. Рига: Зинатне, 1975. С. 34–44.
16. Сунгурова Н.Р., Коновалов В.Н. Ассимиляционный аппарат ели в культурах на долгомошной вырубке // Лесн. журн. 2016. № 2. С. 31–40. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.31
17. Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. и др. Практикум по физиологии растений: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / под общ. ред. Н.Н. Третьякова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
18. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
19. Bassman J.H., Edwards G.E., Robberecht R. Long-Term Exposure to Enhanced UV-B Radiation is not Detrimental to Growth and Photosynthesis in Douglas-Fir // New Phytologist. 2002. Vol. 154, iss. 1. Pp. 107–120. DOI:10.1046/j.1469-8137.2002.00354.x
20. Bouvier F., Backhaus R.A., Camara B. Induction and Control of Chloroplast-Specific Carotenoid Genes by Oxidative Stress // Journal of Biological Chemistry. 1998. Vol. 273, no. 46. Pp. 30651–30659. DOI: 10.1074/jbc.273.46.30651

21. Dere Ş., Güneş T., Sivaci R. Spectrophotometric Determination of Chlorophyll – A, B and Total Carotenoid Contents of Some Algae Species Using Different Solvents // Turkish Journal of Botany. 1998. Vol. 22, no. 1. Pp. 13–17.
22. Eerikäinen K., Valkonen S., Saksa T. Ingrowth, Survival and Height Growth of Small Trees in Uneven-Aged *Picea abies* Stands in Southern Finland // Forest Ecosystems. 2014. Vol. 1(5). Pp. 1–10. DOI: 10.1186/2197-5620-1-5
23. Elvira S., Alonso R., Castillo F.J., Gimeno B.S. On the Response of Pigments and Antioxidants of *Pinus halepensis* Seedlings to Mediterranean Climatic Factors and Long-Term Ozone Exposure // New Phytologist. 1998. Vol. 138, iss. 3. Pp. 419–432. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1998.00136.x
24. Gitelson A.A., Buschmann C., Lichtenthaler H.K. The Chlorophyll Fluorescence Ratio  $F_{735}/F_{700}$  as an Accurate Measure of the Chlorophyll Content in Plants // Remote Sensing of Environment. 1999. Vol. 69, iss. 3. Pp. 296–302. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00023-1
25. Haag C., Stober F., Lichtenthaler H.K. Pigment Content, Chlorophyll Fluorescence and Photosynthetic Activity of Spruce Clones under Normal and Limited Mineral Nutrition // Photosynthetica. 1992. Vol. 27, iss. 3. Pp. 385–400.
26. Kowalczyk J. Combining Production of Improved Seeds with Genetic Testing in Seedling Seed Orchards // Seed Orchard: Proceedings from a Conference at Umeå, Sweden, September 26–28, 2007 / ed. by D. Lindgren. Umeå: SLU, 2008. Pp. 126–134.
27. Kurteva M., Gateva R. Influence of Industrial and Transport Pollution on the Plastid Pigments of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* Karst. and *Thuja orientalis* L. // Scientific Papers of Jubilee Scientific Conference with International Participation “70th Anniversary of the Forest Research Institute”, Sofia, Bulgaria, October 6–7, 1998. Sofia: Forest Research Institute, 1998. Vol. 1. Pp. 146–151.
28. Kvičala M., Lacková E., Urbancová L. Photosynthetic Active Pigments Changes in Norway Spruce (*Picea abies*) under the Different Acclimation Irradiation and Elevated CO<sub>2</sub> Content // ISRN Environmental Chemistry. 2014. Vol. 2014, article ID 572576. 4 p. DOI: 10.1155/2014/572576
29. Lichtenthaler H.K. Biosynthesis and Accumulation of Isoprenoid Carotenoids and Chlorophylls and Emission of Isoprene by Leaf Chloroplasts // Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences. 2009. Vol. 3, no. 3. Pp. 81–94.
30. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy // Current Protocols in Food Analytical Chemistry. 2001. Vol. UNIT F4.3. Pp. F4.3.1–F4.3.8. DOI: 10.1002/0471142913.faf0403s01
31. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls a and b of Leaf Extracts in Different Solvents // Biochemical Society Transactions. 1983. Vol. 11(5). Pp. 591–592. DOI: 10.1042/bst0110591
32. Lidholm J., Gustafsson P.A. Functional Promoter Shift of a Chloroplast Gene: A Transcriptional Fusion between a Novel *psbA* Gene Copy and the *trnK*(UUU) Gene in *Pinus contorta* // The Plant Journal. 1992. Vol. 2, iss. 6. Pp. 875–886. DOI: 10.1046/j.1365-313X.1992.t01-4-00999.x
33. Major J.E., Barsi D.C., Mosseler A., Campbell M. Genetic Variation and Control of Chloroplast Pigment Concentrations in *Picea rubens*, *Picea mariana* and Their Hybrids. I. Ambient and Elevated [CO<sub>2</sub>] Environments // Tree Physiology. 2007. Vol. 27(3). Pp. 353–364. DOI: 10.1093/treephys/27.3.353
34. Matras J.A. A Review of the Seed Orchard Programme in Poland // Seed Orchard: Proceedings from a Conference at Umeå, Sweden, September 26–28, 2007 / ed. by D. Lindgren. Umeå: SLU, 2008. Pp. 165–176.
35. Niinemets Ü. Acclimation to Low Irradiance in *Picea abies*: Influences of Past and Present Light Climate on Foliage Structure and Function // Tree Physiology. 1997. Vol. 17, iss. 11. Pp. 723–732. DOI: 10.1093/treephys/17.11.723
36. Niinemets Ü. Stomatal Conductance Alone Does not Explain the Decline in Foliar Photosynthetic Rates with Increasing Tree Age and Size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* // Tree Physiology. 2002. Vol. 22, iss. 8. Pp. 515–535. DOI: 10.1093/treephys/22.8.515

37. Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrin E. Frost Damage in *Pinus sylvestris* L. Stems Assessed by Chlorophyll Fluorescence in Cortical Bark Chlorenchyma // *Annals of Forest Science*. 2008. Vol. 65(8). Pp. 813p1–813p6. DOI: 10.1051/forest:2008068
38. Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. II. Using the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry to Study the Effect of the Light Environment // *Tree Physiology*. 2008. Vol. 28, iss. 10. Pp. 1483–1491. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1483
39. Porcar-Castell A., Juurola E., Nikinmaa E., Berninger F., Ensminger I., Hari P. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. I. Estimating the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry // *Tree Physiology*. 2008. Vol. 28, iss. 10. Pp. 1475–1482. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1475
40. Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic Decline and Pigment Loss during Autumn Foliar Senescence in Western Larch (*Larix occidentalis*) // *Tree Physiology*. 1997. Vol. 17, iss. 12. Pp. 767–775. DOI: 10.1093/treephys/17.12.767
41. Skuodiene L. Quantitative Changes in Aminoacid Proline and Chlorophyll in the Needles of *Picea abies* Karst. (L.) during Stress and Adaptation // *Biologija*. 2001. No. 2. Pp. 54–56.
42. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // *Journal of Plant Physiology*. 1994. Vol. 144, iss. 3. Pp. 307–313. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2

Поступила 20.06.18

UDC 630\*232.12:582.475.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.63

### Genotypic Conditionality of Plus Tree Needle Pigment Composition of Norway Spruce

*N.N. Besschetnova, Doctor of Agricultural Sciences*

*V.P. Besschetnov, Doctor of Biological Sciences, Professor*

*P.V. Ershov, Postgraduate Student*

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; e-mail: besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru

We have studied annual and biennial needles pigment composition of Norway spruce plus trees (ortets) from the composition of clone archive no. 3 of the State Budgetary Institution “Semyenovskiy spetssemleskhoz” in Nizhny Novgorod region, where they are represented by grafted plants (clones or ramets). The research purpose consist of identification of specificity determination by genotype of Norway spruce plus trees in terms of pigment composition, which participate in photosynthesis, and establishment of specificity display extent in annual and biennial needles. All record plants had the same feeding areas, and plant spacing and received the same silvicultural and agrotechnical tending. Needle sampling was held taking into account their age and affiliation with ortets and ramets. Test parameters were the content of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids, their total amount and the relation between them. Spectrophotometric analysis was used as the most accurate method for quantitative detection of vital plastid pigments. Ethanol of 96 % was used as an extraction agent. The absorption peaks in quantitative fixation of extract optical density corresponded to the

---

*For citation:* Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Ershov P.V. Genotypic Conditionality of Plus Tree Needle Pigment Composition of Norway Spruce. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 63–76. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.1.63

following wavelengths: chlorophyll a (663 nm), chlorophyll b (645 nm), and undifferentiated carotenoids (440 nm). One-way and two-way analyses of variance (ANOVA) were used for statistical processing. Perceptible differences in the pigment composition of plus tree leaf apparatus of Norway spruce were established when grown in a leveled environmental background. One-way ANOVA confirmed their essentiality for annual and biennial needles for all parameters involved in the experiment. The influence of the genotype specificity of plus trees, effect of which is recognized as the coefficient of heritability in a broad sense, is quite large and reliable according to all considered parameters. Separate influence of the genotype specificity of plus trees and differences in the age of their needles on the formation of phenotypic variation was recorded in two-way ANOVA. Effect from needle age on the formation of differences in the content of individual pigments and their groups was reliable, but small and generally ranged from  $7.10 \pm 0.16$  % (carotenoid content) to  $9.40 \pm 0.15$  % (total chlorophyll content). The dispersion proportion associated with the genotype specificity of plus trees is significant in general and up to 48.87 %. The interaction between the organized factors often causes a significant effect; however, its share in the structure of total phenotypic dispersion hardly ever prevails. The presence of residual dispersion is due to inevitable diversity of environmental background.

**Keywords:** Norway spruce, plus trees, clone archive, needles, pigment composition, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, genotypic conditionality.

#### REFERENCES

1. Barskaya E.I. *Izmeneniya khloroplastov i vyzrevaniye pobegov v svyazi s morozoustoychivost'yu drevesnykh rasteniy* [Changes in Chloroplasts and Shoot Ripening Due to Frost Resistance of Woody Plants]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 223 p. (In Russ.)
2. Besschetnova N.N. *Mnogomernaya otsenka plyusovykh derev'yev sosny obyknovnoy po pokazatelyam pigmentnogo sostava khvoi* [Multidimensional Assessment of Scots Pine Plus Trees Using Indicators of Needle Pigment Structure]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2013, no. 1, pp. 5–13.
3. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Sosna obyknovennaya (Pinus sylvestris L.). Morfometriya i fiziologiya khvoi plyusovykh derev'yev* [Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). Morphometry and Physiology of Plus Tree Needles]. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2014. 368 p. (In Russ.)
4. Besschetnova, N.N., Kul'kova A.V. *Sravnitel'naya otsenka predstaviteley roda el' (Picea L.) po sodержaniyu zhirov v tkanyakh godichnykh pobegov* [Comparative Evaluation of the Genus Spruce (*Picea* L.) Representatives by the Fat Content in Annual Shoot Tissues]. *Nauchnyye i innovatsionnyye razrabotki molodykh uchenykh agrariyev: sb. tr. molodykh uchenykh FGBOU VPO Nizhegorodskaya GSKhA za 2014–2015 gg.* [Scientific and Innovative Solutions of Young Agricultural Scientists: Collected Papers of Young Scientists of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy for 2014–2015]. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2015, pp. 53–58.
5. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kul'kova A.V., Mishuchkova I.V. *Soderzhaniye krakhmala v tkanyakh pobegov raznykh vidov eli (Picea A. Dietr.) v usloviyakh introduktsii* [Starch Content in Shoot Tissues of Different Spruce Species (*Picea* A. Dietr.) in Introduction]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2017, no. 4, pp. 57–68. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.57
6. Vavilov N.I. *Ucheniye o proiskhozhdenii kul'turnykh rasteniy posle Darvina* [The Doctrine of Origin of Cultivated Plants after Darwin]. *Izbr. tr. v 2 t. T. 1* [Selected Papers in Two Volumes. Vol. 1]. Leningrad: Nauka Publ., 1967, pp. 303–327.

7. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye lesnogo khozyaystva» na 2013–2020 gody: utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 dek. 2012 g. № 2593-r [Government Program of the Russian Federation “Forestry Development” for 2013–2020, Approved by the Government Decree of the Russian Federation Dated by December 28, 2012, no. 2593-p]. *Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation], 2013, no. 2. 124 p. Available at: [http://www.nbchr.ru/PDF/042\\_oos.pdf](http://www.nbchr.ru/PDF/042_oos.pdf) (accessed 17.09.13).

8. Deryugin A.A., Rubtsov M.V. Dinamika sostoyaniya populyatsii eli pod pologom bereznyakov yuzhnoy taygi Russkoy ravniny [Dynamics of Spruce Population Status under the Canopy of Birch Forests of the Southern Taiga of the Russian Plain]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2016, no. 2, pp. 47–58. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.47

9. Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta (S osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of the Field Experiment (With the Basics of Research Results Statistical Processing)]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 416 p. (In Russ.)

10. Mosse I.B., Molofey V.P., Kostrova L.N. Razvitiye idei N.I. Vavilova o zashchitnoy roli pigmentov v geneticheskikh eksperimentakh [Development of N.I. Vavilov's Ideas about Pigment Protective Role in Genetic Experiments]. *Selektsiya, geneticheskiye resursy i sokhraneniye genofonda lesnykh drevesnykh rasteniy (Vavilovskiy chteniya): sb. nauch. tr.* [Breeding, Genetic Resources and Conservation of Gene Pool of Forest Woody Plants (Vavilov Readings): Collection of Academic Papers]. Gomel, 2003, no. 59, pp. 220–223.

11. Nikitin K.E., Shvidenko A.Z. *Metody i tekhnika obrabotki lesovodstvennoy informatsii* [Methods and Technology for Processing of Silvicultural Information]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 272 p. (In Russ.)

12. Ozolina I.A., Mochalkin A.I. Rol' pigmentov v zashchitno-prisposobitel'nykh reaktsiyakh rasteniy [Role of Pigments in Protective and Adaptive Reactions of Plants]. *Izv. AN SSSR. Ser. Biol.* [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Biology], 1972, vol. 1, pp. 96–102.

13. Pekkoev A.N. Kachestvo drevesiny kul'tur eli pri uskorennoy lesovyrashchivanii [Wood Quality of Spruce Crops under Intensive Growing]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2016, no. 1, pp. 89–99. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.89

14. Rone V.M. Issledovaniye i proverka nasledstvennosti plyusovykh derev'yev [Researching and Verification of Plus Tree Heredity]. *Lesnaya selektsiya* [Forest Selection]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972, pp. 180–199. (In Russ.)

15. Rone V.M. Mezhsemyeynyy i klonovyy otbor eli obyknovennoy [Interfamily and Clonal Selection of Norway Spruce]. *Geneticheskiye issledovaniya drevesnykh v Latvyskoy SSR* [Genetic Studies of Woody Plants in the Latvian SSR]. Riga, Zinatne Publ., 1975, pp. 34–44.

16. Sungurova N.R., Konovalov V.N. [Spruce Assimilation Apparatus in Plantations at the Polytrich Cutting]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2016, no. 2, pp. 31–40. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.31

17. Tret'yakov N.N., Karnaukhova T.V., Panichkin L.A. i dr. *Praktikum po fiziologii rasteniy: ucheb. posobiye dlya studentov vyssh. ucheb. zavedeniy* [Workshop on Plant Physiology: Educational Textbook for Students of Higher Educational Institutions]. Ed. by N.N. Tret'yakov, Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 271 p. (In Russ.)

18. Shlyk A.A. Opredeleniye khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'yev [Determination of Chlorophylls and Carotenoids in Green Leaf Extracts]. *Biokhicheskiye metody v fiziologii rasteniy* [Biochemical Methods in Plant Physiology]. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 154–170.

19. Bassman J.H., Edwards G.E., Robberecht R. Long-Term Exposure to Enhanced UV-B Radiation is not Detrimental to Growth and Photosynthesis in Douglas-Fir. *New Phytologist*, 2002, vol. 154, iss. 1, pp. 107–120. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2002.00354.x

20. Bouvier F., Backhaus R.A., Camara B. Induction and Control of Chloroplast-Specific Carotenoid Genes by Oxidative Stress. *Journal of Biological Chemistry*, 1998, vol. 273, no. 46, pp. 30651–30659. DOI: 10.1074/jbc.273.46.30651

21. Dere Ş., Güneş T., Sivaci R. Spectrophotometric Determination of Chlorophyll – A, B and Total Carotenoid Contents of Some Algae Species Using Different Solvents. *Turkish Journal of Botany*, 1998, vol. 22, no. 1, pp. 13–17.

22. Eerikäinen K., Valkonen S., Saksa T. Ingrowth, Survival and Height Growth of Small Trees in Uneven-Aged *Picea abies* Stands in Southern Finland. *Forest Ecosystems*, 2014, vol. 1(5), pp. 1–10. DOI: 10.1186/2197-5620-1-5

23. Elvira S., Alonso R., Castillo F.J., Gimeno B.S. On the Response of Pigments and Antioxidants of *Pinus halepensis* Seedlings to Mediterranean Climatic Factors and Long-Term Ozone Exposure. *New Phytologist*, 1998, vol. 138, iss. 3, pp. 419–432. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1998.00136.x

24. Gitelson A.A., Buschmann C., Lichtenthaler H.K. The Chlorophyll Fluorescence Ratio  $F_{735}/F_{700}$  as an Accurate Measure of the Chlorophyll Content in Plants. *Remote Sensing of Environment*, 1999, vol. 69, iss. 3, pp. 296–302. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00023-1

25. Haag C., Stober F., Lichtenthaler H.K. Pigment Content, Chlorophyll Fluorescence and Photosynthetic Activity of Spruce Clones under Normal and Limited Mineral Nutrition. *Photosynthetica*, 1992, vol. 27, iss. 3, pp. 385–400.

26. Kowalczyk J. Combining Production of Improved Seeds with Genetic Testing in Seedling Seed Orchards. *Seed Orchard: Proceedings from a Conference at Umeå, Sweden, September 26–28, 2007*. Ed. by D. Lindgren, Umeå, SLU, 2008, pp. 126–134.

27. Kurteva M., Gateva R. Influence of Industrial and Transport Pollution on the Plastid Pigments of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* Karst. and *Thuja orientalis* L. *Scientific Papers of Jubilee Scientific Conference with International Participation “70th Anniversary of the Forest Research Institute”, Sofia, Bulgaria, October 6–7, 1998*. Sofia, Forest Research Institute, 1998, vol. 1, pp. 146–151.

28. Kvičala M., Lacková E., Urbancová L. Photosynthetic Active Pigments Changes in Norway Spruce (*Picea abies*) under the Different Acclimation Irradiation and Elevated CO<sub>2</sub> Content. *ISRN Environmental Chemistry*, 2014, vol. 2014, article ID 572576. 4 p. DOI: 10.1155/2014/572576

29. Lichtenthaler H.K. Biosynthesis and Accumulation of Isoprenoid Carotenoids and Chlorophylls and Emission of Isoprene by Leaf Chloroplasts. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 81–94.

30. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001, vol. UNIT F4.3., pp. F4.3.1–F4.3.8. DOI: 10.1002/0471142913.faf0403s01

31. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls a and b of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, vol. 11(5), pp. 591–592. DOI: 10.1042/bst0110591

32. Lidholm J., Gustafsson P.A. Functional Promoter Shift of a Chloroplast Gene: A Transcriptional Fusion between a Novel *psbA* Gene Copy and the *trnK(UUU)* Gene in *Pinus contorta*. *The Plant Journal*, 1992, vol. 2, iss. 6, pp. 875–886. DOI: 10.1046/j.1365-313X.1992.t01-4-00999.x

33. Major J.E., Barsi D.C., Mosseler A., Campbell M. Genetic Variation and Control of Chloroplast Pigment Concentrations in *Picea rubens*, *Picea mariana* and Their Hybrids. I. Ambient and Elevated [CO<sub>2</sub>] Environments. *Tree Physiology*, 2007, vol. 27(3), pp. 353–364. DOI: 10.1093/treephys/27.3.353

34. Matras J.A. A Review of the Seed Orchard Programme in Poland. *Seed Orchard: Proceedings from a Conference at Umeå, Sweden, September 26–28, 2007*. Ed. by D. Lindgren, Umeå, SLU, 2008, pp. 165–176.

35. Niinemets Ü. Acclimation to Low Irradiance in *Picea abies*: Influences of Past and Present Light Climate on Foliage Structure and Function. *Tree Physiology*, 1997, vol. 17, iss. 11, pp. 723–732. DOI: 10.1093/treephys/17.11.723

36. Niinemets Ü. Stomatal Conductance Alone Does not Explain the Decline in Foliar Photosynthetic Rates with Increasing Tree Age and Size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 2002, vol. 22, iss. 8, pp. 515–535. DOI: 10.1093/treephys/22.8.515

37. Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrín E. Frost Damage in *Pinus sylvestris* L. Stems Assessed by Chlorophyll Fluorescence in Cortical Bark Chlorenchyma. *Annals of Forest Science*, 2008, vol. 65(8), pp. 813p1–813p6. DOI: 10.1051/forest:2008068

38. Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. II. Using the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry to Study the Effect of the Light Environment. *Tree Physiology*, 2008, vol. 28, iss. 10, pp. 1483–1491. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1483

39. Porcar-Castell A., Juurola E., Nikinmaa E., Berninger F., Ensminger I., Hari P. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. I. Estimating the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry. *Tree Physiology*, 2008, vol. 28, iss. 10, pp. 1475–1482. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1475

40. Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic Decline and Pigment Loss during Autumn Foliar Senescence in Western Larch (*Larix occidentalis*). *Tree Physiology*, 1997, vol. 17, iss. 12, pp. 767–775. DOI: 10.1093/treephys/17.12.767

41. Skuodiene L. Quantitative Changes in Aminoacid Proline and Chlorophyll in the Needles of *Picea abies* Karst. (L.) during Stress and Adaptation. *Biologija*, 2001, no. 2, pp. 54–56.

42. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*, 1994, vol. 144, iss. 3, pp. 307–313. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2

Received on June 20, 2018

---

УДК 630\*187:574

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.77

**ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА ФЛОРИСТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ  
СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ***В.П. Макаров, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.**О.Ф. Малых, науч. сотр.**И.В. Горбунов, канд. биол. наук, науч. сотр.**Л.Н. Пак, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.**Ю.В. Зима, канд. геогр. наук, науч. сотр.**Е.А. Банщикова, инж.**Т.В. Желибо, инж.*

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

Показано влияние обширных и неоднократных лесных пожаров на флористическое разнообразие соснового леса, типичного для лесостепной зоны Восточного Забайкалья. Общая характеристика соснового бора проведена по материалам лесоустройства 1994 г. до воздействия обширных пожаров. Современное состояние и площади нарушенных участков леса выявлены с помощью космических снимков и полевых исследований. Методом пробных площадей определен флористический состав длительного времени не горевших и находящихся в разной стадии восстановительной сукцессии после пожаров растительных сообществ. Для оценки их биоразнообразия использовали индекс концентрации видового богатства, индекс редких растений, долю «лесных» и адвентивных видов растений. Установлено, что сосновый массив сформирован разнообразными типами леса, доминируют по площади сосняки рододендроновые, сосняки злаково-разнотравные занимают меньшую площадь. На сосняки осоковый, горно-каменистый, багульниковый и приручейный приходится до 5 % от общей площади. Соотношение площадей моно- и олигодоминантных лесов в определенной степени связано с направлением склона. Площади, занятые монодоминантными лесами, больше площадей олигодоминантных лесов на склонах северо-западной и юго-западной экспозиций. При этом на южных, северных, западных и восточных склонах большие площади занимают олигодоминантные леса. До возникновения обширных лесных пожаров в составе лесного массива более 50 % составляли молодняки и средневозрастные насаждения. На приспевающие древостои приходилось около 40 %, на спелые и перестойные – до 10 % от всей лесопокрытой площади. Соотношение возрастных групп насаждений после пожаров изменилось мало, однако погибли старовозрастные насаждения в возрасте более 110–130 лет. Количество видов растений на длительно не горевших участках леса достоверно больше, чем на горях, вырубках и в культурах сосны. Индекс концентрации видового богатства выше на вырубках и в длительно не горевших насаждениях. После воздействия пожаров индекс редких видов на горях снизился от 1,25 (длительно не горевшие насаждения) до 0,25. На горях произошло увеличение доли адвентивных видов растений, а также растений, характерных для степных сообществ. В результате исследований установлено, что лесные пожары привели к значительному снижению лесистости, площади длительно не горевших лесов и уникальных плантаций древесных растений, видового разнообразия, индексов концентрации видового богатства и редких видов, доли участия в растительном

---

*Для цитирования:* Макаров В.П., Малых О.Ф., Горбунов И.В., Пак Л.Н., Зима Ю.В., Банщикова Е.А., Желибо Т.В. Влияние пожаров на флористическое разнообразие сосновых лесов Восточного Забайкалья // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 77–86. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.77

сообществе «лесных» видов, а также засорению растительных сообществ чужеродными видами на гарях. Результаты работы могут быть использованы при оценке влияния климатических изменений и пожаров на биологическое разнообразие лесных сообществ в регионе, разработке мероприятий по сохранению биоразнообразия, планированию рубок леса и лесовосстановительных работ и др.

*Ключевые слова:* Забайкалье, сосновый лес, климат, пожары, флористическое разнообразие.

### *Введение*

Биоразнообразие в последнее десятилетие становится одним из самых распространенных понятий в научной литературе, природоохранном движении и международных связях. Научные исследования доказали, что необходимым условием нормального функционирования экосистем и биосферы в целом является достаточный уровень природного разнообразия на нашей планете. В настоящее время биологическое разнообразие рассматривается как основной параметр, характеризующий состояние надорганизменных систем. В ряде стран именно эта характеристика выступает в качестве базы экологической политики государства, стремящегося сохранить свои биологические ресурсы и обеспечить устойчивое экономическое развитие [11–15].

С 1885 по 2012 г. средняя годовая температура воздуха в Забайкалье повысилась на 2,0 °С. Продолжительность теплого периода на всей его территории с середины прошлого века увеличилась на 3–19 дн., а повышение температуры воздуха привело к увеличению продолжительности вегетационного периода [7].

В южных и юго-восточных районах региона количество атмосферных осадков уменьшилось, в северо-восточных – наоборот возросло. Подобно температуре воздуха в последние два десятилетия растет засушливость. Многолетний ход гидротермического коэффициента аналогичен ходу количества осадков.

Сосняки широко распространены по всему Забайкалью, встречаются повсеместно вплоть до Чарской и Муйской котловин [6]. В крае общая площадь сосновых лесов, образованных сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), составляет 2408,2 тыс. га, их доля от общей площади – 9,69 %, запас – 275,2 тыс. м<sup>3</sup>, доля от общего запаса – 11,55 %. Помимо сосны обыкновенной, в юго-западных районах Забайкальского края кедровые леса образует сосна сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour et (Loudon) Mayr), на юго-востоке степные боры состоят из экотипа сосны обыкновенной – сосны Крылова (*Pinus sylvestris* susp. *krylovii* (Serg. et Kondr.) Busik), по современным данным близкой по биологии с экотипом сосны обыкновенной – кулундинской (*Pinus sylvestris* susp. *kuludensis* Sukacz. ex Pravdin). Кроме того, в высокогорных районах, особенно на севере края, произрастает кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pallas) Regel).

Сосняки по лесопокрытой площади Забайкальского края распределены неравномерно. Более широко они представлены в Петровск-Забайкальском, Хилокском, Улетовском и Акшинском районах и занимают как равнинные участки с песчаными и супесчаными почвами, так и склоны гор с разнообразными, часто каменистыми и недоразвитыми почвами. Наиболее характерно их присутствие на сухих песчаных массивах и южных склонах гор, реже встречаются на высоких уровнях речных пойм, в пределах степных территорий. По большим межгорным понижениям и склонам широких долин сосняки глубоко проникают в зону степей и наряду с лиственничниками способствуют формированию лесостепных ландшафтов [8].

Флора сосновых лесов насчитывает свыше 450 видов растений (не считая мхов, лишайников и грибов). Она обогащена многочисленными степными растениями, широко внедряющимися не только в лесостепные боры, но и в сосняки таежного пояса, и рядом таежных растений, особенно разнообразных в тех экотопах, которые ранее были заняты темнохвойной или лиственничной тайгой. Большим разнообразием отличаются бобовые (*Vicia*, *Astragalus*, *Oxytropis*, *Lathyrus*), злаки (*Poa*, *Festuca*, *Elymus*, *Calamagrostis*, *Stipa*) и др., а также сложноцветные (*Artemisia* и *Saussurea*). Наиболее массовыми и распространенными компонентами подлеска и покрова сосновых боров являются *Rhododendron dauricum*, *Duschekia fruticosa*, *Spiraea*, *Rhodococcum vitis-idaea*.

Очень разнообразен состав сосновых лесов на высоких уровнях речных пойм, шлейфов горных склонов с хорошо развитыми и увлажненными почвами, на крутых южных склонах, а также в лесостепных борах. Даже на небольших участках (0,5 га) в них встречается от 40 до 80 и более видов высших растений. Значительно беднее сосняки с мощным подлеском из *Rhododendron*, *Duschekia*, а также близ верхней границы их распространения (редко более 15–20 видов). Интересной особенностью сосняков является слабое развитие в них мхов и лишайников. Напочвенный покров почти во всех сосняках, за небольшим исключением, или отсутствует, или развит слабо (покрытие от 1...2 до 15...24 %), мелкими пятнами, главным образом на камнях и гниющем валежнике [9].

Число и площадь пожаров в Восточном Забайкалье увеличиваются значительными темпами с 2000 г. Среднее число пожаров возросло в 2 раза, а их площадь – почти в 10 раз. Интенсивные низовые пожары сопровождаются значительным выгоранием напочвенного покрова, древостои изреживаются, снижаются их полнота и запас древесины. На участках послепожарных реди и пустошей значительно уменьшается число всходов, несмотря на благоприятный режим атмосферных осадков. Возобновлению сосны препятствует конкуренция со стороны травяного покрова [3].

В регионе увеличиваются площади нарушенных пожарами участков лесных земель. Происходит остепнение крупных гарей в лесостепных районах Забайкальского края и на склонах южных экспозиций, их опустыривание в центральных районах. В складывающихся условиях пожары выступают как мощный экологический фактор, определяющий возможность существования значительной части лесных экосистем края [2].

В этих условиях важно выяснить, как изменяются показатели биологического разнообразия сосновых лесов в Забайкальском крае, где до настоящего времени подобные исследования не проводились.

#### *Объекты и методы исследования*

Работы проведены в 2017 г. на территории Читинского лесничества. Объект исследования – типичный для лесостепной зоны Восточного Забайкалья сосновый лес, расположенный на северо-западных отрогах хребта Черского (рис. 1). Его площадь около 9 тыс. га. Лес неоднократно был пройден лесными пожарами, особенно разрушительными начиная с 2007 г.

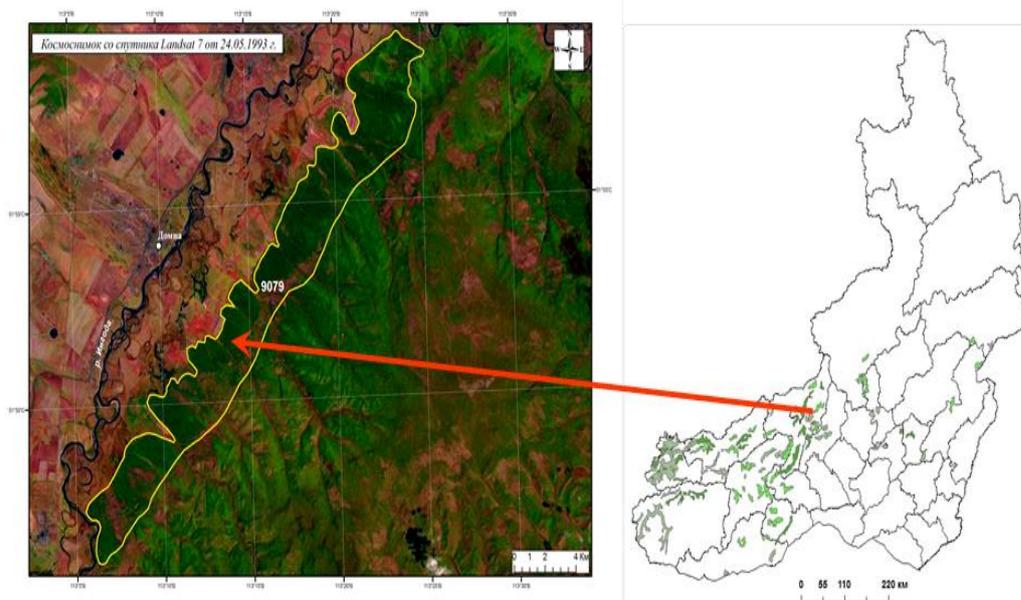


Рис. 1. Расположение исследуемой территории в системе ландшафтов Забайкальского края

Fig. 1. Study area location in the landscape system of Zabaykalsky Krai

Ландшафт бора относится к бореальному восточно-сибирскому типу, подтипу таежный, классу южно-сибирскому, группе ландшафтов – горнотаежные сосновые, виду – склоновые травяные с кустарниковым подлеском.

Сосновый массив сформирован разнообразными типами леса, доминируют по площади сосняки рододендроновые (77 %). Существенно меньшую площадь занимают сосняки злаково-разнотравные (11 %), на сосняки осоковый, горно-каменистый, багульниковый и приручейный приходится 0,3...5,0 % от общей площади массива.

Характеристика соснового бора проведена по материалам лесоустройства 1994 г. Современное состояние и площади нарушенных участков леса выявлены с помощью космических снимков и полевых исследований. На пробных площадях размером 25×25 м (в редких древостоях 50×50 м) описывали условия местообитания (рельеф, крутизну и экспозицию склонов, условия увлажнения почвы по шкале гидротопов, ее гранулометрический состав, степень повреждения пожарами – по общему состоянию древостоя и высоте нагара на стволах, год пожара – по возрасту подроста, лесоустроительным материалам), состав древостоя, сомкнутость крон, проективное покрытие подроста, подлеска травяного и мохово-лишайникового покрова. Значительное внимание было уделено флористическому составу растительных сообществ.

Для оценки биоразнообразия растительных сообществ использовали:

индекс концентрации видового богатства ( $I = S / \lg(A)$ , где  $S$  – число видов;  $A$  – площадь территории);

индекс редких видов растений ( $ИРВ = \sum N_i / C_i$ , где  $N_i$  – число видов данной группы (например, высшие сосудистые растения, мхи, лишайники и др.) определенной категории редкости;  $C_i$  – категория редкости вида (по классификации, принятой в Красной книге);

долю «лесных» и адвентивных видов растений ( $K = (N_a / N) \cdot 100$ , где  $K$  – доля лесных или адвентивных видов, %;  $N_a$  – число лесных или адвентивных видов;  $N$  – общее число видов флоры).

*Результаты исследования и их обсуждение*

В ходе исследования установлено, что с 1994 г. в результате пожаров лесистость территории преимущественно снизилась на 39,6 %; общая доля нарушенных земель в настоящее время – 44,1 %.

Одним из критериев, характеризующих биоразнообразие лесов, является их возрастной состав. Например, старовозрастные леса считаются наиболее ценными для сохранения редких растений и других организмов. До возникновения обширных лесных пожаров значительную долю в составе лесного массива имели молодняки и средневозрастные насаждения – 54,9 %, на приспевающие древостои приходилось 37,9 %, на спелые и перестойные – соответственно 10,0 и 0,3 %. После пожаров соотношение возрастных групп насаждений мало изменилось, однако значительно снизилась общая доля их участия в сложении лесов, погибли старовозрастные насаждения в возрасте более 110–130 лет (рис. 2).

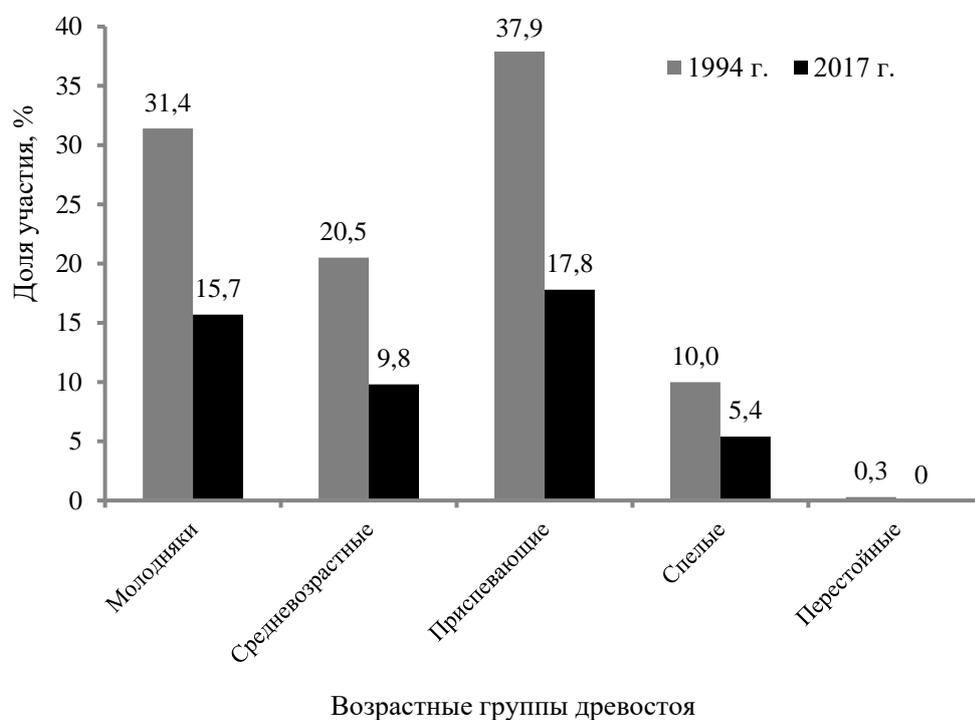


Рис. 2. Изменение возрастного состава соснового бора

Fig. 2. Changes in the age composition of pine forest

Лесные пожары отразились на уровне видового разнообразия лесных сообществ. Общее количество видов растений на длительно не горевших участках леса достоверно больше, чем на горях, вырубках и в культурах сосны.

Разница в количестве видов по категориям лесных земель достоверно отражается на разнообразии видов трав, мхов и лишайников (рис. 3).

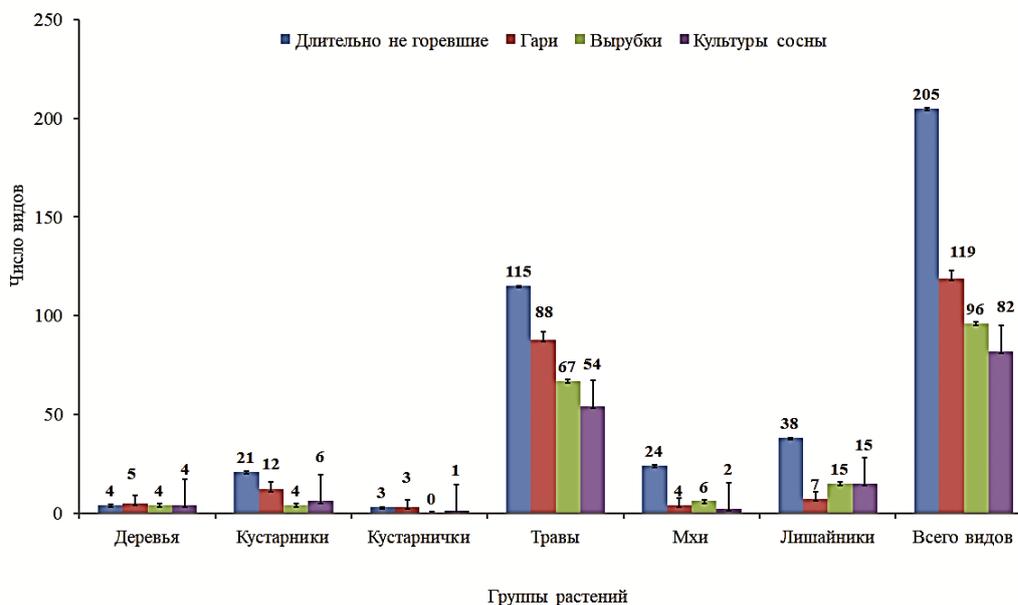


Рис. 3. Изменение количества растений в морфологических группах в зависимости от нарушенности лесов

Fig. 3. Changes in the number of plants in morphological groups depending on forest disturbance

Индекс концентрации видового богатства, характеризующий общую тенденцию в изменении числа видов растений и животных на конкретной территории, вызванном как природными, так и антропогенными факторами, был выше на вырубках и в длительно не горевших насаждениях. Высокий индекс концентрации видового богатства на вырубках можно объяснить созданием лучших условий при осветлении местообитания для развития травяного покрова и кустарников, а также сохранением видового состава древесных пород при относительно небольшой площади вырубки и длительном периоде (около 20 лет) восстановления растительного покрова после нее (см. таблицу).

#### Индекс концентрации видового богатства по категориям лесных земель

Категория земель	Значение индекса
Длительно не горевшие леса	55,5
Гари	33,2
Вырубки	73,8
Культуры сосны	36,3

Подобные результаты были получены на вырубках и другими исследователями [1, 5, 10].

В лесном массиве отмечено 5 видов растений из Красной книги Забайкальского края: лилия пенсильванская (*Lilium pensylvanicum* Ker-Gawler), красоднев малый (*Heimerocallis minor* Miller), касатик кроваво-красный (*Iris sanguinea* Donn), родиола розовая (*Rhodiola rosea* L.), рябина сибирская (*Sorbus sibirica* Hedl.). Для всего лесного массива ИРВ = 2,25. После воздей-

ствия пожаров на гарях этот показатель снижается до 0,25, в сосновых длительно не горевших насаждениях он составляет 1,25.

Известно, что крупные по площади и через непродолжительное время повторяющиеся пожары приводят к остепнению лесных земель – замене лесных сообществ степными. Такая тенденция прослеживается и на исследуемой территории. Соотношение видов растений, относящихся к степному и лесному комплексам (широтно-географическим группам) [4], в длительно не горевших насаждениях находится в равных пропорциях. Однако после обширных и часто повторяющихся лесных пожаров отмечено увеличение доли видов растений, характерных для степных сообществ (рис. 4).

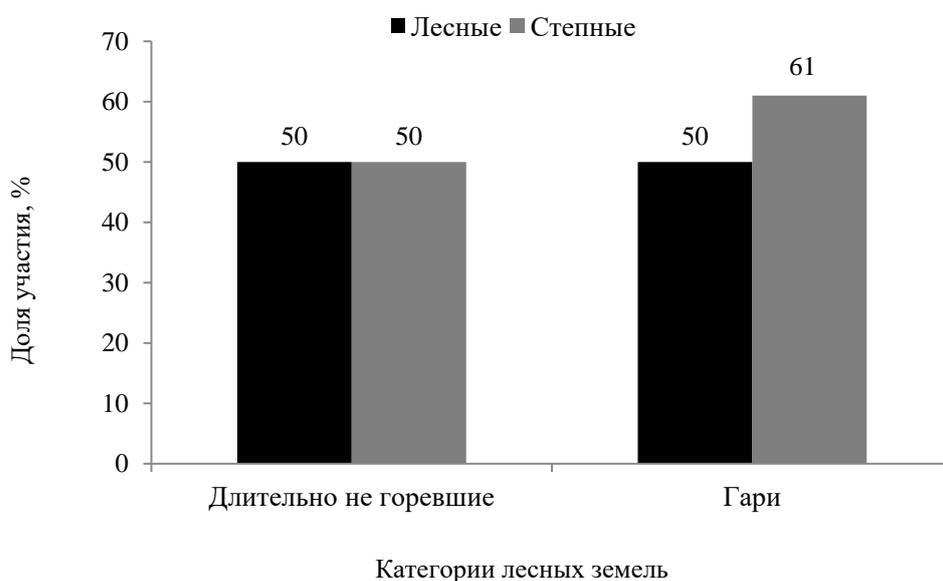


Рис. 4. Изменение соотношения лесных и степных видов растений на гарях

Fig. 4. Changes in the ratio of forest and steppe plant species in burnt areas

Такая же тенденция наблюдается при оценке числа адвентивных (заносных, чужеродных) растений. В длительно не горевших насаждениях не обнаружено заносных растений, а на гарях их около 5 %. Присутствие заносных растений можно объяснить тем, что на гарях проводился вывоз сгоревшего древостоя по временным дорогам. Занос растений мог быть осуществлен транспортом. Кроме того, низкое проективное покрытие природного травостоя после верхового сильного пожара способствует невысокой конкуренции между видами.

Антропогенное воздействие (рубки, распашка земель под сельскохозяйственные культуры, устройство просек и дорог, создание культур сосны) на лесной массив имеет существенно меньшие (площадь около 4,5 %) масштабы по сравнению с лесными пожарами. Оно привело к уничтожению небольшой части древесных насаждений, способствовало водной эрозии почвы, увеличению лесопокрытой площади за счет посадки культур сосны.

*Заключение*

Лесные пожары определили изменение лесных экосистем района исследований, его флористическое разнообразие. Произошло значительное снижение лесистости, площади длительно не горевших лесов, видового разнообразия, индексов концентрации видового богатства и редких видов, доли участия в растительном сообществе «лесных» видов, а также засорение растительных сообществ чужеродными видами на гарях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурова Н.В., Торбик Д.Н., Феклистов П.А. Изменение флористического разнообразия после выборочных рубок в ельниках черничных // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 5. С. 49–52.
2. Буряк Л.В., Кукавская Е.А., Каленская О.П., Малых О.Ф., Бакшеева Е.О. Последствия лесных пожаров в южных и центральных районах Забайкальского края // Сиб. лесн. журн. 2016. № 6. С. 94–102.
3. Евдокименко М.Д. Пирогенные нарушения лесорастительной среды в сосняках Забайкалья и их лесоводственные последствия // Лесоведение. 2014. № 1. С. 3–12.
4. Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1984. 265 с.
5. Мартынова М.В., Султанова Р.Р., Сазгутдинова Р.Р. Влияние рубок на состояние нижних ярусов растительности в липовых лесах // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 14–17 марта 2017 г. Ч. 1. Уфа: Башкир. ГАУ, 2017. С. 65–69.
6. Новосельцева И.Ф. Леса Читинской области // Леса СССР: в 5 т. Т. 4. Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 438–468.
7. Обязов В.А. Изменения современного климата и оценка их последствий для природных и природно-антропогенных систем Забайкалья: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Казань, 2014. 38 с.
8. Панарин И.И. Леса Читинского Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1977. 232 с.
9. Предбайкалье и Забайкалье. М.: Наука, 1965. 492 с.
10. Сергиенко В.Г., Иванов А.М., Власов Р.В., Антонов О.И. Древесный опад и биоразнообразие на участках выборочных рубок Ленинградской области // Тр. СПбНИИЛХ. 2015. № 3. С. 4–19.
11. Bouchard M., Pothier D. Long-Term Influence of Fire and Harvesting on Boreal Forest Age Structure and Forest Composition in Eastern Québec // Forest Ecology and Management. 2011. Vol. 261, iss. 4. Pp. 811–820. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.11.020
12. Hansen A.J., Spies T.A., Swanson F.J., Ohmann J.L. Conserving Biodiversity in Managed Forests: Lessons from Natural Forests // BioScience. 1991. Vol. 41, iss. 6. Pp. 382–392. DOI: 10.2307/1311745
13. Lavoie L., Sirois L. Vegetation Changes Caused by Recent Fires in the Northern Boreal Forest of Eastern Canada // Journal of Vegetation Science. 1998. Vol. 9, no. 4. Pp. 483–492. DOI: 10.2307/3237263
14. Schaich H., Milad M. Forest Biodiversity in a Changing Climate: Which Logic for Conservation Strategies? // Biodiversity and Conservation. 2013. Vol. 22, iss. 5. Pp. 1107–1114. DOI: 10.1007/s10531-013-0491-7
15. Venier L.A., Thompson I.D., Fleming R., Malcolm J., Aubin I., Trofymow J.A., Langor D., Sturrock R., Patry C., Outerbridge R.O., Holmes S.B., Haeussler S., De Grandpré L., Chen H.Y.H., Bayne E., Arsenaault A., Brandt J.P. Effects of Natural Resource Development on the Terrestrial Biodiversity of Canadian Boreal Forests // Environmental Reviews. 2014. Vol. 22(4). Pp. 457–490. DOI: 10.1139/er-2013-0075

UDC 630\*187:574

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.77

**Influence of Fires on Pine Forest Floristic Diversity of the Eastern Transbaikal Territory***V.P. Makarov, Candidate of Biological Sciences, Senior Research Scientist**O.F. Malykh, Research Scientist**I.V. Gorbunov, Candidate of Biological Sciences, Research Scientist**L.N. Pak, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Research Scientist**Yu.V. Zima, Candidate of Geographical Sciences, Research Scientist**E.A. Banshchikova, Engineer**T.V. Zhelibo, Engineer*

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the RAS,  
ul. Nedorezova, 16a, Chita, 672014, Russian Federation; e-mail: vm2853@mail.ru

The article shows the effect of extensive and repeated forest fires on the floristic diversity of pine forests typical for the forest-steppe zone of the Eastern Transbaikal territory. Pine forest general description carried out according to the materials of the forest valuation of 1994, before the extensive fires. The floristic composition of long-term non-burning plant communities in different stages of secondary succession after fires was determined by the method of sample plots. Indexes of species abundance accumulation and rare species, and the share of forest and adventive plant species were used to estimate the biodiversity of plant communities. Pine forestland is formed by a variety of forest types, where rhododendron pine forests dominate by area; while cereal mixed herbs pine forests occupy the smaller area. Sedgy, mountain-lapideous, ledum and riverine pine forests occupy up to 5 % of the total area. Area ratio of monodominant and oligodominant forests to a certain extent associated with slope direction. Monodominant forests areas are larger than oligodominant forests areas on the slopes of the North-West and the South-West exposure; while oligodominant forests occupy large areas on southern, northern, western and eastern slopes. Young and middle-growth plantations were more than 50 % of the forestland before the extensive forest fires. There were about 40 % of ripening forest stands and up to 10 % of mature and over mature forest stands of the total forested area. The age ratio of plantation has changed a little after fires, however, old-growth plantations over 110–130 years old has failed. The number of plant species in the long-term non-burning forest areas is significantly higher than in burnt areas, logged lands and pine crops. The index of species abundance accumulation is higher in logged lands and plantations without burnings. The index of rare species have decreased from 1.25 (long-term non-burning plantations) to 0.25 after fires. The share of adventive plant species as well as plants native to steppe communities had increased in burnt areas. As a research result, it was established that forest fires led to a significant decrease in forest cover, area of long-term non-burning forests, unique plantations of woody plants, species diversity, indexes of species abundance accumulation and rare species, the share of plant communities in forest species and colonization of plant communities in burnt areas by alien species. The results of the work can be used in assessment of the impact of climate change and fires on biological diversity of forest communities in the region, development of measures for biodiversity conservation, planning of forest thinning and reforestation, etc.

*Keywords:* Transbaikal territory, pine forest, climate, fires, floristic diversity.

---

*For citation:* Makarov V.P., Malykh O.F., Gorbunov I.V., Pak L.N., Zima Yu.V., Banshchikova E.A., Zhelibo T.V. Influence of Fires on Pine Forest Floristic Diversity of the Eastern Transbaikal Territory. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 77–86. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.1.77

## REFERENCES

1. Burova N.V., Torbik D.N., Feklistov P.A. Izmeneniye floristicheskogo raznoobraziya posle vyborochnykh rubok v el'nikakh chernichnykh [Changes in Floral Diversity after Selective Thinning in Blueberry Spruce Forests]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Forestry Bulletin], 2010, no. 5, pp. 49–52.
2. Buryak L.V., Kukavskaya E.A., Kalenskaya O.P., Malykh O.F., Baksheeva E.O. Posledstviya lesnykh pozharov v yuzhnykh i tsentral'nykh rayonakh Zabaykal'skogo kraya [Effects of Forest Fires in Southern and Central Areas of the Zabaykal Region]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 6, pp. 94–102.
3. Evdokimenko M.D. Pirogennyye narusheniya lesorastitel'noy sredy v sosnyakakh Zabaykal'ya i ikh lesovodstvennyye posledstviya [Fire-Induced Disturbance of Forest Growth Habitat of Pines in Transbaikal and the Consequences for Silviculture]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2014, no. 1, pp. 3–12.
4. Malyshev L.I., Peshkova G.A. *Osobennosti i genesis flory Sibiri (Predbaykal'ye i Zabaykal'ye)* [Features and Genesis of Siberian Flora (Cisbaikal and Transbaikal)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 265 p. (In Russ.)
5. Martynova M.V., Sultanova R.R., Sazgutdinova R.R. Vliyaniye rubok na sostoyaniye nizhnikh yarusov rastitel'nosti v lipovykh lesakh [Effect from Thinning on the State of Vegetation Understory in Linden Forests]. *Sovremennoye sostoyaniye, traditsii i innovatsionnyye tekhnologii v razvitiy APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ufa, 14–17 marta 2017 g. Ch. 1* [Current State, Traditions and Innovation Technologies in Development of the Agroindustrial Complex: Materials of the Int. Sci.-Pract. Conf., Ufa, March 14–17, 2017. Part 1]. Ufa, BSAU Publ., 2017, pp. 65–69.
6. Novosel'tseva I.F. Lesa Chitinskoy oblasti [Forests of Chita Region]. *Lesa SSSR: v 5 t. T. 4. Lesa Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Forests of the USSR: In 5 Vol. Vol. 4. Forests of the Urals, Siberia and the Far East]. Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 438–468.
7. Obyazov V.A. *Izmeneniya sovremennoy klimata i otsenka ikh posledstviy dlya prirodnykh i prirodno-antropogennykh sistem Zabaykal'ya*: avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk [Changes in the Current Climate and Assessment of Their Consequences for the Natural and Natural-Anthropogenic Systems of Transbaikal: Dr. Geogr. Sci. Diss. Abs.]. Kazan, 2014. 38 p.
8. Panarin I.I. *Lesy Chitinskogo Zabaykal'ya* [Forests of Chita Transbaikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 232 p. (In Russ.)
9. *Predbaykal'ye i Zabaykal'ye* [Cisbaikal and Transbaikal]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 492 p. (In Russ.)
10. Sergiyenko V.G., Ivanov A.M., Vlasov R.V., Antonov O.I. Drevesnyy opad i bioraznoobrazie na uchastkakh vyborochnykh rubok Leningradskoy oblasti [Tree Fall and Biodiversity in the Areas of Selective Cuttings of the Leningrad Region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute]. 2015, no. 3, pp. 4–19.
11. Bouchard M., Pothier D. Long-Term Influence of Fire and Harvesting on Boreal Forest Age Structure and Forest Composition in Eastern Québec. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 261, iss. 4, pp. 811–820. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.11.020
12. Hansen A.J., Spies T.A., Swanson F.J., Ohmann J.L. Conserving Biodiversity in Managed Forests: Lessons from Natural Forests. *BioScience*, 1991, vol. 41, iss. 6, pp. 382–392. DOI: 10.2307/1311745
13. Lavoie L., Sirois L. Vegetation Changes Caused by Recent Fires in the Northern Boreal Forest of Eastern Canada. *Journal of Vegetation Science*, 1998, vol. 9, no. 4, pp. 483–492. DOI: 10.2307/3237263
14. Schaich H., Milad M. Forest Biodiversity in a Changing Climate: Which Logic for Conservation Strategies? *Biodiversity and Conservation*, 2013, vol. 22, iss. 5, pp. 1107–1114. DOI: 10.1007/s10531-013-0491-7
15. Venier L.A., Thompson I.D., Fleming R., Malcolm J., Aubin I., Trofymow J.A., Langor D., Sturrock R., Patry C., Outerbridge R.O., Holmes S.B., Haeussler S., De Grandpré L., Chen H.Y.H., Bayne E., Arseneault A., Brandt J.P. Effects of Natural Resource Development on the Terrestrial Biodiversity of Canadian Boreal Forests. *Environmental Reviews*, 2014, vol. 22(4), pp. 457–490. DOI: 10.1139/er-2013-0075

Received on April 04, 2018

УДК 630\*181

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.87

## ГЛУБИНЫ ЗИМНЕГО ПОКОЯ ДРЕВЕСНЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА *FABACEAE* LINDL., ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

*Е.И. Захарова, канд. биол. наук*

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

Холодовая акклиматизация – сложный процесс, который включает в себя обширную модификацию растительного метаболизма. Осенью древесные растения умеренных широт проходят своеобразную подготовку к зимним условиям, благодаря чему становятся более толерантными к отрицательным температурам. Максимальной морозоустойчивости растения достигают в середине зимы, тогда как при повышении температуры весной теряют акклиматизированную устойчивость к замораживанию путем деакклиматизации. Одним из показателей адаптированности растений к новым условиям произрастания является их способность динамично переходить в состояние покоя и выходить из него при определенных изменениях внешних условий. Цель исследования – изучение глубины зимнего покоя у некоторых древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. (*Robinia pseudoacacia* L., *Amorpha fruticosa* L., *Caragana arborescens* Lam.) в условиях Нижегородской области. Для достижения поставленной цели нами применялся метод регистрации термоиндуцированных изменений внешних условий. Экспериментальный материал был представлен 1-летними побегами изучаемых видов, заготавливаемыми в условиях центральной части Нижегородской области. Исследования проводили с ноября по февраль в течение 5 лет. После срезки побеги помещали в емкости с водой в лабораторных условиях при температуре 20 °С. Ежедневно контролировали фенологическое состояние побегов и температурный режим. Проведенные исследования показали, что сроки прерывания периода покоя у изученных интродуцентов существенно влияют на переход к активному метаболизму. Выявлено, что при установлении стабильных отрицательных температур воздуха в зимний период изучаемые объекты формируют высокую толерантность к замораживанию. Это подтверждается тем, что при искусственном прерывании периода покоя и форсировании потепления с ноября по февраль объектам требуется значительная сумма активных температур для перехода к метаболизму. *Caragana arborescens* Lam. выходит из состояния зимнего покоя при сумме активных температур от 87 до 136 °С (в зависимости от календарных сроков прерывания периода покоя), что соответствует 5...7 дн. нахождения в тепле при средней температуре окружающей среды 24...25 °С. *Amorpha fruticosa* L. переходит к активному метаболизму при сумме активных температур от 255 до 378 °С, *Robinia pseudoacacia* L. – от 198 до 476 °С. Данные, полученные в ходе исследования, дополняют основные положения факториальной экологии демонстрацией адаптаций древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. и могут быть использованы для предварительной оценки перспективности их широкого культивирования в Нижегородской области.

*Ключевые слова:* фенология, зимостойкость, состояние покоя, толерантность, *Caragana arborescens* Lam., *Amorpha fruticosa* L., *Robinia pseudoacacia* L.

---

*Для цитирования:* Захарова Е.И. Глубины зимнего покоя древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl., интродуцированных в Нижегородской области // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 87–95. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.87

### Введение

Внедрение древесных видов семейства *Fabaceae* Lindl. в насаждения различного целевого назначения на урбанизированных территориях Нижегородской области, имеющих малоценные земли с бедными песчаными почвами, будет широко использоваться на практике. Большинство видов декоративны, неприхотливы к почве, отличаются высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям городской среды, а представители подсемейства *Faboideae* способны решить одну из важнейших проблем в области сельскохозяйственной биологии – биологической фиксации атмосферного азота.

Единственной причиной, способной ограничить использование древесных видов семейства *Fabaceae* Lindl. в Нижегородской области, является их зимостойкость. Исследования показывают, что растения, рано заканчивающие ростовые процессы, своевременно входящие в состояние покоя и проходящие закаливание, отличаются высокой зимостойкостью [3].

Одним из аспектов сохранения жизнеспособности растений, произрастающих в умеренных широтах, служит их способность входить в состояние покоя в период пониженных температур. Покой определяется как неспособность иницировать рост из меристем (и других органов и клеток, способных возобновить рост) при благоприятных условиях [11, 14]. Глубина покоя – скорость реакции растения на температурное воздействие – зависит от напряженности действующего фактора (интенсивности и продолжительности), генетически обусловленной устойчивости и состояния растения. Физиологическое значение покоя заключается в приспособлении к периодическому наступлению неблагоприятных внешних условий, защите от обезвоживания [4]. У растений различают вынужденный покой, обусловленный факторами внешней среды, и физиологический (органический, глубокий) покой, который регулируется балансом стимуляторов и ингибиторов роста [12, 15]. При вступлении растений в период покоя происходят процессы, повышающие устойчивость их клеток к неблагоприятным факторам среды.

Глубина периода покоя значительно влияет на реакцию растений к изменению температурных факторов среды [5, 8, 18]. Особый интерес изучение данного процесса представляет при интродукции растений. Нередко колебания температур в зимний период в районе интродукции приводят к снижению адаптационных свойств растений. Экспериментальные исследования показывают, что положительные температуры в осенне-зимний период могут замедлять выход растений из состояния покоя весной, задерживая прохождение фенологических фаз [13, 16].

Цель исследования – изучение глубины зимнего покоя у некоторых древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. в условиях Нижегородской области.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили древесные виды семейства *Fabaceae* Lindl. подсемейства *Faboideae*, выращенные в условиях центральной части Нижегородской области: *Robinia pseudoacacia* L., *Amorpha fruticosa* L., *Caragana arborescens* Lam.

Климат района исследования умеренно-континентальный, с годовыми колебаниями температуры 79,4 °С и количеством осадков 600...700 мм. Переход среднесуточных температур воздуха через 0 °С в сторону повышения происходит почти одновременно по всей области в начале апреля. Сход снежного покрова приходится на середину–конец апреля. Вегетационный период

начинается с середины апреля, продолжается 165...175 дн. и практически совпадает с продолжительностью вегетационного периода *Robinia pseudoacacia* L. (178±14 дн.), *Caragana arborescens* Lam. (165±8 дн.) и *Amorpha fruticosa* L. (185±11 дн.). Устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через 0 °С в сторону понижения происходит в начале ноября. Абсолютные минимальные температуры воздуха в зимние месяцы достигают –42 °С. В течение зимних месяцев температура может иметь и положительные значения – до +8 °С, продолжительность оттепелей – до 5...7 дн.

Для изучения длительности и глубины состояния покоя у интродуцированных растений применялся метод регистрации термоиндуцированных изменений внешних условий. В качестве экспериментальной единицы использовались 1-летние побеги изучаемых объектов. Исследования зимнего покоя, проводимые рядом авторов, указывают на возможность применения побегов, заготовленных с растений, подвергшихся воздействию отрицательных температур, для изучения глубины покоя. При этом замечено, что ответные реакции срезанных побегов совпадают с таковыми у целых растений [9, 10].

Для опытов 1-летние побеги изучаемых интродуцентов заготавливались в несколько сроков (с ноября по февраль) с периферии среднего яруса хорошо освещенного участка кроны [7]. Исследования проводились в течение 5 лет. Побеги были максимально идентичны друг другу. Каждый из изучаемых видов в эмпирических исследованиях был представлен не менее чем 3 побегами не менее чем с 3 учетных растений. В лаборатории побеги находились в одинаковых условиях (в частично светопрозрачном помещении), они помещались в емкости с водой. Таким образом был реализован принцип единственного логического различия между изучаемыми объектами [11]. Наблюдения за состоянием побегов и температурой в помещении осуществлялись ежедневно. Учитывались следующие показатели: количественные – количество календарных дней с момента начала опыта до фиксируемого изменения фенологического состояния, сумма активных температур за тот же период; качественные – наступление фенологических фаз [1, 2, 6, 17], фенологические состояния побегов (набухание вегетативных почек – начало отхождения кроющих чешуй почек), отрастание побегов (начало удлинения верхушечной части почки).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Способность побегов выходить из состояния зимнего покоя при его искусственном прерывании демонстрировали все изучаемые виды независимо от календарных сроков форсирования потепления. Средние данные, полученные в ходе 5-летних исследований (по месяцам), показывают, что рассматриваемые интродуценты неодинаково реагируют на повышение температуры в зимний период (рис. 1–4).

Наиболее глубоким покоем в начале зимы характеризуется *Robinia pseudoacacia* L. (рис. 1). Для выхода из состояния покоя побегам данного вида потребовалась сумма активных температур ( $\Sigma t > +5$  °С), равная 476 °С, что соответствовало содержанию при средней температуре окружающей среды 25 °С в течение 24 дн. У *Caragana arborescens* Lam. набухание зимующих почек произошло на 7-й день, что соответствовало сумме активных температур, равной 136 °С. Форсирование потепления в ноябре вызвало набухание почек *Amorpha fruticosa* L. в среднем на 13-й день, или при сумме активных температур 259 °С.

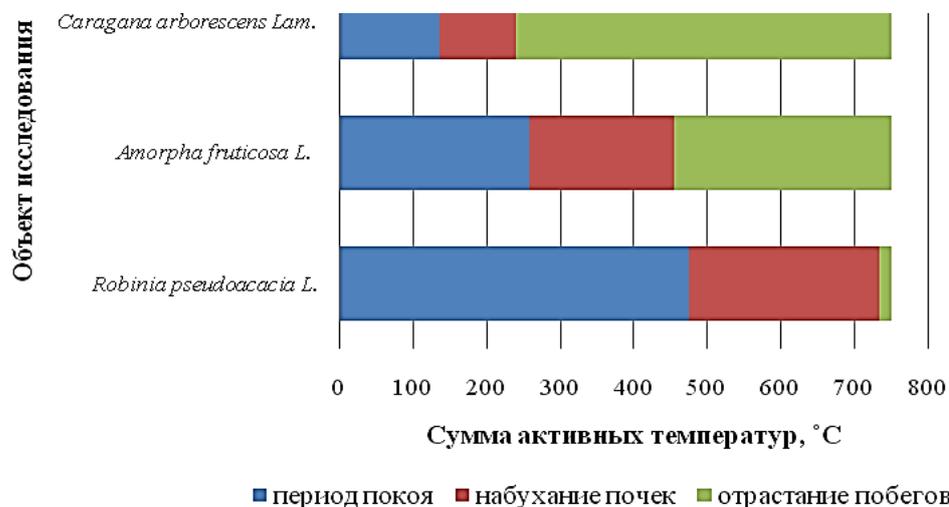


Рис. 1. Феноспектры выхода побегов древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. из состояния покоя (прерывание покоя в ноябре)

Fig. 1. Phenological spectra of shoot yield of *Fabaceae* Lindl. family woody species out of dormancy (dormancy interruption in November)

Для перехода в следующую фенологическую фазу – отрастание побегов, *Robinia pseudoacacia* L. потребовалась сумма активных температур в 735 °С, или 37 дн. с момента начала опыта; *Caragana arborescens* Lam. – 240 °С, или 12 дн.; *Amorpha fruticosa* L. – 455 °С, или 23 дн.

При прерывании периода покоя в декабре (рис. 2) зимующим почкам *Robinia pseudoacacia* L. для перехода к активному метаболизму потребовалась

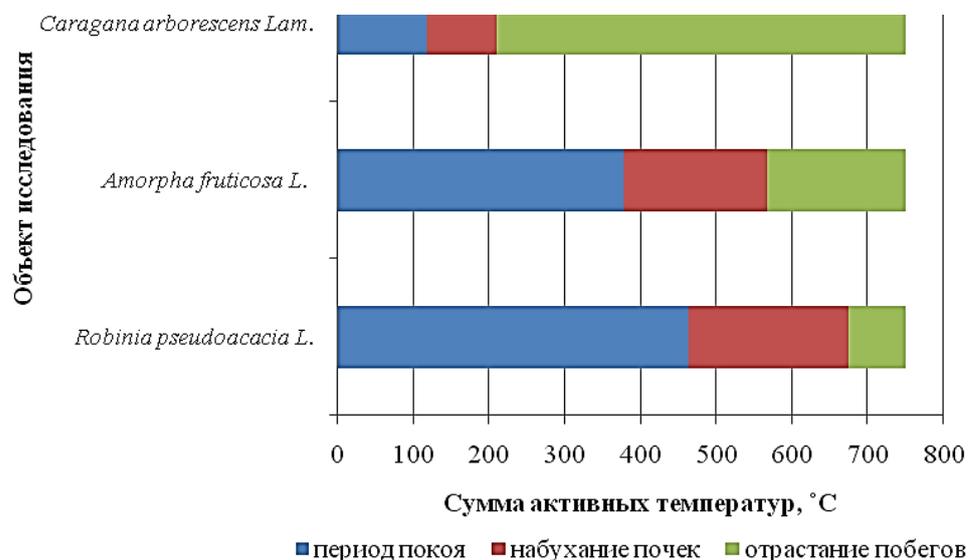


Рис. 2. Феноспектры выхода побегов древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. из состояния покоя (прерывание покоя в декабре)

Fig. 2. Phenological spectra of shoot yield of *Fabaceae* Lindl. family woody species out of dormancy (dormancy interruption in December)

сумма активных температур в 464 °С, или 24 дн. при средней температуре воздуха 24 °С; *Caragana arborescens* Lam. – соответственно 119 °С, что на 17 °С меньше, чем при прерывании зимнего покоя в ноябре; *Amorpha fruticosa* L. – соответственно 378 °С, что на 119 °С больше чем в начале зимы, или 14 дн.

При прерывании периода покоя в декабре отрастание побегов у *Robinia pseudoacacia* L. отмечалось на 36-й день от даты начала наблюдений (сумма активных температур 675 °С); у *Caragana arborescens* Lam. – на 9-й день (211 °С); у *Amorpha fruticosa* L. – на 26-й день (568 °С).

Прерывание периода покоя в январе и феврале имело тенденции к сокращению количества дней (суммы активных температур) для достижения фиксируемых фенологических фаз у всех изучаемых объектов.

Так, при прерывании покоя в январе (рис. 3) *Robinia pseudoacacia* L. для набухания почек потребовалась сумма активных температур 396 °С, или 21 дн. при средней температуре окружающей среды 24 °С, а для отрастания побегов – 608 °С, или 34 дн. Вегетативные почки *Caragana arborescens* Lam. начали набухать при сумме активных температур 87 °С, или на 6-й день; *Amorpha fruticosa* L. – соответственно – 353 °С, или на 13-й день.

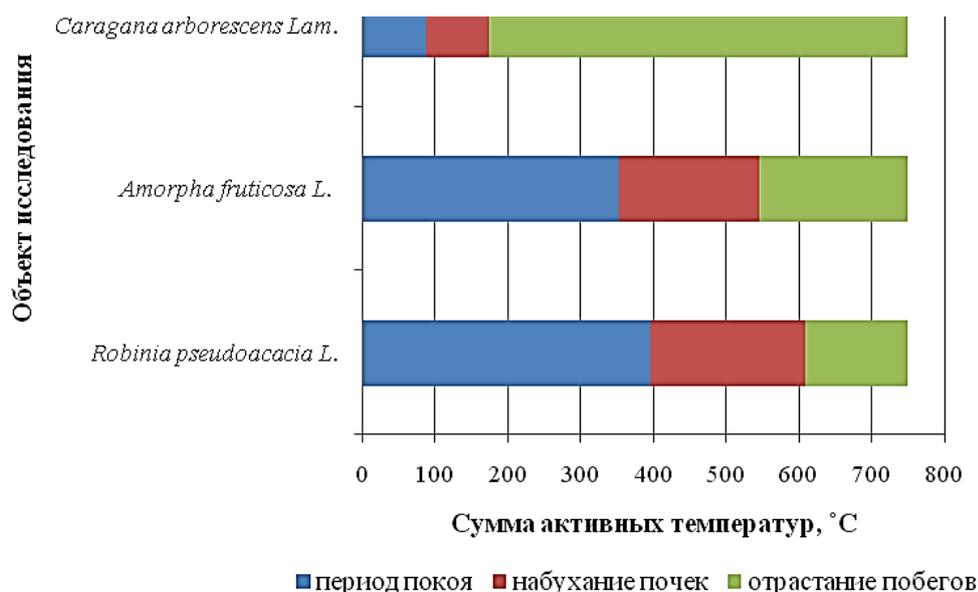


Рис. 3. Феноспектры выхода побегов древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. из состояния покоя (прерывание покоя в январе)

Fig. 3. Phenological spectra of shoot yield of *Fabaceae* Lindl. family woody species out of dormancy (dormancy interruption in January)

При исследовании степени глубины покоя у изучаемых видов было выявлено, что скорость пробуждения их зимующих почек прямо пропорциональна глубине органического покоя. В начале зимы, когда глубина покоя максимальна, почкам нужна большая сумма активных температур для прохождения соответствующих фенофаз, а в конце зимы, когда глубина покоя снижена, им требуется меньшая сумма активных температур (рис. 4).

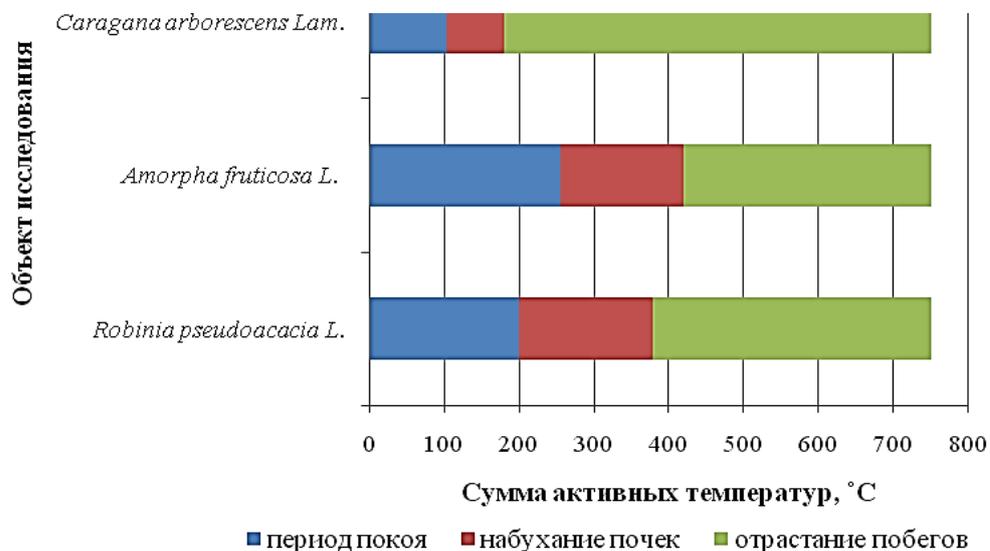


Рис. 4. Феноспектры выхода побегов древесных представителей семейства *Fabaceae* Lindl. из состояния покоя (прерывание покоя в феврале)

Fig. 4. Phenological spectra of shoot yield of *Fabaceae* Lindl. family woody species out of dormancy (dormancy interruption in February)

Однако отмечено, что на выход растений из состояния зимнего покоя, кроме температурных показателей, влияет и фотопериод. Фотопериодическая реакция растений на выход из состояния зимнего покоя обусловлена увеличением продолжительности светового дня, а вступление растений в состояние покоя зависит от его сокращения. Так, наибольшую глубину зимнего покоя изучаемые виды демонстрируют в декабре–январе, когда продолжительность светлого времени суток минимальна (средняя долгота дня 7 ч 07 мин), наименьшую – в феврале (9 ч 38 мин).

#### Заключение

Установлено, что в условиях интродукции Нижегородской области для изученных нами видов характерно нахождение в состоянии органического покоя в течение всей зимы. Это является положительной адаптацией, поскольку при появлении кратковременных оттепелей в зимний период почки данных растений не трогаются в рост и не испытывают неблагоприятного воздействия при последующем снижении температуры. Наименьшую способность инициировать ростовые процессы при благоприятных условиях изученные древесные виды проявляют в конце осени–начале зимы; показатель глубины покоя в этот период в 1,5–2,5 раза выше, чем в конце зимы. Повреждения у древесных видов в условиях Нижегородской области вызываются ранними осенними или весенними заморозками, когда растения еще не вошли в состояние зимнего покоя или уже вышли из него. Данное обстоятельство можно скорректировать, используя агротехнические приемы повышения морозостойкости, например внесением удобрений в предзимний период.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейдеман И.Н. Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ. Новосибирск: Наука, 1974. 156 с.
2. Иваненко Б.И. Фенология древесных и кустарниковых пород. М.: Изд-во с.-х. лит., 1962. 184 с.
3. Кищенко И.Т. Сезонный рост и развитие *Juniperus communis* L. в таежной зоне // Лесн. журн. 2017. № 3. С. 31–39. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.31
4. Лебедева В.П., Сорокина Г.А., Гаевский Н.А. Применение флуоресцентных методов в фитоиндикации // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сб. науч. ст. по материалам XV междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 23–26 мая 2016 г.). Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2016. С. 480–485.
5. Либберт Э. Физиология растений. М.: Мир, 1976. 582 с.
6. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР // Методики интродукционных исследований в Казахстане. Алма-Ата: Наука, 1987. С. 4–10.
7. Прохоров И.А., Потапов С.П. Практикум по селекции и семеноводству овощных и плодовых культур. М.: Колос, 1975. 304 с.
8. Радченко С.И. Температурные градиенты среды и растения. М.; Л.: Наука, 1966. 390 с.
9. Arias O., Crabbe J. Les gradients morphogenetiques du rameau dun an des vegetaux ligneux en repos apparent. Donnees complementaires fournies par letude de *Prunus avium* L. // *Physiol.* 1975. Vol. 13. Pp. 69–81.
10. Arora R., Rowland L.J., Tanino K. Induction and Release of Bud Dormancy in Woody Perennials: A Science Comes of Age // *HortScience*. 2003. Vol. 38(5). Pp. 911–921.
11. Dennis F.G.Jr. Problems in Standardizing Methods for Evaluating the Chilling Requirements for the Breaking of Dormancy in Buds of Woody Plants // *HortScience*. 2003. Vol. 38(3). Pp. 347–350.
12. Longstroth M. Winter Dormancy and Chilling in Woody Plants / Michigan State University Extension. 2013. Режим доступа: Available at: [https://www.canr.msu.edu/news/winter\\_dormancy\\_and\\_chilling\\_in\\_woody\\_plants](https://www.canr.msu.edu/news/winter_dormancy_and_chilling_in_woody_plants) (дата обращения: 16.01.2013).
13. Luedeling E., Girvetz E.H., Semenov M.A., Brown P.H. Climate Change Affects Winter Chill for Temperate Fruit and Nut Trees // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6(5), article no. e20155. Pp. 1–13. DOI: 10.1371/journal.pone.0020155
14. Marafon A.C., Citadin I., do Amarante L., Herter F.G., Hawerroth F.J. Chilling Privation during Dormancy Period and Carbohydrate Mobilization in Japanese Pear Trees // *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 2011. Vol. 68, no. 4. Pp. 462–468.
15. Pagter M., Andersen U.B., Andersen L. Winter Warming Delays Dormancy Release, Advances Budburst, Alters Carbohydrate Metabolism and Reduces Yield in a Temperate Shrub // *AoB Plants*. 2015. Vol. 7, article no. plv024. Pp. 1–15. DOI: 10.1093/aobpla/plv024
16. Pletsers A., Caffarra A., Kelleher C.T., Donnelly A. Chilling Temperature and Photoperiod Influence the Timing of Bud Burst in Juvenile *Betula pubescens* Ehrh. and *Populus tremula* L. Trees // *Annals of Forest Science*. 2015. Vol. 72, iss. 7. Pp. 941–953. DOI: 10.1007/s13595-015-0491-8
17. Saure M.C. Dormancy Release in Deciduous Fruit Trees // *Horticultural Reviews*: Vol. 7 / ed. by J. Janick. Westport, CT: Avi Publishing Company, Inc., 1985. Pp. 239–300. (In Eng.)
18. Way D.A. Tree Phenology Responses to Warming: Spring Forward, Fall Back? // *Tree Physiology*. 2011. Vol. 31, iss. 5. Pp. 469–471. DOI: 10.1093/treephys/tpr044

UDC 630\*181

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.87

**Winter Dormancy Depths in Some Woody Species of the *Fabaceae* Lindl. Family Introduced in Nizhny Novgorod Region***E.I. Zakharova, Candidate of Biological Sciences*

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

Cold acclimatization is a complex process that involves extensive modification of plant metabolism. Woody plants of temperate latitudes undergo a kind of preparation for winter conditions in autumn; as a result they become more tolerant to negative temperatures. Plants reach the maximum frost hardiness in the middle of winter, while they lose the acclimatization hardiness by deacclimatization with the increase of temperature in spring. One of the indicators of plant adaptation to the new growth conditions is their ability to dynamically move into a state of dormancy and leave it under the certain changes of external conditions. The research purpose was to study winter dormancy depth in some woody species of the *Fabaceae* Lindl. family (*Robinia pseudoacacia* L., *Amorpha fruticosa* L., *Caragana arborescens* Lam.) in Nizhny Novgorod region. We used detection method of thermally-induced environmental changes to achieve this purpose. The experiment material was represented by annual shoots of the studied species harvested in the central part of Nizhny Novgorod region. The studies were being carried out from November to February for 5 years. After cutting, the shoots were transferred to laboratory conditions ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), where they were placed in the containers with water. The phenological state of shoots and temperature mode were daily recorded. The studies have shown that the interruption timeframe of dormancy significantly influence the transition of the studied introduced species to active metabolism. It was found that, when the steady negative air temperatures are established in winter, the studied objects form high frost hardiness. This is confirmed by the fact that with the artificial interruption of dormancy and warming acceleration from November to February the objects require a significant amount of active temperatures for transition to metabolism. *Caragana arborescens* Lam. leaves winter dormancy under growing degree-day of 87...136  $^{\circ}\text{C}$  (depending on the calendar periods of dormancy interruption) that is equivalent to 5...7 days of being in warm conditions at an average ambient temperature from 24 to 25  $^{\circ}\text{C}$ . *Amorpha fruticosa* L. turns to active metabolism in growing degree-day of 255...378  $^{\circ}\text{C}$ ; the same happens with *Robinia pseudoacacia* L. under 198...476  $^{\circ}\text{C}$ . The data obtained during the research update the fundamental principles of factorial ecology through the demonstration of woody species adaptations of the *Fabaceae* Lindl. family. They can be used for perspective preliminary assessment of their wide cultivation in Nizhny Novgorod region.

*Keywords:* phenology, hardiness, dormancy, tolerance, *Caragana arborescens* Lam., *Amorpha fruticosa* L., *Robinia pseudoacacia* L.

## REFERENCES

1. Beydeman I.N. *Metodika izucheniya fenologii rasteniy i rastitel'nykh soobshchestv* [Methodology for the Study of Phenology of Plants and Plant Communities]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974. 156 p. (In Russ.)
2. Ivanenko B.I. *Fenologiya drevesnykh i kustarnikovykh porod* [Phenology of Tree and Shrub Species]. Moscow, Izdatel'stvo sel'skokhozyaystvennoy literatury, 1962. 184 p. (In Russ.)

*For citation:* Zakharova E.I. Winter Dormancy Depths in Some Woody Species of the *Fabaceae* Lindl. Family Introduced in Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 87–95. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.1.87

3. Kishchenko I.T. Sezonnyy rost i razvitiye *Juniperus sommunis* L. v tayezhnoy zone [Seasonal Growth and Development of *Juniperus communis* L. in the Taiga Zone]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2017, no. 3, pp. 31–39. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.31
4. Lebedeva V.P., Sorokina G.A., Gayevskiy N.A. Primeneniye fluorestsentnykh metodov v fitoindikatsii [The Use of Fluorescent Methods in Phytoindication]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii: sb. nauch. st. po materialam XV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Barnaul, 23–26 maya 2016 g.)* [Problems of Botany in Southern Siberia and Mongolia: A Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the 15<sup>th</sup> Int. Sci. and Pract. Conf.]. Barnaul, ASU Publ., 2016, pp. 480–485.
5. Libbert E. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology]. Moscow, Mir Publ., 1976. 582 p. (In Russ.)
6. Metodika fenologicheskikh nablyudeniy v botanicheskikh sadakh SSSR [Technique of Phenological Observing in Botanical Gardens of the USSR]. *Metodiki introduktsionnykh issledovaniy v Kazakhstane* [Techniques of Introduction Research in Kazakhstan]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1987, pp. 4–10. (In Russ.)
7. Prokhorov I.A., Potapov S.P. *Praktikum po seleksii i semenovodstvu ovoshchnykh i plodovykh kul'tur* [Workshop on Selection and Seed Production of Vegetable and Fruit Crops]. Moscow, Kolos Publ., 1975. 304 p. (In Russ.)
8. Radchenko S.I. *Temperaturnyye gradiyenty sredy i rasteniya* [Temperature Gradients of the Environment and Plant]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 390 p. (In Russ.)
9. Arias O., Crabbe J. Les gradients morphogenetiques du rameau dun an des vegetaux ligneux en repos apparent. Donnees complementaires fournies par letude de *Prunus avium* L. *Physiol.*, 1975, vol. 13, pp. 69–81.
10. Arora R., Rowland L.J., Tanino K. Induction and Release of Bud Dormancy in Woody Perennials: A Science Comes of Age. *HortScience*, 2003, vol. 38(5), pp. 911–921.
11. Dennis F.G.Jr. Problems in Standardizing Methods for Evaluating the Chilling Requirements for the Breaking of Dormancy in Buds of Woody Plants. *HortScience*, 2003, vol. 38(3), pp. 347–350.
12. Longstroth M. *Winter Dormancy and Chilling in Woody Plants*. Michigan State University Extension. 2013. Available at: [https://www.canr.msu.edu/news/winter\\_dormancy\\_and\\_chilling\\_in\\_woody\\_plants](https://www.canr.msu.edu/news/winter_dormancy_and_chilling_in_woody_plants) (accessed 16.01.2013).
13. Luedeling E., Girvetz E.H., Semenov M.A., Brown P.H. Climate Change Affects Winter Chill for Temperate Fruit and Nut Trees. *PLoS ONE*, 2011, vol. 6(5), article no. e20155, pp. 1–13. DOI: 10.1371/journal.pone.0020155
14. Marafon A.C., Citadin I., do Amarante L., Herter F.G., Hawerth F.J. Chilling Privation during Dormancy Period and Carbohydrate Mobilization in Japanese Pear Trees. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 2011, vol. 68, no. 4, pp. 462–468.
15. Pagter M., Andersen U.B., Andersen L. Winter Warming Delays Dormancy Release, Advances Budburst, Alters Carbohydrate Metabolism and Reduces Yield in a Temperate Shrub. *AoB Plants*, 2015, vol. 7, article no. plv024, pp. 1–15. DOI: 10.1093/aobpla/plv024
16. Pletsers A., Caffarra A., Kelleher C.T., Donnelly A. Chilling Temperature and Photoperiod Influence the Timing of Bud Burst in Juvenile *Betula pubescens* Ehrh. and *Populus tremula* L. Trees. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, iss. 7, pp. 941–953. DOI: 10.1007/s13595-015-0491-8
17. Saure M.C. Dormancy Release in Deciduous Fruit Trees. *Horticultural Reviews: Volume 7*. Ed. by J. Janick, Westport, CT, Avi Publishing Company, Inc., 1985, pp. 239–300.
18. Way D.A. Tree Phenology Responses to Warming: Spring Forward, Fall Back? *Tree Physiology*, 2011, vol. 31, iss. 5, pp. 469–471. DOI: 10.1093/treephys/tpr044

Received on May 14, 2018

УДК 630\*8

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.96

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ СОСНОВОЙ ЖИВИЦЫ НА МЕСТАХ ЕЕ ЗАГОТОВКИ\*

*А.И. Горкин, канд. с.-х. наук*

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

Промышленная заготовка сосновой живицы в Российской Федерации почти полностью прекратилась. Для восстановления утраченных позиций необходимо решить следующие вопросы: создание производственных мощностей по переработке сосновой живицы на местах ее добычи; вовлечение в процесс заготовки живицы лесных участков, находящихся в аренде по другим видам лесопользования; создание логистических схем для реализации живицы и продуктов ее переработки. Данное исследование посвящено созданию такой технологии переработки сосновой живицы, которую можно было бы использовать на производственной базе хозяйствующего субъекта. В результате анализа выявлены основные особенности технологического цикла переработки живицы, что было учтено в разрабатываемой технологии. Эксперименты проводились на опытном оборудовании. Технологический процесс состоял из стадий очистки живицы от примесей и ее переработки. Полученные канифоль и скипидар имели показатели качества, соответствующие существующим нормам. В технологической схеме использовали две нагревающиеся поверхности и холодильную установку. Одна из поверхностей выполняла функцию плавильника, с помощью второй (канифолеварочной) поверхности и холодильной установки получали канифоль и скипидар. Важным аспектом разработанной технологии являются температурные режимы и применяемые способы очистки получаемых продуктов от органических и минеральных примесей. Установлено, что при использовании промышленной установки, имеющей площадь канифолеварочной части 2 м<sup>2</sup>, можно переработать 35 т живицы за 6 мес., т. е. за сезон подсочки. Изготовление такого оборудования не представляет большой сложности, а габаритные размеры позволяют применять его на небольших предприятиях.

*Ключевые слова:* заготовка живицы, подсочка, канифоль, скипидар, технология переработки живицы.

### *Введение*

Одним из видов лесопользования, разрешенных в Российской Федерации, является заготовка живицы. Согласно данным П.И. Лукьянова [7], впервые осуществлять подсочку деревьев сосны и перерабатывать живицу стали в XVIII в. на севере России, в Вельском округе Вологодского наместничества. Уже в 1867 г. на всемирной выставке в Париже купец Лагунов из Шенкурска экспонировал различные сорта скипидара, а крестьянин Ананьин из Архангельского уезда Рикасовской волости – высшие сорта скипидара (серный, полученный из сосновой серы; печной, полученный при переработке древесины в печях; смольный, полученный при переработке смолы в пек). Заводчик

---

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Архангельской области в рамках научного проекта № 16-12-29003 «Экономическое обоснование восстановления заготовки живицы в объемах промышленной подсочки в контексте обеспечения устойчивого развития лесов Архангельской области».

*Для цитирования:* Горкин А.И. О возможности переработки сосновой живицы на местах ее заготовки // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 96–105. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.96

Чудинов представил канифоль, выработанную на его заводе, находившемся близ г. Вельска. Вельское лесничество демонстрировало белый (серный) скипидар.

В дальнейшем лесохимическое производство развивалось быстрыми темпами. Наибольшие показатели были достигнуты в 80-е годы XX в. В этот период в СССР подсочка ежегодно проводилась на площади 1,3 млн га, заготавливалось около 145 тыс. т живицы [9], в том числе в Архангельской области в подсочку вовлекались сосновые древостои на площади более 80 тыс. га с объемом заготовки до 3,7 тыс. т.<sup>1</sup>

Переработка живицы осуществлялась на лесохимических заводах. В европейской части России такие заводы находились в Вологде, Тихвине и Нижнем Новгороде. В процессе переработки из сосновой живицы получали два основных лесохимических продукта – сосновую канифоль и живичный скипидар. Там же на заводах производили модифицированные виды канифоли, удовлетворявшие требованиям различных потребителей к ее качеству, а также выпускали лакокрасочную продукцию на основе канифоли и скипидара. На протяжении почти всего советского периода данная технологическая цепочка успешно функционировала на крупных лесохимических заводах. С переходом российской экономики на рыночные отношения производственные связи по заготовке и переработке живицы разрушились. Основными причинами подобной ситуации стали падение спроса на живичную канифоль российского производства, вызванное экспортом более дешевой продукции из Китая, и замещение живичной канифоли на талловую, которую получают при варке целлюлозы на целлюлозно-бумажных предприятиях [8].

Кроме того, Россия почти лишилась сырьевой базы для осуществления работ по подсочке. В Лесном кодексе Российской Федерации не прописаны механизмы вовлечения в подсочку лесных участков, взятых в аренду для целей заготовки древесины. По этой причине взять в аренду лесной участок для целей заготовки живицы достаточно проблематично. На сегодняшний день в стране практически не осталось предприятий, осуществляющих заготовку сосновой живицы. Например, в 2017 г. в Архангельской области этим занимались всего 2 хозяйствующих субъекта с общим объемом заготовки около 2 т. В результате чего лесохимические заводы, не имея сырья, или прекратили свое существование, или перепрофилировали технологические линии на получение продукции на основе талловой канифоли. Законсервированные мощности этих заводов не могут быть использованы при переработке живицы, добываемой малыми партиями. Полноценную переработку сосновой живицы осуществляет только завод «Лесохимик», расположенный в г. Борисов (Республика Беларусь).

По сути, в данной отрасли возникла нулевая исходная позиция, поэтому для возобновления подсочного производства необходимо решить ряд конкретных вопросов:

экономическое обоснование вовлечения в промышленную подсочку того или иного лесного участка;

создание производственных мощностей по переработке сосновой живицы, способных удовлетворять потребности хозяйствующих субъектов, осуществляющих ее заготовку;

---

<sup>1</sup>Производственно-технические отчеты по подсочным и осмолподсочным работам по предприятиям треста «Арххимлес» за 1965, 1967–1969, 1972, 1982, 1983 гг.

вовлечение лесных участков, находящихся в аренде по другим видам лесопользования, в заготовку живицы;

создание логистических схем реализации сосновой живицы и продуктов ее переработки.

Вариант прекращения всяческих попыток восстановить утерянные позиции неприемлем при наличии огромных запасов лесных ресурсов, потребностей российских производственных предприятий в канифоли и скипидаре и в плане решения актуальных на сегодняшний день вопросов импортозамещения [5].

Необходимо отметить, что кроме известных способов применения сосновой канифоли [11], рассматриваются варианты использования данного продукта в медицине [12] и в производстве других видов продукции [10].

Перед нами стояла задача разработать технологию, которая была бы приемлема для условий небольших предприятий по переработке сосновой живицы на канифоль и скипидар с использованием малогабаритного оборудования.

Технологию переработки живицы, применявшуюся на ранее действующих лесохимических заводах, можно считать совершенной. Технологический процесс разделялся на две стадии: очистка живицы от примесей и воды, перегонка живицы.

По своему химическому составу живица представляет собой раствор смоляных кислот с общей формулой  $C_{20}H_{30}O_2$  в терпеновых углеводородах [6].

Твердые посторонние примеси в живице подразделяются на органические (хвоя, кусочки коры, насекомые и т. д.) и минеральные (мелкие частицы пыли и песка). Мелкий сор представляет главную часть примесей, находящихся во взвешенном состоянии в живице. При плохой ее очистке они попадают в готовую канифоль, значительно снижая ее качество. Для отделения примесей густую живицу разогревают в специальном плавильнике с использованием перегретого пара, при этом ее вязкость значительно уменьшается. Органические примеси могут быть отделены от расплавленной живицы простым фильтрованием, вода – отстаиванием. Обычно обе эти операции применяют последовательно [1].

В процессе плавления для повышения плотности живицы и лучшего отстаивания добавляются скипидар и поваренная соль: на 1 т живицы требуется 20...100 кг скипидара и 15...20 кг соли. Если живица хранится в железных бочках, то добавляется еще 20...40 кг суперфосфатной вытяжки, которая необходима для осветления живицы, окислившейся от соприкосновения с железом. Если довести содержание скипидара до 40 %, то в процессе плавления можно обойтись без поваренной соли, так как в этом случае получается достаточная разность плотностей воды и живицы, кроме того, вязкость последней понижается. Расплавленная живица отфильтровывается от органических примесей через ложное дно плавильника и поступает в отстойники, где отстаивается 95...98 % воды и большая часть минеральных примесей [6].

Проанализировав особенности технологического цикла очистки живицы от примесей и воды, отметим следующее:

живица нагревается в плавильниках, чтобы создать условия для ее очистки;

живица от органических примесей очищается фильтрованием, от минеральных примесей и воды – отстаиванием;

хранение живицы в железной бочкотаре приводит к ее окислению и дополнительным затратам на осветление.

Перегонка живицы производится двумя способами: периодическим – в кубах, непрерывным – в канифолеварочных колоннах. Первый способ, имеющий отдельные недостатки, нет необходимости анализировать.

Колонны для перегонки живицы представляют собой непрерывно действующие аппараты, в которых расплавленная и очищенная от примесей живица движется сверху вниз, ей навстречу снизу подается острый пар. Летучие терпеновые углеводороды извлекаются из расплавленной живицы под воздействием пара и по направлению его движения попадают в холодильник. Образовавшийся в холодильнике конденсат стекает во флорентину, где он разделяется на скипидар и воду. Входящие в состав сосновой живицы смоляные кислоты плавятся и образуют канифоль.

Технологический процесс переработки живицы имеет температурные ограничения. Исходная живица, очищенная от воды и сора, начинает кипеть при температуре  $t = 179$  °С. По мере отгонки летучих веществ температура быстро повышается, и при  $t \geq 220$  °С начинается разложение канифоли, что отрицательно сказывается на ее качестве. Таким образом, для предотвращения разложения канифоли при перегонке необходимо регулировать температурный режим.

Образующаяся в процессе перегонки живицы канифоль стекает в нижнюю часть колонны, откуда через специальное отверстие попадает в промежуточный сборник для розлива в тару.

Процесс розлива канифоли имеет свои технологические особенности, так как она может кристаллизоваться и в таком виде становится не пригодной для применения. Кристаллизация происходит при  $t = 90...110$  °С. Основным способом предотвращения кристаллизации канифоли является быстрое ее охлаждение. Для этого горячую канифоль заливают в тару тонкими слоями в несколько приемов или применяют специальные устройства – охлаждающие барабаны.

При изучении технологических параметров процесса переработки сосновой живицы выявлены основные особенности, существенно влияющие на качество скипидара и канифоли:

канифоль получается при перегонке с перегретым водяным паром;

перегонку необходимо проводить при  $t = 179...220$  °С;

во избежание кристаллизации розлив канифоли должен осуществляться при условии ее быстрого охлаждения.

#### *Объекты и методы исследования*

Для решения стоящей перед нами задачи кроме аналитического применялся экспериментальный метод исследований. Метод предполагает изготовление экспериментального оборудования и отработку технологических параметров его работы в следующей последовательности [6]:

разработка технического задания на опытно-конструкторскую работу (ОКР);

проведение ОКР, включающей в себя разработку технической документации, изготовление и испытание опытных образцов и приемку результатов;

постановка на производство.

Данная работа выполнялась на протяжении довольно длительного времени. Начальный этап исследований (1999 г.) осуществлялся в Архангельске, в Северном научно-исследовательском институте лесного хозяйства [9].

На этом этапе качество получаемой канифоли по цветности не соответствовало требованиям высшего и первого сортов. Экспериментальные работы были продолжены и позволили обосновать все технологические параметры процесса переработки сосновой живицы, приемлемые для их использования хозяйствующими субъектами на местах ее добычи.

В связи с тем, что результаты исследований должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 15.301–2016 [4], а тема статьи затрагивает особенности технологического цикла переработки сосновой живицы, мы не будем уделять особого внимания вопросам составления различных документов, подтверждающих выполненные этапы работ. Основное внимание сосредоточим на проведении ОКР, включающей в себя разработку технической документации, изготовление опытных образцов, так как нашей задачей является обоснование технологических параметров, при применении которых возможна переработка сосновой живицы на местах ее добычи с использованием малогабаритного оборудования.

В рамках разработки технического задания определены показатели эффективности работы оборудования, а также технико-экономические требования:

экспериментальное оборудование должно перерабатывать сосновую живицу в лабораторных условиях, имитирующих реальные условия эксплуатации;

при разработке экспериментального оборудования должны быть использованы технологические параметры и характеристики промышленного образца того же назначения;

в процессе работы должны быть определены требования к качеству канифоли и скипидара, приемлемые для возможностей экспериментального оборудования;

качество получаемых продуктов должно быть сопоставлено с требованиями ГОСТов на сосновую канифоль и живичный скипидар [2, 3];

на основании данных, полученных при испытании экспериментального оборудования, должны быть определены технико-экономические требования к производственным образцам оборудования.

Главным требованием по эффективности работы оборудования, а также самой технологии является максимальное упрощение схемы переработки живицы при минимальных потерях качества получаемых продуктов, т. е. главная цель проводимых работ – снижение себестоимости производства канифоли и скипидара.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В основу разработки положен принцип нагревания живицы при атмосферном давлении. Данный способ переработки имеет отрицательные отзывы [1]. Но результаты лабораторных экспериментов говорят о том, что получаемая канифоль имеет показатели первого сорта по температуре плавления и кислотному числу. Цветность канифоли во многом зависит от степени окисления живицы и продолжительности ее нагрева.

Как уже говорилось, окисление живицы возникает от соприкосновения ее с железом. Живица становится черной. Для получения канифоли с высокими показателями по цветности на лесохимических предприятиях при отстаивании для осветления живицы применяют специальные химические реагенты. В разрабатываемой нами технологии данный вид работ не предусматривается, так как в технологическом процессе заготовки и сбора живицы будет устранен

ее контакт с железом, т. е. она не будет окисляться. Эта особенность является важным преимуществом, позволяющим применять разрабатываемую нами технологию. Технологический процесс переработки живицы схематично изображен на рис. 1.

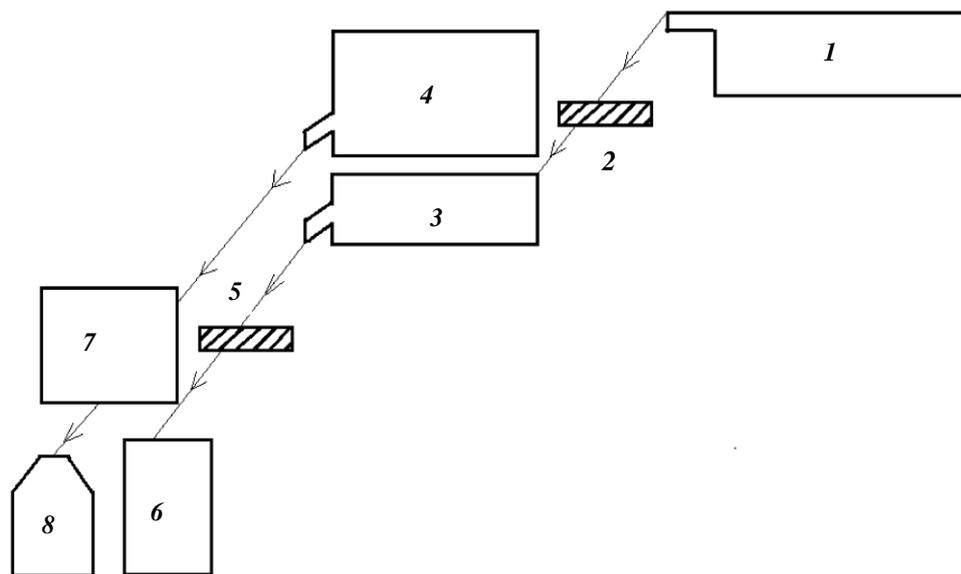


Рис. 1. Схема технологического процесса переработки сосновой живицы: 1 – плавильник; 2 – фильтр очистки живицы; 3 – канифолеварочное устройство; 4 – холодильник; 5 – фильтр очистки канифоли; 6 – тара для канифоли; 7 – флорентина; 8 – тара для скипидара

Fig. 1. Flow chart of pine sap processing: 1 – melter; 2 – pine sap filter; 3 – rosin boiling apparatus; 4 – refrigerator; 5 – rosin filter; 6 – container for rosin; 7 – separating flask; 8 – container for turpentine

Новизна технологической схемы заключается в использовании устройства, состоящего из двух плоских нагреваемых поверхностей и холодильной установки. На одной поверхности (в плавильнике) происходит плавление живицы, на другой поверхности (в канифолеварочной части) в зависимости от температуры нагрева отгоняются летучие терпеновые углеводороды, при охлаждении которых в холодильной установке образуется скипидар. Не обладающие летучими свойствами смоляные кислоты образуют канифоль. Чтобы упростить технологический процесс, плавление и перегонку живицы осуществляют не за счет перегретого пара, а за счет контакта живицы с поверхностью, нагреваемой тепловыми электрическими нагревателями. Вода отделяется от живицы путем ее испарения с нагреваемых поверхностей.

Очистку живицы от примесей проводят в две стадии. На первой стадии ее очищают от органических примесей, что происходит фильтрационным способом при перетекании живицы с поверхности, на которой происходит плавление, на поверхность, где осуществляется окончательная переработка живицы. В качестве фильтрационного элемента используется мелкая сетка, изготовленная из меди или нержавеющей стали.

На второй стадии расплавленная канифоль очищается от минеральных примесей путем фильтрования через плотную бязевую ткань.

Важным фактором для получения качественной канифоли является температура нагреваемых поверхностей. В ходе эксперимента установлено, что температура нагреваемых поверхностей должна составлять: в плавильнике – 100 °С, в канифолеварочной части – 180 °С.

Количество живицы на проведение одного цикла работы имеет большое значение. Нагрев канифоли от поверхности канифолеварочной части оборудования осуществляется неравномерно. В местах соприкосновения живицы с поверхностью оборудования температура будет всегда выше, чем в верхней части слоя. С увеличением толщины слоя эта разница будет возрастать. Перегрев живицы, а также длительное ее нахождение в зоне высоких температур отрицательно сказывается на цветности канифоли. Опытным путем установлено, что толщина слоя живицы не должна превышать 1 см, при этом продолжительность процесса варки канифоли составляет 20 мин.

Продолжительность прогревания живицы во многом зависит от металла, применяемого для изготовления канифолеварочной части оборудования. В связи с этим установлено, что наилучшие показатели прогрева живицы достигаются на оборудовании из алюминия.

Переработку живицы завершают при достижении температуры 180 °С. В этих условиях минеральные примеси не влияют на качество канифоли. Показатели качества канифоли и скипидара, полученных в процессе переработки живицы (табл. 1 и 2), отвечают требованиям ГОСТов [2, 3].

Таблица 1

**Средние показатели качества канифоли**

Показатель	Значение
Внешний вид	Стекловидная масса
Интенсивность окраски	X; W
Массовая доля воды, %	Не более 0,2
Массовая доля золы, %	Не более 0,04
Массовая доля механических примесей, %	Не более 0,04
Температура размягчения, °С	Не менее 68
Кислотное число, мг КОН на 1 г продукта	Не менее 168
Склонность к кристаллизации	Отсутствие медного пористого остатка

Таблица 2

**Средние показатели качества скипидара**

Показатель	Значение
Внешний вид и запах	Прозрачная летучая жидкость с характерным запахом без осадка и воды
Плотность $\rho$ при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,860
Объемная доля отгона в пределах температур при давлении 101 325 Па (760 мм рт. ст.), %:	
до 155 °С	Отсутствует
до 170 °С	Не менее 90
Массовая доля остатка от испарения, %	Не более 0,5

Полученные в процессе работы канифолеварочного оборудования продукты требуется поместить в тару. Но предварительно необходимо выполнить следующие технологические операции.

Конденсат, состоящий из терпеновых углеводов и воды, направляют для разделения во флорентину, затем скипидар сливают в специальную тару, а канифоль для отделения минеральных примесей перед затариванием фильтруют через бязевую ткань. Так как канифоль менее вязкая, чем живица, то она просачивается через мелкие поры бязевой ткани, что предотвращает ее кристаллизацию.

Проведенные исследования по разработке технологии переработки сосновой живицы, осуществленные аналитическим и экспериментальным способами, дали положительный результат. Образцы канифоли и скипидара, полученные на экспериментальном оборудовании, соответствовали требованиям государственных стандартов по качеству. Итоги выполненной работы позволяют сделать вывод о целесообразности продолжения начатых экспериментов, но уже на промышленном оборудовании.

Основываясь на экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что на промышленном оборудовании с канифолеварочной частью 2 м<sup>2</sup> можно переработать 35 т сосновой живицы за 6 мес., т. е. за сезон подсочки. Изготовить такое промышленное оборудование не представляет большой сложности, требуемые материалы доступны. Габариты установки приемлемы для использования на небольших предприятиях.

Таким образом, с учетом технико-экономических требований, а также необходимых показателей эффективности работы промышленного оборудования, выявленных основных технологических параметров очистки от примесей и перегонки сосновой живицы, применяемых на лесохимических заводах, разработана технология, приемлемая для использования на производственной базе хозяйствующих субъектов, осуществляющих заготовку и одновременно переработку сосновой живицы.

#### *Заключение*

Проведенные исследования по разработке технологии переработки сосновой живицы, осуществленные аналитическим и экспериментальным способами, дали положительный результат. Образцы канифоли и скипидара, полученные на экспериментальном оборудовании, соответствовали требованиям государственных стандартов по качеству. Итоги выполненной работы позволяют сделать вывод о целесообразности продолжения начатых экспериментов, но уже на промышленном оборудовании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон Л.В., Фефилов В.В., Скворцов С.О., Атаманчуков Г.Д. Технология лесохимических производств: учеб. для техникумов. М.: Гослесбумиздат, 1960. 419 с.
2. ГОСТ 1571–82. Скипидар живичный. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990. 22 с.
3. ГОСТ 19113–84. Канифоль сосновая. Технические условия. М.: Стандартинформ. Изд-во стандартов, 1990. 13 с.
4. ГОСТ Р 15.301–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

5. *Игнатович М.В.* Импортозамещение как фактор экономической безопасности государства // Новая наука. Стратегии и векторы развития. 2016. № 11. С. 204–206.

6. *Комилов Н.Ф.* Канифоль, ее состав и строение смоляных кислот. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 163 с.

7. *Лукьянов П.М.* История химических промыслов и химической промышленности России до конца XIX века. Т. 3. М.: АН СССР, 1951. 606 с.

8. *Пастухова Н.О.* Изучение зарубежного опыта подсочки и возможность его использования в Архангельской области // Молочнохозяйств. вестн. 2016. № 3(23). С. 16–21.

9. Разработать технологию переработки живицы сосновой на местах ее добычи и обосновать применение данной технологии на предприятиях Архангельской области: отчет о НИР. Архангельск: СевНИИЛХ, 2000. 30 с.

10. *Ярунов А.С., Горкин А.И., Петрик В.В.* Прижизненное пользование лесом на Севере // Наука – лесному хозяйству Севера: сб. / СевНИИЛХ. Архангельск: Пресс' А, 1999. С. 126–129.

11. *Demulle D.* Rosin and the Art of the Squish. CreateSpace, 2016. 32 p. [In Eng.]

12. *Jones H.L.* Process of Rosin Sizing Paper. International Paper Company. New York. U.S. Pat. 3,421,976. 1969.

Поступила 05.05.18

UDC 630\*8

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.96

### **On the Potential of Pine Sap Processing in the Places of Its Extraction**

*A.I. Gorkin, Candidate of Agricultural Sciences*

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

The industrial production of pine sap almost completely passed away in the Russian Federation. In order to regain lost ground it is necessary to resolve the following issues: creation of production capacities for pine sap processing in the places of its extraction; involvement of forest areas, rented for other types of forest exploitation, to pine sap production; creation of logistic schemes for sales of pine sap and products of its processing. The research is focused on development of a technology for pine sap processing, which could be used on production basis of an economic entity. As a result of analysis, the key features of the technological cycle of pine sap processing are revealed, that was accounted in the developing technology. The experiments were done on test equipment. Technological process consisted of pine sap decontamination and processing. The obtained rosin and turpentine met the existing standards for their quality. Two heating surfaces and a refrigeration unit were used in the technological workflow. One of the surfaces fulfilled the function of a smelter. The second surface (rosin boiling) and refrigeration unit were used in order to obtain rosin and turpentine. The important aspects of the developed technology are temperature modes and applied methods for purification from organic and mineral impurities. It has been established that with the use of an industrial plant having a rosin boiling part area of 2 m<sup>2</sup>, it is possible to recycle 35 t of pine sap for 6 months, i.e. for the tapping season. Manufacturing of such industrial equipment is not very difficult. Its dimensional specifications are quite acceptable for the capabilities of small enterprises.

*Keywords:* pine sap production, tapping, rosin, turpentine, technology.

---

*For citation:* Gorkin A.I. On the Potential of Pine Sap Processing in the Places of Its Extraction. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 96–105. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.96

## REFERENCES

1. Gordon L.V., Fefilov V.V., Skvortsov S.O., Atamanchukov G.D. *Tekhnologiya lesokhimicheskikh proizvodstv: ucheb. dlya tekhnikumov* [Technology of Wood Chemical Industries: Textbook for Technical Schools]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1960. 419 p. (In Russ.)
2. *GOST 1571–82. Skipidar zhivichnyy. Tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 1571–82. Sap Turpentine. Technical Specifications]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1990. 22 p.
3. *GOST 19113–84. Kanifol' sosnovaya. Tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 19113–84. Pine Rosin. Technical Specifications]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1990. 13 p.
4. *GOST R 15.301–2016. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Produktsiya proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Poryadok razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo* [Russian State Standard 15.301–2016. System of product development and launching into manufacture. Products for Industrial and Technical Purposes. Procedure of Product Development and Launching into Manufacture]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 12 p.
5. Ignatovich M.V. Importozameshcheniye kak faktor ekonomicheskoy bezopasnosti gosudarstva [Import Substitution as a Factor of Economic Security of the State]. *Novaya nauka. Strategii i vektory razvitiya*, 2016, no. 11, pp. 204–206.
6. Komshilov N.F. *Kanifol', eye sostav i stroyeniye smolyanykh kislot* [Rosin, Its Composition and Structure of Resin Acids]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 163 p. (In Russ.)
7. Luk'yanov P.M. *Istoriya khimicheskikh promyslov i khimicheskoy promyshlennosti Rossii do kontsa XIX veka. T. 3* [History of Chemical Crafts and Chemical Industry of Russia till the End of the 19<sup>th</sup> Century. Vol. 3]. Moscow, AN SSSR Publ., 1951. 606 p. (In Russ.)
8. Pastukhova N.O. Izucheniye zarubezhnogo opyta podsochki i vozmozhnost' ego ispol'zovaniya v Arkhangel'skoy oblasti [Study and Possibility of Using Foreign Tapping Experience in Arkhangelsk Region]. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik* [Molochnokhozyaystvenny Vestnik], 2016, no. 3(23), pp. 16–21.
9. *Razrabotat' tekhnologiyu pererabotki zhivitsy sosnovoy na mestakh eye do-bychi i obosnovat' primeneniye dannoy tekhnologii na predpriyatiyakh Arkhangel'skoy oblasti: otchet o NIR* [To Develop a Technology for Pine Sap Processing in the Places of Its Extraction and Substantiate the Use of the Technology at the Mills of Arkhangelsk Region: Scientific Report]. Arkhangelsk, SevNIILKh Publ., 2000. 30 p.
10. Yaranov A.S., Gorkin A.I., Petrik V.V. Prizhiznennoye pol'zovaniye lesom na Severe [Lifetime Use of Forest in the North]. *Nauka – lesnomu khozyaystvu Severa: sb. SevNIILKh* [Science to the Forestry of the North: SevNIILKh's Collection of Academic Papers]. Arkhangelsk, Press A Publ., 1999, pp. 126–129.
11. Demulle D. *Rosin and the Art of the Squish*. CreateSpace, 2016. 32 p. [In Eng.]
12. Jones H.L. *Process of Rosin Sizing Paper*. International Paper Company. New York, U.S. Pat. 3,421,976. 1969.

Received on May 05, 2018



УДК 634.037.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

**ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С МЕРЗЛЫМ ПОЧВОГРУНТОМ***Рудов С.Е.<sup>1</sup>, канд. техн. наук**Шапиро В.Я.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.**Григорьев И.В.<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.**Куницкая О.А.<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.**Григорьева О.И.<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.*

<sup>1</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Проведение лесозаготовительных работ в районах Крайнего Севера происходит в крайне сложных климатических условиях. В традиционный для заготовки древесины зимний период лесная техника в этих районах работать не может из-за экстремально низких температур, которые не выдерживают металл и гидравлика машин. Поэтому период устойчивого проведения лесосечных работ и вывозки заготовленной древесины сравнительно невелик. Переходы температуры окружающего воздуха от отрицательных к положительным значениям, характерные для резко континентального климата, например в Республике Саха (Якутия), останавливают лесозаготовительный процесс на большей части лесосек из-за оттаивания мерзлых почвогрунтов. В процессе эксплуатации трелевочных систем необходимо считаться с тем, что мерзлый почвогрунт представляет собой сложную многокомпонентную среду. На основании результатов исследований установлено, что на определенных глубинах при условии податливости формируется так называемое первичное ядро уплотнения почвогрунта. В случае, если компоненты поля напряжений на больших глубинах обеспечат выполнение принятых критериев разрушения мерзлого почвогрунта, то ядро уплотнения будет перемещаться вниз, и под действием трелевочной системы почвогрунт получит дополнительное уплотнение. Процесс погружения ядра уплотнения сопровождается понижением температуры, что в свою очередь обуславливает рост прочности и модуля упругости. Таким образом, установленные закономерности влияния температуры и влажности мерзлых грунтов на их физико-механические свойства позволяют более точно оценить величину начальных контактных параметров в процессе трелевки пачки лесоматериалов с заранее заданными статическими нагрузками. Полученные ре-

---

*Для цитирования:* Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 106–119. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

зультаты являются основой для формирования начальных условий при расчетах параметров разрушения напряженно-деформированного массива мерзлого почвогрунта и его уплотнения под действием статических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации различных лесных машин и трелевочных систем.

*Ключевые слова:* мерзлый почвогрунт, лесозаготовка, трелевочная система, уплотнение и деформация почвогрунта.

### *Введение*

Лесные экосистемы на мерзлых почвогрунтах особо ранимы. Вредное воздействие лесных машин через уплотнение и деформацию почвогрунтов на экосистемы лесосек известно исследователям как в России, так и за рубежом [5, 13–17].

Необходимо выделить три основные субстанции мерзлого почвогрунта: собственно твердый высокоплотный скелет грунта;

вода в различном состоянии, в первую очередь свободная и связанная с переменной плотностью, засоленностью и, как следствие, существенно отличающаяся температурой замерзания;

лед.

Эти обстоятельства с учетом фактора низких температур, различной влажности и засоленности мерзлого почвогрунта оказывают сильное влияние на конечные показатели его физико-механических свойств.

Основные показатели физико-механических свойств такого объекта подробно изучены в работах [1, 2, 6, 9], где особо отмечается влияние условий мгновенного и длительного приложения статических нагрузок, при которых характеристики мерзлого почвогрунта, в частности прочностные, отличаются весьма существенно: кратно, а в ряде случаев на порядок и более.

В нашем исследовании условимся, что при работе лесных машин показатели физико-механических свойств соответствуют приложенным мгновенным нагрузкам.

Цель исследования – установление особенностей взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом.

### *Объекты и методы исследования*

Для основных разновидностей мерзлого грунта (песков, супесей, суглинков и др.) ранее [1, 6, 9] выявлены некоторые общие закономерности. В частности установлено, что его прочность увеличивается при снижении температуры, степени дисперсности, влажности, а также возрастании льдистости до полного насыщения пор грунта льдом и интенсивности приложения внешней нагрузки. Прочность мерзлого грунта и степень его сопротивления внешним нагрузкам уменьшается по мере увеличения пористости и снижения плотности грунта. Учитывая многокомпонентность мерзлого почвогрунта, который представляет собой многослойную систему, состоящую из нескольких органических и одного или нескольких минеральных слоев [15], под его плотностью ( $\rho$ ) следует понимать средневзвешенное по объемам значение.

Грунты по плотности классифицируют на 5 категорий, начиная от категории I (очень рыхлые,  $\rho = 1,1 \dots 1,3 \text{ т/м}^3$ ) до категории V (очень плотные,  $\rho > 2,1 \text{ т/м}^3$ ).

Очевидно, что одним из основных показателей физико-механических свойств мерзлого почвогрунта является его температура. При этом для каждого грунта характерна своя температура начала замерзания, в среднем  $T_3 = -0,2... -0,4$  °С.

Проиллюстрируем это графиками (рис. 1), полученными на основе опытных данных [6] для некоторых мерзлых грунтов в районе пос. Амдерма.

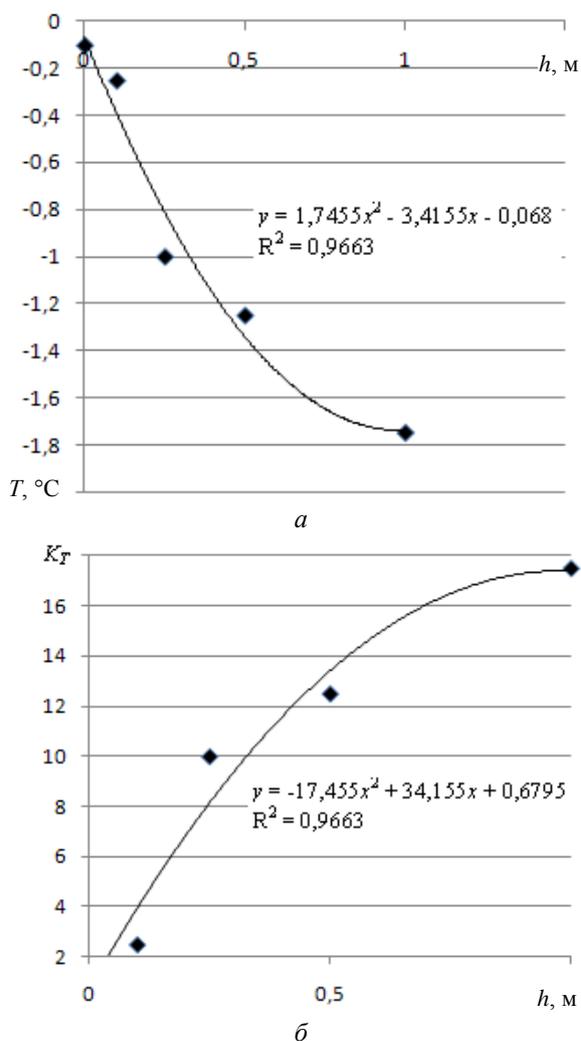


Рис. 1. Понижение температуры грунта с ростом глубины его залегания:  $a$  – изменение абсолютных значений температур;  $b$  – относительных

Fig. 1. Soil temperature decrease with increase of its depth: change in absolute ( $a$ ) and relative ( $b$ ) temperature values

На рис. 1,  $a$  представлен график изменения температуры  $T$  от глубины залегания слоя грунта  $h$ . Нагляднее данные рис. 1,  $a$  можно представить в относительных (безразмерных) величинах. Если температуру на поверхности

почвогрунта принять за масштабную единицу, то на рис. 1, б имеем безразмерный коэффициент  $K_T$ , характеризующий интенсивность понижения температуры с ростом текущей координаты (глубины)  $h$ .

С высокой степенью достоверности зависимость на рис. 1, а описывается полиномом второй степени, причем при текущих значениях  $h \leq 0,5$  м понижение температуры происходит практически линейно. Необходимо отметить, что мощность мерзлого слоя грунтов ( $h_3$ ), как правило, изменяется в пределах  $h_3 = 0,6 \dots 2,5$  м. Таким образом, будем считать, что процесс контактного взаимодействия трелевочной системы реализуется в пределах изменения глубины  $h$  от 0 до  $h_3$ .

Зависимость  $K_T(h)$  с высоким коэффициентом детерминации ( $R^2 = 0,9663$ ) можно представить как

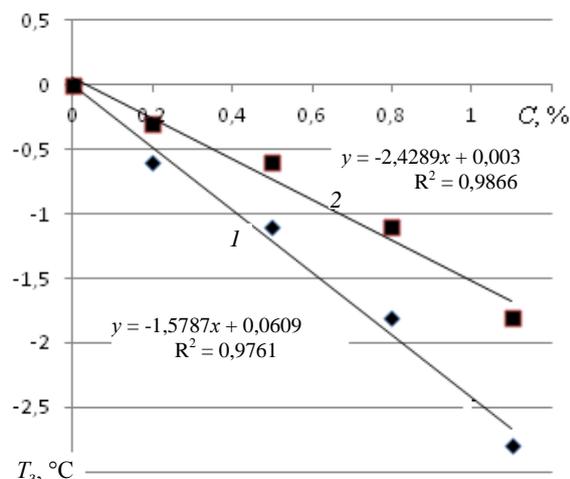
$$K_T(h) = -17,455h^2 + 34,155h + 0,6795. \quad (1)$$

Температура замерзания мерзлого грунта  $T_3$  зависит от степени его засоленности. При этом мерзлые грунты могут быть слабо (суммарное содержание легкорастворимых солей в массе сухого грунта  $C = 0,3$  %) и избыточно ( $C > 8 \dots 10$  %) засоленными.

На рис. 2 представлено влияние параметра  $C$  на  $T_3$  для слабо и средnezасоленных маловлажных и весьма влажных мерзлых грунтов с учетом их влажности ( $W$ ).

Рис. 2. Влияние засоленности мерзлого грунта на его температуру замерзания с учетом влажности: 1 –  $W = 20$  %; 2 – 40 %

Fig. 2. Influence of frozen soil salinity on its freezing point with regard to humidity: 1 –  $W = 20$  %; 2 – 40 %



Хорошая линейная аппроксимация данных позволяет по значениям угловых коэффициентов прямых сделать заключение, что увеличение влажности в 2 раза снижает зависимость  $T_3$  от  $C$  в 1,53 раза.

Как отмечалось выше, по данным исследований [1], параметр температуры существенно влияет на прочностные показатели мерзлого грунта, среди которых необходимо отметить пределы его прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ), сдвиг ( $\sigma_{сд}$ ) и разрыв ( $\sigma_p$ ).

В табл. 1 приведены результаты исследований [1] для четырех мерзлых грунтов (МГ1 – пылевой песок, МГ2 – кварцевый песок, МГ3 – супесь, МГ4 – глина) и льда с учетом понижения температуры.

Таблица 1

**Изменение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$  ( $10^2$  кПа)  
мерзлых грунтов и льда при понижении температуры**

$T, ^\circ\text{C}$	МГ1	МГ2	МГ3	МГ4	Лед
-0,1	80	45	9	2	1
-1,0	108	62	15	19	5
-2,0	120	73	21	42	13
-3,0	131	81	31	50	21
-4,0	138	85	41	56	28
-5,0	144	93	48	61	39
-10,0	165	122	59	89	47

Анализ данных табл. 1 показывает, что значения прочности на сжатие характеризуются существенной вариативностью даже для одной группы мерзлых грунтов, в частности МГ1, что снижает надежность прогнозных и расчетных методов.

Для сравнительного анализа и количественного сопоставления данных табл. 1 и рис. 3, *a* опытные значения  $\sigma_{сж}$  для песков и супеси представлены в безразмерном виде (по аналогии с рис. 1, *б*) при заданной температуре на поверхности грунта, принятой  $T = -0,1$  °C.

Как видно на примере песков (кривые 1 и 2 на рис. 3, *a*), несмотря на существенные различия их абсолютных значений  $\sigma_{сж}$ , достигающие в среднем 50 % и более, относительные величины  $\sigma_{сж}$  отличаются незначительно – менее чем на 10 %, поэтому расхождение кривых 1 и 2 – небольшое. Кривая 3 (для супеси) свидетельствует уже о более существенном влиянии понижения температуры на прочность данного мерзлого грунта при одноосном сжатии.

Представляет интерес анализ изменения прочностных свойств мерзлой глины при сжатии по сравнению со льдом (рис. 3, *б*). В этом случае абсолютные значения  $\sigma_{сж}$  отличаются кратно, хотя кривые относительного увеличения прочности с понижением температуры весьма близки.

Полученный результат можно объяснить тем, что глина, как правило, имеет повышенную влажность, а большое содержание замерзшей воды обуславливает ее поведение при сжатии, схожее с процессом сжатия льда. Для практических расчетов удобно использовать аналитические связи  $K_{сж}(T)$ .

Для мерзлой супеси данное соотношение хорошо ( $R^2 = 0,9744$ ) описывается следующей полиномиальной зависимостью:

$$K_{сж}(T) = -0,0468T^2 - 1,075T - 0,0585. \quad (2)$$

Если обратиться к количественной оценке влияния влажности на прочностные свойства мерзлого грунта, то, по данным [1], для супесей зависимость  $\sigma_{сж}$  от  $W$  подчиняется закону квадратичной гиперболы в диапазоне изменения  $W$  от 10...15 % (сухие супеси) до 35...40 % (увлажненные супеси).

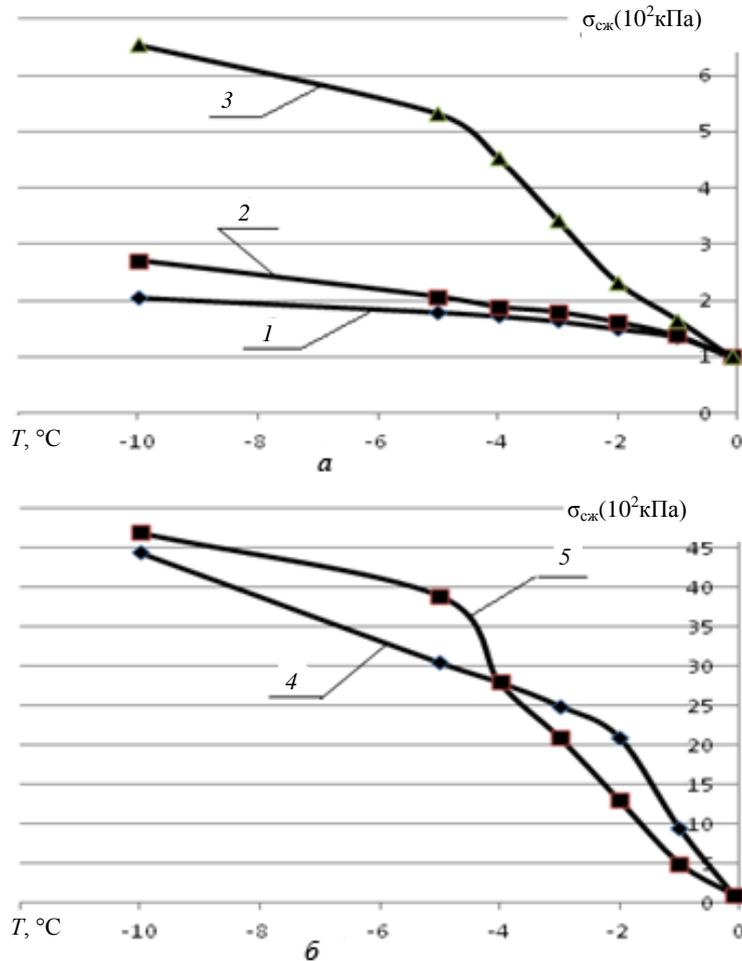


Рис. 3. Зависимость относительной величины  $\sigma_{сж}$  от  $T$  для МГ1 (1), МГ2 (2), МГ3 (3), МГ4 (4) и льда (5)

Fig. 3. Dependence of the relative value of  $\sigma_{сж}$  (ultimate compression strength) from  $T$  (temperature) for frozen soils (1–4) and ice (5)

Для глины при  $T = -3...-4$  °С снижение  $\sigma_{сж}$  от 5000 до 3500 кПа отмечается при росте  $W$  от 15 до 35 %. Для конкретных технологических условий необходимо определять соответствующую зависимость  $\sigma_{сж}(W)$ .

Рассмотрим еще один важный прочностной показатель – предел прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$ .

Касательные напряжения  $\tau$  по теории Кулона–Мора зависят от сцепления  $K$  и угла внутреннего трения  $\phi$ , которые в общем случае зависят от температуры  $T$  [1]. В свою очередь плотность мерзлого почвогрунта  $\rho$  тесно связана с углом  $\phi$ .

В табл. 2 приведены абсолютные значения прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$  ( $10^2$  кПа) для двух видов мерзлого грунта (для супеси МГ3 и глины МГ4) средней плотности ( $\rho = 1,7...1,9$  т/м<sup>3</sup>) в сравнении с прочностью на сдвиг льда по мере понижения  $T$ .

Таблица 2

**Изменение предела прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$  ( $10^2$  кПа)  
мерзлых грунтов и льда при понижении температуры**

$T, ^\circ\text{C}$	МГЗ	МГ4	Лед
-0,1	1,2	1,1	0,8
-0,5	4,0	3,0	2,0
-1,0	10,0	8,0	4,0
-2,0	14,0	12,0	15,0
-3,0	21,0	18,0	19,0
-4,0	26,0	22,0	25,0

На рис. 4 данные табл. 2 по аналогии с рис. 3 представлены в безразмерном виде.

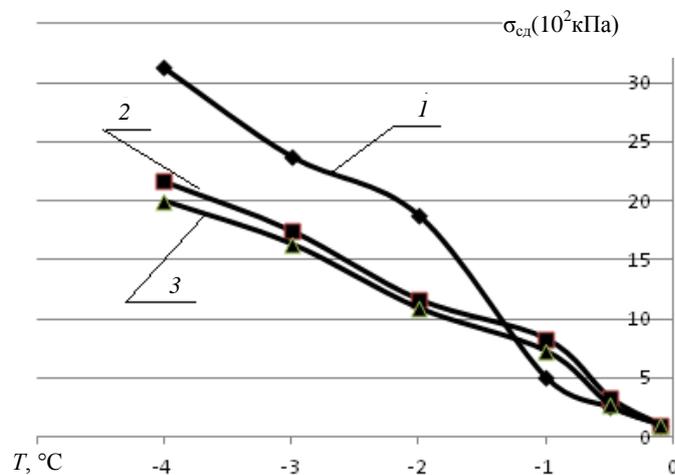


Рис. 4. Зависимости относительной величины  $\sigma_{сд}$  от  $T$  для льда (1), МГЗ (2) и МГ4 (3)

Fig. 4. Dependences of the relative value of  $\sigma_{сд}$  (ultimate shear strength) from  $T$  (temperature) for ice (1) and frozen soils (1–3)

Одной из основных характеристик упруго-деформационных свойств мерзлого почвогрунта является модуль упругости  $E$ , равный отношению сжимающих напряжений к относительной упругой деформации в условиях кратковременного действия нагрузок.

В табл. 3 приведены абсолютные значения модуля упругости для ряда грунтов в зависимости от их температуры [8].

Таблица 3

**Изменение модуля упругости мерзлых грунтов  
при понижении температуры  $T$**

Грунт	Значение $E$ ( $10^3$ кПа) при $T, ^\circ\text{C}$		
	-0,2...-0,5	-0,5...-1,5	-1,5...-6,0
Песок	1000	3000	5000
Супесь	800	2000	3000
Суглинок	500	1200	2000
Глина	300	600	1000

Зависимость безразмерного коэффициента  $K_E(T)$  по мере снижения температуры описывается практически функционально ( $R^2 = 1$ ):

$$K_E(T) = -0,545T^2 - 3,0435T + 0,0015. \quad (3)$$

Устойчивых корреляционных связей между модулем упругости и влажностью грунта  $W$  по данным [1] выявить не удалось.

В диапазоне изменения температуры от  $-0,1$  до  $-1,0$  °С коэффициент Пуассона  $\nu$  колеблется в пределах  $0,2...0,5$  [1, 2, 8], при этом он существенно зависит от влажности.

Характер поведения безразмерного коэффициента  $K_\nu(W)$  практически функционально описывается следующей экспоненциальной зависимостью:

$$K_\nu(W) = 0,38 \exp(0,0534 W). \quad (4)$$

Коэффициент Пуассона определяет величину коэффициента бокового распора:

$$\lambda = \nu / (1 - \nu).$$

Поскольку нормальные (сжимающие) и тангенциальные (растягивающие) компоненты тензора напряжений в моделях разрушения грунтов с внутренним трением [3, 10] отличаются именно на величину  $\lambda$ , то для влажных грунтов по мере приближения  $\lambda$  к значениям  $0,45...0,50$  главные напряжения будут практически совпадать.

Полученные оценки влияния параметров влажности и температуры на показатели физико-механических свойств мерзлых почвогрунтов позволяют перейти к решению задачи воздействия лесных машин и трелевочных систем на эти почвогрунты.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Контактные задачи механики разрушения сплошных сред с заранее заданными свойствами, в частности немерзлых грунтов или массивов коры деревьев различной температуры, в результате воздействия инденторов разнообразной конфигурации подробно рассмотрены в работах [4, 11, 12].

Пусть трелевочная система состоит из трактора массой  $G$  и тележки с пачкой лесоматериалов массой  $Q$  и колесная база трелевочной системы имеет характерный радиус колеса (шины)  $R$ .

Под действием суммарной статической нагрузки массой  $P = G + Q$  на поверхности почвогрунта при условии его податливости образуется зона контакта радиусом  $a$ , площадью  $S = \pi a^2$  и глубиной контактного сближения (начальная глубина погружения колеса)  $h_0$ . Эти параметры являются определяющими [12] при оценке действующих начальных давлений трелевочной системы в зоне контакта шины с мерзлым почвогрунтом.

Основываясь на положениях [7], определим параметры  $a$  и  $h_0$ :

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{4E}}; h_0 = a^2/R. \quad (5)$$

Суммарная нагрузка  $P$ , распределенная по площади  $S$ , формирует начальное усредненное давление  $q_a$ , а также начальные максимальные вертикальное ( $\sigma_v$ ) и горизонтальное ( $\sigma_r$ ) давления в центре площадки:

$$q_a = \frac{P}{S}f; \quad \sigma_v = \frac{3}{2}q_a; \quad \sigma_r = \lambda\sigma_v, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению колеса.

Как следует из (6), для влажных грунтов при стремлении  $\nu$  к предельному значению 0,5 горизонтальная компонента  $\sigma_r \approx \sigma_v$  ( $\lambda \approx 1$ ) и напряженное состояние почвогрунта в плоской постановке близко к состоянию двустороннего сжатия.

Модуль упругости  $E$  учтен в (6) опосредованно через соотношение (5) как переменная величина, зависящая от температуры  $T$  в соответствии (3).

Значения указанных начальных параметров контактного разрушения при заданной статической нагрузке массой  $P$  (или удельной нагрузке  $m = P/R$ ) формируют начальные компоненты (вертикальные и горизонтальные) тензора напряжений и дальнейшее развитие процесса разрушения почвогрунта в зоне контакта при превышении расчетных напряжений пределов прочности мерзлого почвогрунта (на сжатие  $\sigma_{сж}$ , сдвиг  $\sigma_{сд}$  или разрыв  $\sigma_r$ ) в зависимости от принятого критерия разрушения. При этом учет температуры почвогрунта в прочностных характеристиках базируется на данных рис. 3 и 4.

Поскольку из отмеченных выше прочностных показателей минимальные значения принимает  $\sigma_r$ , то для оценок размеров зон разрушения целесообразно принять в качестве критерия разрушения следующее неравенство:  $\sigma_r > \sigma_p$ . Если данный критерий выполняется и несущая способность почвогрунта нарушена, то под действием нагрузки массой  $P$  (суммарной массы трелевочной системы) будет иметь место погружение колеса на величину контактного сближения  $h_0$ .

Таким образом, параметры  $a$  и  $h_0$  зависят от суммарной массы трелевочной системы, размера ее колесной базы, а интегрально – от удельной нагрузки  $m$ , а также от упругопластических свойств мерзлого почвогрунта, в первую очередь от модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , корреляционно зависящих от его температуры и влажности.

Пробные расчеты были произведены для мерзлой супеси с плотностью в естественном залегании  $\rho = 1,7 \text{ т/м}^3$  при нормальной влажности ( $W = 25 \%$ ) с температурой замерзания  $T_3 = -0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  и при температуре на поверхности  $T_{п} = -0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  (практически талый грунт). Мощность мерзлого слоя принята  $h_3 = 0,6 \text{ м}$ .

Параметры трелевочной системы в расчетах: масса  $G = 14 \text{ т}$ , масса  $Q = 5 \text{ т}$ , т. е. общая масса системы  $P = 19 \text{ т}$ ;  $R = 0,45 \text{ м}$  (статическая нагрузка  $m = 42,2 \text{ т/м}$ ), коэффициент  $f = 0,1$ . Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,29$  определен для заданной влажности  $W$  с помощью соотношения (4).

Для принятой температуры  $T_{п} = -0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  с учетом соотношения (2) получены значения  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$ , равные соответственно 48,52 и 9,70 кПа, а с учетом соотношения (3) – значение модуля упругости  $E = 240,32 \text{ кПа}$ .

В совокупности для этих данных из соотношений (6) имеем: среднее давление  $q_a = 72 \text{ кПа}$ ; максимальное вертикальное давление  $q_v = 107,85 \text{ кПа}$ ; максимальное горизонтальное давление  $q_r = 44,05 \text{ кПа}$ , т. е. полученные предельные нагрузки существенно превышают прочностные характеристики грунта в зоне его поверхностного залегания.

При выполнении разрушения за счет разрыва и тем самым формирования условий для податливости грунта произведем расчеты по определению зависимости параметров контактного взаимодействия трелевочной системы с поверхностью мерзлого почвогрунта.

Результаты расчетов представлены на рис. 5, где отражено влияние температуры  $T$  и влажности  $W$  на контактные параметры  $a$  (кривая 1 – радиус зоны контакта) и  $h_o$  (кривая 2 – глубина первичного погружения трелевочной системы).

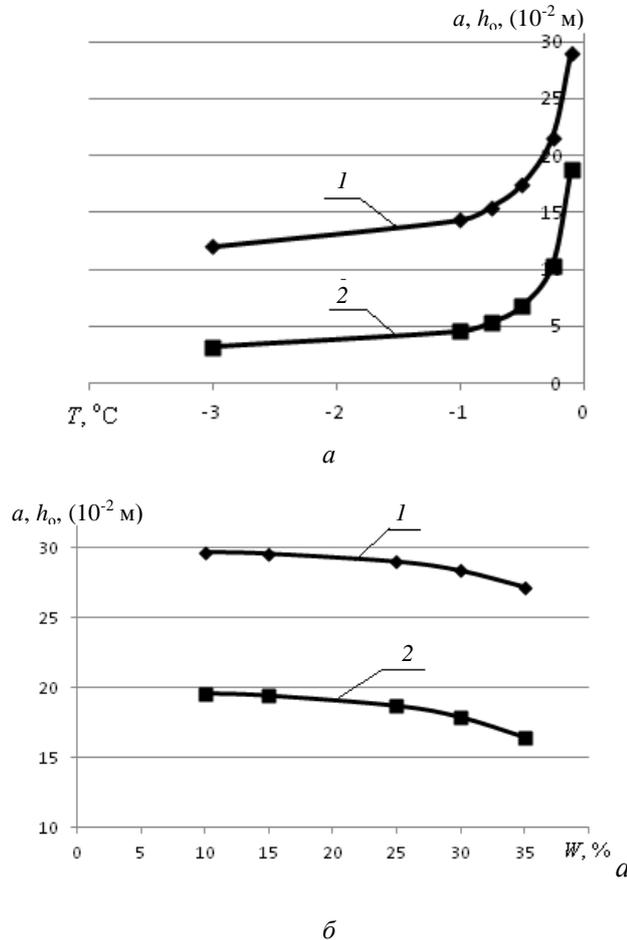


Рис. 5. Влияние температуры (а) и влажности грунта (б) на контактные параметры  $a$  и  $h_o$   
 Fig. 5. Influence of temperature (a) and soil humidity (b) on the contact parameters  $a$  and  $h_o$

Как видно из рис. 5, а, наиболее интенсивное снижение  $a$  и  $h_o$  наблюдается в диапазоне уменьшения температуры от  $-0,10$  до  $-0,35$  °C, т. е. при переходе температуры через  $-0,2$  °C. Характер дальнейшего снижения температуры можно считать асимптотическим.

Расчеты по выявлению влияния влажности  $W$  (рис. 5, б) на контактные параметры показали, что при ее увеличении и переходе от нормального состояния к влажному наблюдается некоторое относительное снижение  $a$  и  $h_o$ , не превышающее 12...15 %, что оказывает незначительное влияние на процесс уплотнения мерзлого почвогрунта под действием трелевочной системы.

Оценим влияние удельной статической нагрузки  $m$  на глубину первичного погружения трелевочной системы  $h_o$ . Результаты расчетов показали, что зависимость  $h_o(m)$  подчиняется степенному закону:

$$h_0 = 2,4546 m^{0,5452}. \quad (7)$$

Использование соотношения (7) в сочетании с формулой (1) позволяет установить связь между параметром удельной нагрузки  $m$  и прогнозными для расчетов значениями температуры почвогрунта в процессе контактного воздействия на него трелевочной системы и погружения на глубину  $h_0$ .

С учетом разнонаправленного влияния параметров  $T$  и  $m$  на  $h_0$  особый интерес вызывает анализ двумерной функции  $h_0(T, m)$ , результаты которого показали, что при температуре ниже  $-0,35...-1,00$  °С (т. е. при переходе почвогрунта в устойчивое мерзлое состояние) рост  $m$  до максимальных значений ( $m = 53,3$  т/м) не выводит значения глубины погружения  $h_0$  за пределы  $0,05$  м.

Для талых и слегка подмороженных на поверхности почвогрунтов ( $T > -0,35$  °С) относительно небольшие статические нагрузки (до  $m = 33,3$  т/м) от действия трелевочной системы увеличивают  $h_0$  в 3–4 раза, т. е.  $h_0 = 0,15...0,20$  м.

Эти выводы хорошо согласуются с положениями ГОСТ 12248–2010, где состояние оттаивания мерзлого грунта характеризуется как состояние перехода, при котором разрушаются криогенные структурные связи. При этом устойчивое состояние мерзлого грунта наблюдается при значениях температуры ниже температуры замерзания на  $0,5$  °С для слабо засоленных грунтов и на  $1,0$  °С для засоленных мерзлых грунтов.

#### Заключение

На установленных глубинах  $h_0$  при условии податливости почвогрунта формируется так называемое первичное ядро его уплотнения. В том случае, если компоненты поля напряжений на больших глубинах обеспечат выполнение принятых критериев разрушения мерзлого почвогрунта, ядро уплотнения будет перемещаться вниз и почвогрунт под действием трелевочной системы получит дополнительное уплотнение. Необходимо отметить, что процесс погружения ядра уплотнения сопровождается понижением температуры, что в свою очередь обуславливает рост прочности и модуля упругости.

Установленные закономерности влияния температуры и влажности мерзлых грунтов на показатели их физико-механических свойств позволяют более точно оценивать значения начальных контактных параметров в процессе трелевки пачки лесоматериалов с заранее заданными статическими нагрузками.

Полученные результаты являются основой для формирования начальных условий при расчетах параметров разрушения напряженно-деформированного массива мерзлого почвогрунта и процессов его уплотнения под действием статических нагрузок, возникающих при эксплуатации лесных машин и трелевочных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на Крайнем Севере: справ. пособие. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с.
2. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
3. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2008. № 6. С. 129–133.

4. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гумерова О.М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Изв. СПбЛТА. 2010. № 193. С. 211–221.

5. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования: науч. изд. СПб.: СПбЛТА. 2006. 236 с.

6. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.

7. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 224 с.

8. СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства. М., 2016. 204 с.

9. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

10. Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2. С. 94–100.

11. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естеств. и техн. науки. 2006. № 1. С. 174–180.

12. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Лесн. журн. 2008. № 4. С. 44–51. (Изв. высш. учеб. заведений).

13. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation C // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2012. Vol. 5(54), no. 1. Pp. 7–12.

14. Bereziuc R., Alexandru V., Ciobanu V., Antoniadu C. The Analysis of the Unrigid Road Systems Bearing Capacity from the Forest Roads through the Actual Dimensioning Methods // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2011. Vol. 4(53), no. 1. Pp. 1–6.

15. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The Way to Reduce Ecological Impact on Forest Soils Caused by Wood Skidding // Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems, June 19–25, 2014. Albena, Bulgaria, 2014. Vol. 2, no. SGEM2014. Pp. 501–508. DOI: 10.5593/SGEM2014/B32/S14.067

16. Sparchez Gh., Derczeni R., Iordache E., Drosos V. The Impact of Different Carriages on Soil and Trees during Skidding in the Romanian Forests // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2009. Vol. 2(51). Pp. 35–44.

17. Ticu S., Alexandru V. Aspects Regarding Forest Pollution with Dust Provoked by Timber Road Transportation // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2012. Vol. 5(54), no. 1. Pp. 115–122.

Поступила 03.07.18

UDC 634.037.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

**Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils***S.E. Rudov*<sup>1</sup>, *Candidate of Engineering Sciences**V.Ya. Shapiro*<sup>2</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor**I.V. Grigor'ev*<sup>3</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor**O.A. Kunitskaya*<sup>3</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor**O.I. Grigor'eva*<sup>2</sup>, *Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor*<sup>1</sup>Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru<sup>3</sup>Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye, 3 km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Logging in the Far North is carried out under extremely difficult climatic conditions. In the traditional for timber harvesting winter period, forestry equipment in these areas cannot operate due to the extremely low temperatures which vehicle metal and hydraulics do not withstand. Therefore, the period of sustainable logging operations and removal of harvested wood is relatively short. Changes of ambient air temperature from negative to positive values are common to sharp continental climate, for example, to the Republic of Sakha (Yakutia). This stops logging in the most part of the cutting areas due to thawing of frozen soils. In operation of skidding systems it is important to take into account that frozen soil is a complex multicomponent environment. Based on the research results, it has been found that at certain depths, under the pliability condition, the so-called primary bulb of pressure is formed. If the stress field components at deep depths implement the accepted standards of frozen soil destruction, the bulb of pressure will move down and receive additional compaction under the weight of the skidding system. The immersing of bulb of pressure is accompanied by decrease in temperature followed by strength enhancement and modulus of elasticity increase. Thus, the established patterns of temperature and humidity influence of frozen soils on their physical and mechanical properties allow us to estimate more accurately the value of initial contact parameters during the skidding of a timber bundle with predetermined static loads. The obtained results provide a basis for the formation of initial conditions at calculations of destruction parameters of the stress-strain block of frozen soils and their compaction under the action of static loads arising from the operation of various forest machines and skidding systems.

*Keywords:* frozen soils, logging, skidding system, compaction and deformation of soils.

## REFERENCES

1. Velli Yu.Ya., Dokuchayev V.V., Fedorov N.F. *Zdaniya i sooruzheniya na Kraynem Severe: sprav. posobiye* [Buildings and Structures in the Far North: A Reference Book]. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1963. 492 p. (In Russ.)
2. Vyalov S.S. *Reologiya merzlykh gruntov* [Rheology of the Frozen Soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2000. 464 p. (In Russ.)
3. Gazizov A.M., Shapiro V.YA., Grigor'yev I.V. *Vliyaniye vlazhnosti na razvitiye protsessa razrusheniya kory pri rotornoy okorke* [Influence of Humidity on Development of

---

*For citation:* Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'eva O.I. Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 106–119. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

Bark Destruction in Rotary Debarking]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 6, pp. 129–133.

4. Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Gumerova O.M. Modelirovaniye protsessa razrusheniya kory pri okorke rezaniyem [Modeling of Bark Destruction during Barking by Cutting]. *Izvestiya SPbLTA* [Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii], 2010, no. 193, pp. 211–221.

5. Grigor'yev I.V. *Snizheniye otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trel-evochnykh traktorov obosnovaniyem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya: nauch. izdaniye* [Reduction of the Negative Effect from Wheeled Skidders on Soils by Substantiation of Modes of Their Movement and Technological Equipment: Scientific Publication]. Saint Petersburg, SPbSFTU Publ., 2006. 236 p. (In Russ.)

6. Dalmatov B.I. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty: ucheb.* [Soil Mechanics, Substructures and Foundations: Textbook]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988. 415 p. (In Russ.)

7. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktного razrusheniya* [Mechanics of Contact Destruction]. Moscow, LKI Publ., 2010. 224 p. (In Russ.)

8. SP 287.1325800.2016. *Sooruzheniya morskoye prichal'nyye. Pravila proyektirovaniya i stroitel'stva* [Marine Berthing Facilities. Rules for Design and Construction]. Moscow, 2016. 204 p.

9. Tsytoich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.)

10. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V. Deformatsiya i tsiklicheskoye uplotneniye pochvogrunta mezhdru gruntozatsepami krupnogabaritnykh lesnykh shin [Deformation and Cyclic Compaction of Soils between the Cleats of Giant Forest Tires]. *Tekhnika i tekhnologiya*, 2006, no. 2, pp. 94–100.

11. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Zhukova A.I. Vliyaniye sdvigovykh deformatsiy na protsess tsiklicheskogo uplotneniya pochvy [Influence of Shearing Deformation on Soil Cyclic Compaction]. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki*, 2006, no. 1, pp. 174–180.

12. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Zhukova A.I. Otsenka protsessov deformirovaniya pochvy pri tsiklicheskom uplotnenii [Assessment of Soil Deformation under Cyclic Compaction]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2008, no 4, pp. 44–51.

13. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation C. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 7–12.

14. Bereziuc R., Alexandru V., Ciobanu V., Antoniadu C. The Analysis of the Unrigid Road Systems Bearing Capacity from the Forest Roads through the Actual Dimensioning Methods. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2011, vol. 4(53), no. 1, pp. 1–6.

15. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The Way to Reduce Ecological Impact on Forest Soils Caused by Wood Skidding. *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems, June 19–25, 2014, Albena, Bulgaria*. 2014, vol. 2, no. SGEM2014, pp. 501–508. DOI: 10.5593/SGEM2014/B32/S14.067

16. Sparchez Gh., Derczeni R., Iordache E., Drosos V. The Impact of Different Carriages on Soil and Trees during Skidding in the Romanian Forests. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2009, vol. 2(51), pp. 35–44.

17. Ticu S., Alexandru V. Aspects Regarding Forest Pollution with Dust Provoked by Timber Road Transportation. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 115–122.

Received on July 03, 2018

УДК 634.0.36

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.120

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СУЧКОРЕЗНОГО НОЖА ХАРВЕСТЕРНОЙ ГОЛОВКИ\*

*К.П. Рукомойников, д-р техн. наук, доц.*

*С.В. Ведерников, магистрант*

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,  
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000;  
e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net, Vedernikov1995@yandex.ru

В последнее десятилетие развитие лесозаготовительной промышленности в мире характеризуется существенным увеличением разнообразия автопарка лесозаготовительной техники. Спрос на современное высокопроизводительное оборудование, позволяющее повысить эффективность обработки леса, вынуждает ученых и производителей лесных машин разрабатывать новую технику и регулярно совершенствовать ее действующие модели. Особый интерес вызывает улучшение конструкций рабочих органов многофункциональных лесозаготовительных машин (харвестеров и процессоров). Цель предлагаемой модернизации сучкорезного органа – снижение воздействия диссипативных сил и энергоемкости процесса путем своевременного перевода ножа в положение срезания сучьев и удаления его от ствола дерева при их отсутствии. Это достигается за счет того, что перемещение сучкорезного ножа из наклонного (нерабочего) положения в рабочее, параллельное направлению подачи ствола дерева, происходит после воздействия на корпус ножа внешней нагрузки, передаваемой ему при смещении расположенного перед ножом толкателя. Толкатель смещается за пределы действия режущей кромки сучкорезного ножа под действием нагрузки от срезаемых сучьев и возвращается в первоначальное положение сразу после срезания. В результате использования предлагаемого способа работы сучкорезного ножа осуществляется его быстрое и своевременное перемещение в рабочее или нерабочее положение. При воплощении в жизнь нового технического решения особое внимание уделялось прочности и надежности конструкции, работающей при высоких нагрузках, снижению чувствительности сучкорезного ножа к загрязнениям и постоянным ударам. Внедрение предложенного варианта работы сучкорезного ножа для очистки ствола деревьев от сучьев позволит уменьшить воздействие диссипативных сил, снизить энергоемкость процесса и повысить качество обработки дерева на этой операции технологического процесса.

*Ключевые слова:* валка леса, лесозаготовительная техника, харвестер, сучкорезный нож, харвестерная головка, диссипативные силы.

### *Введение*

Развитие лесозаготовительной промышленности в мире в последнее десятилетие характеризуется существенным повышением разнообразия автопарка лесных машин. Спрос на современное высокопроизводительное оборудо-

---

\**Финансирование:* Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «Мартрейд» в рамках научно-исследовательской темы № 06.522/18.

*Для цитирования:* Рукомойников К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.120

дование, позволяющее повысить эффективность обработки леса, вынуждает разработчиков и производителей лесозаготовительной техники создавать новые и регулярно совершенствовать действующие образцы.

Одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся направлений при заготовке лесоматериалов является использование современных лесозаготовительных машин, способных выполнять очистку деревьев от сучьев на лесосеке [1]. К таким машинам можно отнести харвестеры и процессоры. Без применения прогрессивных технологий ведения работ в лесу невозможно повышать выработку лесозаготовительных предприятий, улучшать качество освоения лесосек, снижать отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Следовательно, модернизация технологического оборудования (харвестеров и процессоров) актуальна в настоящее время и имеет научное и практическое значение.

Многие российские ученые занимались и занимаются решением задач по совершенствованию конструкции рабочих органов сучкорезных и сучкорезно-раскряжевочных машин. Среди них В.С. Сюнев [6], П.М. Мазуркин [4], Ф.В. Пошарников [5] и др. П.В. Будником и А.В. Демчуком [1, 2] на основании функционально-технологического анализа харвестерной головки построена матрица развития, в которой сформулированы основные пути ее совершенствования. Среди прочих направлений повышения эффективности функционирования харвестерной головки выделена необходимость снижения воздействия диссипативных сил при протаскивании дерева через нее.

Конструктивно харвестерная и процессорная головки аналогичны друг другу и предусматривают наличие подвижных сучкорезных ножей, расположенных с двух сторон и одновременно выполняющих роль захватов. Условно неподвижный сучкорезный нож, расположенный на верхней части корпуса устройства, способствует обрезке сучьев со стороны ствола дерева, недоступной для лезвий подвижных сучкорезных ножей.

Существуют различные виды технических решений работы харвестерных головок. Например, в конструкциях [3, 9, 10] используется сучкорезный нож, жестко закрепленный на корпусе.

Недостатком данного варианта является повышенная вероятность нежелательного внедрения ножа в неровности ствола дерева. Нежелательные последствия – дополнительные энергетические затраты на обработку ствола и повреждения древесины. Эта проблема часто возникает при обработке дуба, бука, березы и других пород деревьев, характеризующихся более искривленной формой ствола. Необходимо отметить, что у многих пород ветви расположены лишь в вершинной части дерева, следовательно, соприкосновение сучкорезного ножа с нижней частью ствола приводит к возникновению излишних диссипативных сил.

В различных конструктивных решениях используемые сучкорезные ножи бывают как неподвижные, так и условно подвижные, способные перемещаться по шероховатой поверхности ствола поваленного дерева. Примеры ножей для срезания сучьев подробно рассмотрены в работах [7, 8]. Возможно использование сучкорезных ножей поворотной конструкции. Режущая кромка ножей при отсутствии нагрузки от срезаемых сучьев может быть смещена от ствола дальше, чем обычно, благодаря возможности наклона ножей. Подобная конструкция и применяемый в ней принцип работы сучкорезного ножа рассмотрен в [3] и в отличие с другими харвестерными и процессорными голов-

ками характеризуется подачей ствола в продольном направлении посредством механизма, состоящего из нескольких протаскивающих вальцов. Ствол движется сквозь кольцо, образованное из сучкорезных ножей, выполняющих роль захватов, а со стороны ствола, примыкающей к корпусу устройства, обрабатывается сучкорезным ножом, который имеет поперечную ось вращения для наклона. Причем этот нож, находясь в рабочем положении, расположен параллельно направлению подачи ствола, но при отсутствии нагрузки от соприкосновения с сучьями может быть наклонен за счет его поворота относительно поперечной оси вращения и отодвинут от ствола в нерабочее положение. Однако в предложенной конструкции не учитывается форма основания и наклон сучьев при обработке некоторых пород деревьев, что может быть существенным препятствием для ее использования.

Цель предлагаемой нами модернизации сучкорезного ножа – снижение воздействия диссипативных сил и энергоемкости процесса очистки ствола от сучьев путем своевременного перевода ножа в положение срезания сучьев и удаления его от ствола дерева при их отсутствии, что будет способствовать повышению качества обработки дерева на этой технологической операции.

#### *Объекты и методы исследования*

При разработке нового технического решения, направленного на улучшение работы сучкорезного ножа, особое внимание уделялось прочности и надежности конструкции, что необходимо учитывать вследствие воздействия на него высоких нагрузок, а также снижению чувствительности ножа к загрязнениям и постоянным ударам. Кроме того, сучкорезный нож должен своевременно перемещаться в рабочее положение и быть доступен для обработки сучьев вровень с поверхностью ствола.

Поставленная при конструировании цель достигается за счет того, что перемещение сучкорезного ножа из наклонного (нерабочего) в рабочее положение, параллельное направлению подачи ствола дерева, происходит после воздействия на корпус ножа внешней нагрузки, передаваемой на него при смещении расположенного перед ножом толкателя. Толкатель смещается за пределы режущей кромки сучкорезного ножа под действием нагрузки от срезаемых сучьев и возвращается в первоначальное положение сразу после срезания сучьев сучкорезным механизмом.

Особенностью технического решения предлагаемого нового способа работы сучкорезного ножа является то, что верхняя его поверхность имеет выступающие шипы, которые входят в пазы установленного над ней направляющего элемента. Направляющий элемент закреплен на корпусе устройства параллельно направлению подачи ствола дерева. Внутри его находится толкатель, имеющий возможность возвратно-поступательного движения. Передняя часть толкателя выполнена в виде формы, аналогичной форме кромки лезвия сучкорезного ножа. При отсутствии внешних сил, возникающих при соприкосновении толкателя с сучьями обрабатываемого дерева, толкатель расположен перед сучкорезным ножом. При соприкосновении его сучьями возникает внешняя сила, смещающая толкатель внутри направляющего элемента к корпусу устройства. За счет такого перемещения толкатель нажимает на шипы, выступающие из верхней поверхности сучкорезного ножа, который переводится в рабочее положение.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Предлагаемая конструкция приведена на рис. 1, на котором изображен общий вид харвестерной головки при использовании предложенного технического решения.

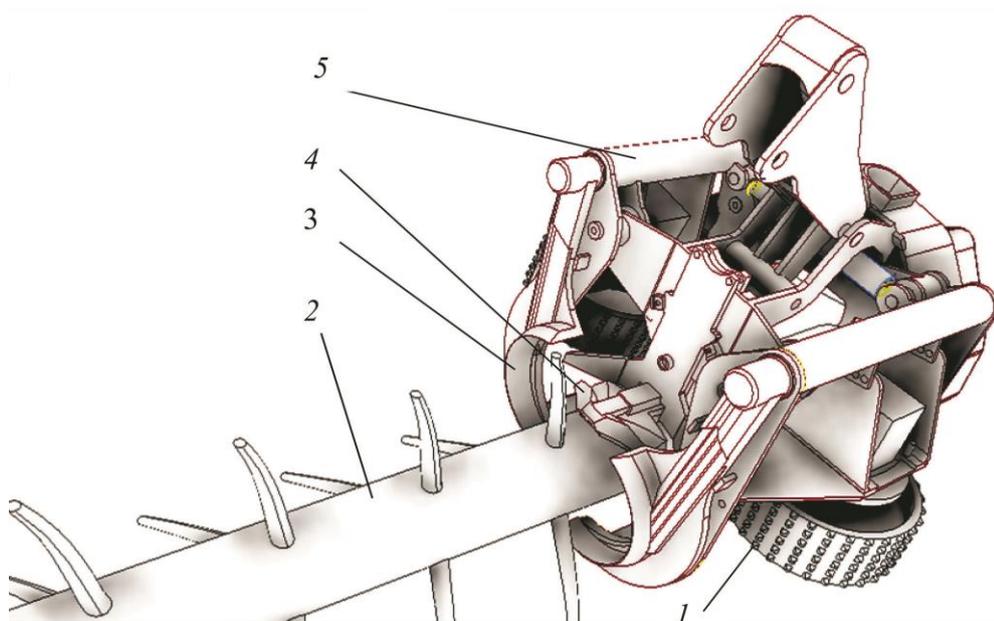


Рис. 1. Общий вид устройства  
Fig. 1. General view of the device

Устройство имеет несущий корпус с протаскивающими вальцами 1 для протаскивания ствола 2 сквозь кольцо, состоящее из подвижных 3 и условно неподвижного 4 сучкорезных ножей. Оси 5 предназначены для поворота подвижных сучкорезных ножей и захвата ствола.

На рис. 2 показаны рабочее и нерабочее положения условно неподвижного сучкорезного ножа, предназначенного для обработки части ствола со стороны, прижатой к корпусу харвестерной головки.

Механизм наклона условно неподвижного сучкорезного ножа состоит из пружин 1 и поперечной оси вращения 2. Направляющий элемент 3 установлен на корпусе устройства параллельно направлению осуществления подачи ствола протаскивающими вальцами. Внутри направляющего элемента расположен толкатель 4. Его передняя часть выполнена аналогично форме кромки лезвия сучкорезного ножа. Возвратное перемещение толкателя при исчезновении нагрузки от сучьев обеспечивается пружиной 5. Поверхность условно неподвижного сучкорезного ножа оснащена взаимодействующим с толкателем шипом 6, который имеет наклонную или дугообразную верхнюю переднюю кромку и фиксирует толкатель в нерабочем положении посредством паза 7, соответствующего форме и размерам шипа. Шип имеет наклонную кромку и соответствует форме и размерам паза. Для повышения надежности конструкции и фиксации ножа при возникновении ударных

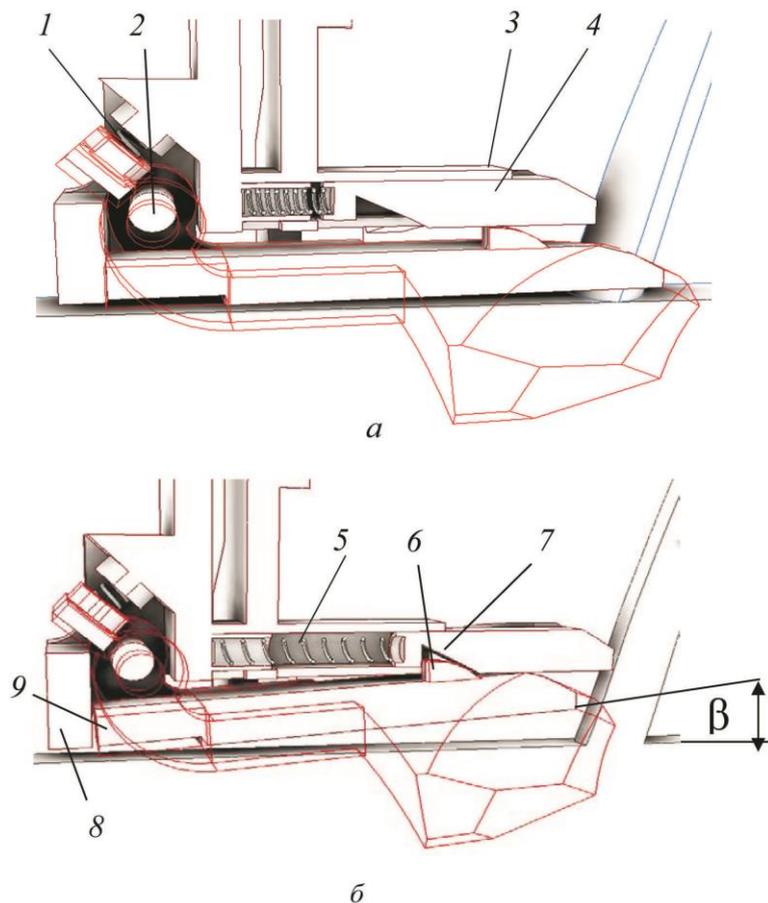


Рис. 2. Механизм для обрезки сучьев деревьев (в разрезе):  
*a* – рабочее положение; *б* – нерабочее положение

Fig. 2. Delimiting device (in section): *a* – operative position;  
*б* – nonoperative position

нагрузок от сучьев механизм оснащен ограничителем 8, спроектированным на корпусе устройства. При возникновении нагрузки от срезаемых сучьев нож прижимается к ограничителю посредством упора 9, расположенного в тыльной части ножа.

Работа сучкорезного ножа осуществляется в следующем порядке.

При обхвате ствола протаскивающими вальцами и сучкорезными ножами, выполняющими роль захватов, ножи образуют кольцо, через которое под влиянием протаскивающих вальцов перемещается ствол обрабатываемого дерева.

В целях снижения возможности внедрения ножа в ствол дерева условно неподвижный (находящийся в нерабочем положении) сучкорезный нож (рис. 2, *б*) повернут на угол  $\beta$  с помощью пружин механизма наклона ножа. При этом его режущая кромка отодвинута от ствола и не соприкасается с ним, а шип фиксирует толкатель, находясь в пазе. Такое положение условно неподвижного сучкорезного ножа применимо при обработке всех древесных пород, в том числе характеризующихся значительной неровностью поверхности ствола и отсутствием веток в нижней части.

При работе устройства и взаимодействии его с сучьями нагрузка от них поступает на толкатель. При этом толкатель сжимает пружину и прижимается внутри направляющего элемента к корпусу устройства. Толкатель смещает шип ножа, передавая на него нагрузку от сучьев. При скольжении наклонной поверхности шипа по поверхности толкателя происходит передача нагрузки на нож, поворачивающийся на поперечной оси и переходящий в рабочее положение (рис. 2, а). Под действием нагрузки толкатель смещается за режущую кромку условно неподвижного сучкорезного ножа. Режущая кромка движется по поверхности дерева с углом  $\beta = 0$  и входит во взаимодействие со срезаемым сучком. При достижении угла  $\beta = 0$  упор, предусмотренный в задней части ножа, соприкасается с ограничителем, принимающим на себя нагрузку и препятствующим дальнейшему повороту ножа относительно поперечной оси вращения.

При завершении срезания каждого сучка нагрузка исчезает и пружина, расположенная внутри направляющего механизма, выталкивает толкатель в нерабочее положение. Шип подпружиненного сучкорезного ножа, переходящего в нерабочее положение, скользит на наклонной поверхности паза толкателя и фиксирует его положение в направляющем элементе. Дальнейшее перемещение ножа вдоль ствола до начала взаимодействия со следующим сучком дерева осуществляется в первоначальном нерабочем положении. При возникновении нагрузки от взаимодействия толкателя со следующим срезаемым сучком все операции повторяются.

#### *Заключение*

Использование предложенного варианта работы сучкорезного ножа при конструировании рабочих органов машин для очистки деревьев от сучьев снизит воздействие диссипативных сил и энергоемкость рассматриваемой операции технологического процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будник П.В., Демчук А.В. Функционально-технологический анализ харвестерной головки // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 9(15). С. 36–38.
2. Демчук А.В. Модернизация технологического оборудования харвестера для повышения эффективности вывозки сортиментов // Инж. вестн. Дона. 2012. № 2. С. 542–546.
3. Кескинен Д., Кайнинен К., Ханне К. Валочное устройство для валки и обрезки сучьев на стволах деревьев и лезвие для обрезки сучьев: пат. РФ 2 513 415 С2, МПК А 01 G 23/083. Заявл. 15.01.2010; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 6.
4. Мазуркин П.М. Поискное конструирование лесотехнического оборудования: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Сарат. ун-та, Саран. фил., 1990. 304 с.
5. Пошарников Ф.В., Юдина Н.Ю., Буланов А.С., Леденцов П.Г. Анализ состояния технического оснащения лесозаготовительной промышленности // Лесотехн. журн. 2012. № 2. С. 100–105.
6. Сюнёв В.С., Селиверстов А.А. Рабочие органы харвестеров: проектирование и расчет: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 204 с.
7. Eriksson J.A.L. Device in an Apparatus for Processing Trees.: Patent US, no. 4,194,542. 1980.
8. Moisio J. Timber Harvester. Patent US, no. 5,732,754. 1998.

9. Niemi P. Delimiting Device and a Method in a Delimiting Device.: Patent US, no. US 6,318,425 B1. 2001.

10. Wildey A.J. Tree Harvesting and Processing Head.: Patent US, no. 5,785,101. 1998.

Поступила 07.11.18

UDC 634.0.36

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.120

### **Modernization of Harvester Head Delimiting Knife**

*K.P. Rukomoynikov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor*

*S.V. Vedernikov, Master Degree Student*

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation; e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net, Vedernikov1995@yandex.ru

In recent decade, the development of the logging industry in the world is defined by a significant increase in the diversity of logging vehicle fleet. The demand for modern high-capacity equipment, which allows increasing of forest processing efficiency, forces scientists and forest vehicles manufacturers to develop new equipment and regularly improve its existing models. Design development of multifunctional harvesting equipment working bodies (harvesters and processors) is of particular interest. The purpose of the proposed delimiting knife modernization is impact reduction from dissipative forces and energy intensity of the process by forehanded moving the knife to the position of cutting limbs off and removing the knife from the tree trunk in their absence. This is achieved due to the fact that delimiting knife movement from angular (nonoperative) position to operative position parallel to tree trunk feed direction occurs after the knife body undergoes an external load from displacement of a pusher located in front of the knife. The pusher is shifted beyond the area of delimiting knife cutting edge under the load from cutting limbs and returned to its original position immediately after cutting. As a result of using the proposed delimiting knife operation method, the knife is moved quickly and in a well-timed manner to operative or nonoperative position. Special attention in realization of the new technical solution was paid to strength and reliability of construction operating under high loads, reducing the sensitivity of the delimiting knife to dirt accumulation and constant impacts. Implementation of the proposed delimiting knife operation for tree trunk pruning will allow to decrease the influence from dissipative forces and energy capacity of the process, and to increase the quality of tree processing at this stage of the technological process.

*Keywords:* felling, logging equipment, harvester, delimiting knife, harvester head, dissipative forces.

---

*For citation:* Rukomoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 120–127. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.120

## REFERENCES

1. Budnik P.V., Demchuk A.V. Funktsional'no-tehnologicheskii analiz kharvesternoy golovki [Functional and Technological Analysis of Harvester Head]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Ways of Development], 2012, no. 9(15), pp. 36–38.
2. Demchuk A.V. Modernizatsiya tekhnologicheskogo oborudovaniya kharvestera dlya povysheniya effektivnosti vyvozki sortimentov [Modernization of Harvester Technological Equipment for Improving the Assortment Removal Efficiency]. *Inzhenernyy Vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, no. 2, pp. 542–546.
3. Keskinen J., Kinnunen K., Khamne K. *Valochnoye ustroystvo dlya valki i obrezki such'yev na stvolakh derev'yev i lezviye dlya obrezki such'yev* [Feller device for felling and limbing on tree trunks and blade for limbing]. Patent RF, no. RU 2 513 415 C2. 2010.
4. Mazurkin P.M. *Poiskovoye konstruirovaniye lesotekhnicheskogo oborudovaniya: ucheb. posobiye* [Exploratory Research Design of Forestry Equipment: Educational Textbook]. Saransk, Saransk Branch of Saratov University Publ., 1990. 304 p. (In Russ.)
5. Posharnikov F.V., Yudina N.Yu., Bulanov A.S., Ledentsov P.G. Analiz sostoyaniya tekhnicheskogo osnashcheniya lesozagotovitel'noy promyshlennosti [State Analysis of Technological Infrastructure of Logging Industry]. *Lesotekhnicheskii Zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2012, no. 2, pp. 100–105.
6. Syuneyev V.S., Seliverstov A.A. *Rabochiye organy kharvesterov: proektirovaniye i raschet: ucheb. posobiye* [Working Bodies of Harvesters: Engineering and Design: Educational Textbook]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2005. 204 p. (In Russ.)
7. Eriksson J.A.L. *Device in an Apparatus for Processing Trees*. Patent US, no. 4,194,542. 1980.
8. Moisio J. *Timber Harvester*. Patent US, no. 5,732,754. 1998.
9. Niemi P. *Delimiting Device and a Method in a Delimiting Device*. Patent US, no. US 6,318,425 B1. 2001.
10. Wildey A.J. *Tree Harvesting and Processing Head*. Patent US, no. 5,785,101. 1998.

Received on November 07, 2018

---



## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.933.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.128

### ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ЛЕСОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ

*Г.Ф. Прокофьев, д-р техн. наук, проф.*

*М.Ю. Кабакова, канд. техн. наук, доц.*

*Т.В. Цветкова, ст. преподаватель*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: g.prokofjev@narfu.ru, m.kabakova@narfu.ru, t.tsvetkova@narfu.ru

Техника в современном мире должна соответствовать требованиям интенсификации производства: приемлемая для потребителя цена, высокое качество, минимальная себестоимость. Кроме этого, она должна обладать патентной чистотой. Качество техники характеризуется производительностью, энергозатратами, надежностью, эргономичностью, эстетичностью, экологичностью, безопасностью, ремонтпригодностью, возможностью утилизации, а также высокими экономическими показателями (экономическим эффектом, рентабельностью, сроком окупаемости). Себестоимость включает затраты на персонал, проведение прикладных научных исследований, патентный поиск и проверку патентной чистоты, на материалы, сырье и комплектующие, энергию, изготовление и сборку изделия, содержание помещений и эксплуатацию технологического оборудования, реализацию изделия. Патентная чистота – юридическое свойство объекта техники, заключается в том, что его можно использовать в данной стране без опасности нарушения действующих на ее территории патентов исключительного права, принадлежащих третьим лицам. Конструкторам современной техники при создании новых лесопильных станков, соответствующих перечисленным выше требованиям, следует применять и современные методы конструирования. В статье рассмотрены примеры использования этих методов при совершенствовании лесопильного оборудования.

*Ключевые слова:* инверсия, эмпатия, аналогия, компенсация, комбинирование, агрегирование, компаундирование, конструктивная преемственность.

При разработке и совершенствовании лесопильного оборудования целесообразно использование следующих современных методов.

*Инверсия* – получение новой конструкции путем изменения функций, форм и расположения ее частей. Возможны следующие варианты инверсии: ведущий элемент становится ведомым, охватывающий – охватываемым, неподвижный – подвижным (или наоборот); деформация растяжения заменяется

---

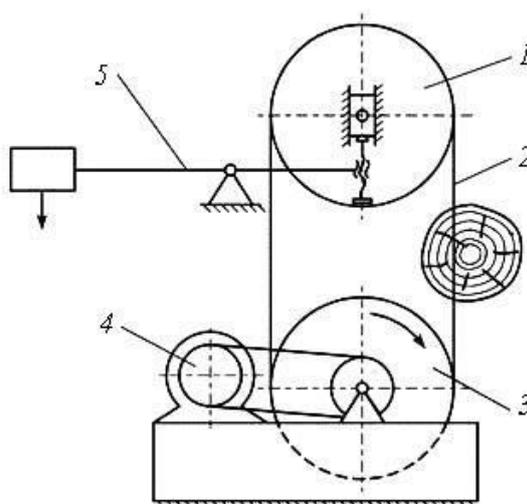
*Для цитирования:* Прокофьев Г.Ф., Кабакова М.Ю., Цветкова Т.В. Применение современных методов конструирования при совершенствовании лесопильных станков // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 128–140. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.128

на деформацию сжатия. Инверсия позволяет создавать новые оригинальные конструкции. Конструктор должен проанализировать исходный и инверсионный варианты и выбрать лучший из них.

Пример 1. В лесопилении широкое применение нашли ленточнопильные станки. Схема ленточнопильного станка традиционной конструкции с пильными шкивами приведена на рис. 1.

Рис. 1. Традиционная конструкция ленточнопильного станка с пильными шкивами: 1 – ведомый шкив; 2 – пила; 3 – ведущий шкив; 4 – электродвигатель; 5 – механизм натяжения пилы

Fig. 1. Traditional design of a bandsaw machine with saw pulleys: 1 – driven pulley; 2 – saw; 3 – leading pulley; 4 – electromotor; 5 – saw tensioner



Достоинства таких станков: малая ширина пропила, хорошее качество пиломатериалов по шероховатости их поверхностей, не требуют массивных фундаментов. Их недостатки: низкая точность пиления при высоких скоростях подачи, малая долговечность пил, большие габариты и металлоемкость.

Применяя метод инверсии, можно создать новый ленточнопильный станок, лишенный отмеченных недостатков. Проф. Г.Ф. Прокофьев предложил заменить вращающиеся пильные шкивы невращающимися криволинейными аэростатическими направляющими (а. с. № 408773) [1]. Конструкция такого станка показана на рис. 2.

Инверсия позволяет создать ленточнопильный станок, обеспечивающий высокую точность пиления, повышенную долговечность пил, снижение габаритных размеров и металлоемкости. Подробнее описание ленточнопильных станков такого типа приведено в работе [15].

Пример 2. Лесопильные рамы широко применяются в лесопилении благодаря их универсальности, проходному методу пиления блоком пил, низким требованиям к качеству сырья. Режущий инструмент лесопильных рам прост в изготовлении, подготовке и использовании. Недостатком лесопильных рам является большая свободная длина пил  $l$  (рис. 3, *a*), равная расстоянию между межпильными прокладками:

$$l = h_{\max} + H,$$

где  $h_{\max}$  – максимальная высота пропила, мм;  $H$  – ход пильной рамки, мм.

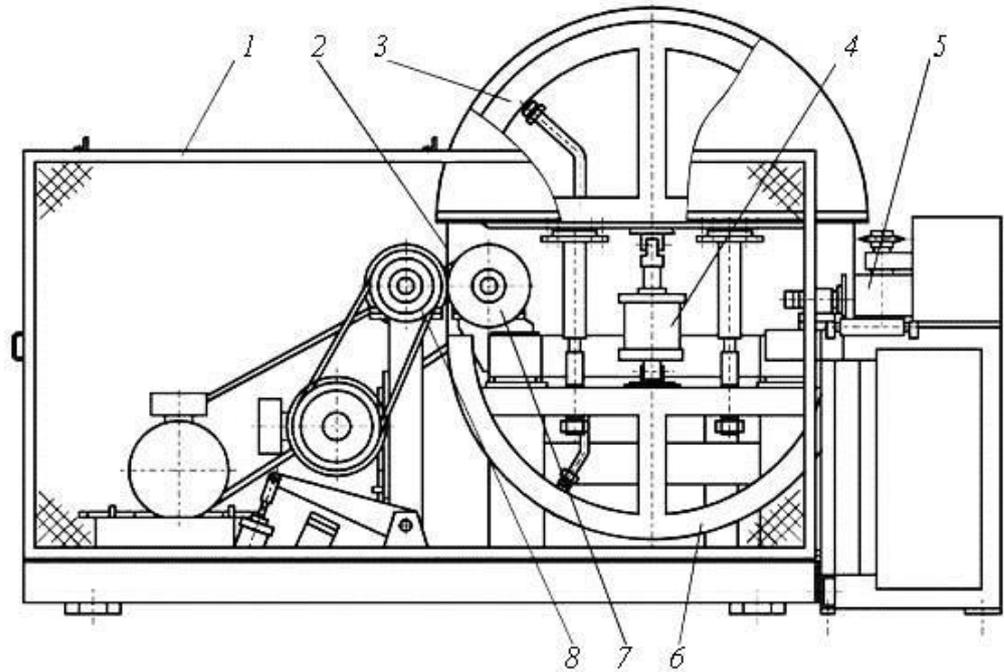


Рис. 2. Конструкция ленточнопильного станка с невращающимися криволинейными аэроэстатическими направляющими: 1 – ограждение; 2 – пила; 3, 6 – верхняя и нижняя криволинейные аэроэстатические направляющие; 4 – механизм натяжения; 5 – механизм подачи; 7, 8 – приводные фрикционные колеса

Fig. 2. Design of a bandsaw machine with irrotational cam aerostatic guides: 1 – fencing; 2 – saw; 3, 6 – upper and lower cam aerostatic guides; 4 – tensioner; 5 – feeder; 7, 8 – driving friction wheels

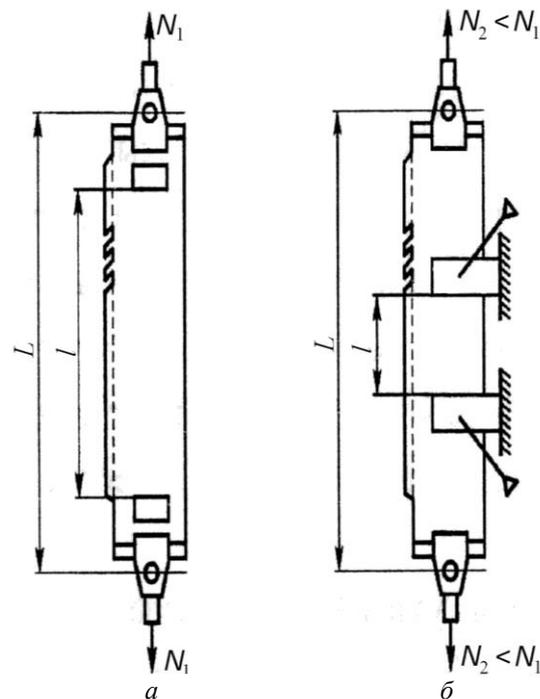


Рис. 3. Принципиальные схемы узла резания лесопильной рамы: а – традиционная конструкция; б – модернизированная конструкция

Fig. 3. Circuit diagrams of a frame saw machine cutting unit: a – traditional design; б – upgraded design

При  $h_{\max} = 300$  мм и  $H = 600$  мм имеем  $l = 900$  мм. При такой свободной длине для обеспечения требуемой точности пиления приходится натягивать пилы с большой силой, что снижает прочность их и элементов пильной рамки, или увеличивать толщину пил, что повышает энергозатраты и снижает объемный выход пиломатериалов.

Применим метод инверсии (рис. 3, б): вместо межпильных прокладок, совершающих возвратно-поступательное движение с пильной рамкой, установим над распиливаемым материалом и под ним неподвижные направляющие для пил, рабочие поверхности которых выполнены в виде аэростатических опор. При этом свободная длина пил уменьшится на величину хода пильной рамки ( $l = h_{\max}$ ), в нашем примере – в 3 раза. Это позволит повысить жесткость пил и точность пиления. Конструкция модернизированного узла резания приведена в работе [13].

*Эмпатия* – отождествление разработчика с конструкцией или процессом, попытка увидеть изнутри то, что можно изменить.

Пример. При пилении древесины на лесопильной раме с непрерывной подачей зубья пилы, установленной с уклоном, равным половине подачи за один оборот коленчатого вала, в конце холостого или в начале рабочего хода касаются дна пропила. Увеличение уклона пил приведет к возрастанию отхода зубьев от дна пропила, и с началом рабочего хода будет наблюдаться потеря хода, что нежелательно. При рабочем ходе скорость движения пил переменная, и зубья в древесине движутся по кривой (косинусоиде). Максимальная подача на зуб будет в начале и в конце рабочего хода пил. В начале холостого хода наблюдаются вдавливание зубьев в древесину и их скобление о дно пропила. Такая кинематика лесопильной рамы снижает качество пиломатериалов и приводит к возникновению больших пиковых сил резания, уменьшающих надежность работы элементов узла резания.

Необходимо изменить кинематику лесопильной рамы путем согласования скоростей резания и подачи (а. с. № 676444) [2, 13]. На рис. 4 приведена схема лесопильной рамы с измененной конструкцией узла резания. Зубья пил у такой рамы движутся по эллиптической траектории, что

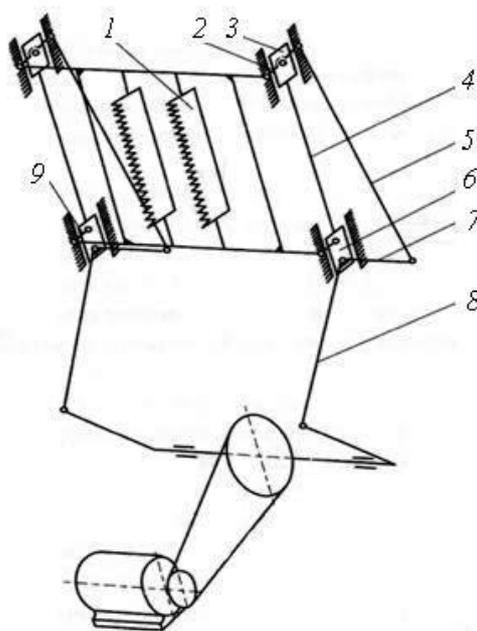


Рис. 4. Лесопильная рама с механизмом согласования скоростей резания и подачи: 1 – пила; 2, 7, 9 – рычаги; 3, 6 – ползуны; 4 – стойка; 5 – шатун кривошипно-коромыслового механизма; 8 – шатун кривошипно-ползунного механизма

Fig. 4. Frame saw machine with mechanism for matching of cutting and feed speeds: 1 – saw; 2, 7, 9 – levers; 3, 6 – slider blocks; 4 – leg; 5 – crank rod of crank-balance mechanism; 8 – crank rod of slider-crank mechanism

позволяет устранить основные недостатки, присущие лесопильным рамам традиционной конструкции.

*Аналогия* – использование технических решений из других отраслей промышленности и областей техники при создании новых конструкций для рассматриваемого промышленного объекта. Конструктивные решения могут быть заимствованы также из живой природы.

В теории механизмов и машин [8] рассматривается работа кулисных механизмов. Если расстояние  $e$  между осями кривошипа и кулисы выполнить меньше радиуса кривошипа  $r$  ( $\lambda = e/r < 1$ ), то получим кривошипно-кулисный механизм с вращающейся кулисой. Передаточное отношение такого механизма

$$i = \frac{1 + \lambda \cos \varphi}{1 + 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2},$$

где  $\varphi$  – угол поворота кривошипа кулисы.

Пример. Такой механизм может быть использован для согласования скоростей резания и подачи лесопильной рамы путем изменения механизма подачи (а. с. № 697318) [3]. Схема лесопильной рамы с кривошипно-кулисным механизмом согласования скоростей резания и подачи приведена на рис. 5.

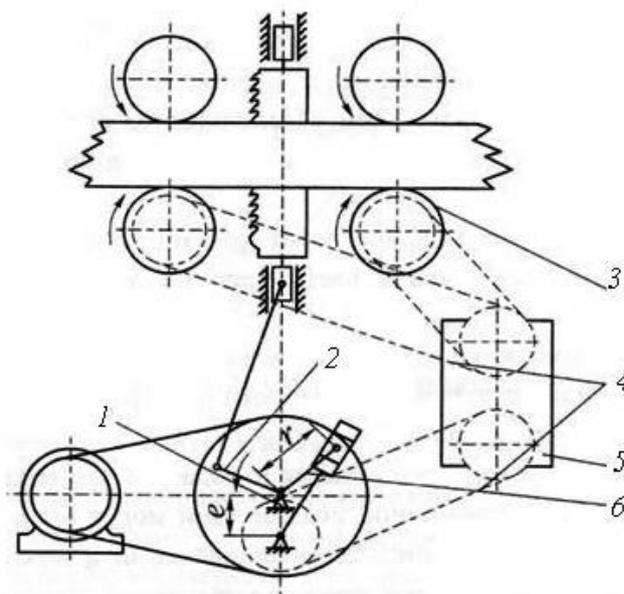


Рис. 5. Схема лесопильной рамы с кривошипно-кулисным механизмом согласования скоростей резания и подачи: 1 – кулиса; 2, 6 – кривошипы кривошипно-кулисного механизма и коленчатого вала лесопильной рамы; 3 – подающие вальцы; 4 – цепные передачи; 5 – вариатор

Fig. 5. Scheme of a frame saw machine with a crank-rocker mechanism for matching cutting and feed speeds: 1 – rocker; 2, 6 – cranks of crank-rocker mechanism and crankshaft of the frame saw machine; 3 – feed rollers; 4 – chain gears; 5 – variator

Испытания предложенного механизма на экспериментальной установке дали положительные результаты [15]. Выполненные теоретические исследования [14] позволили сделать следующие выводы:

1) уменьшаются максимальная подача на зуб при рабочем ходе пил и глубина вдавливания зубьев (скобления) в распиливаемый материал при холостом ходе соответственно на 20 и 22 %;

2) уклон пил  $Y$  должен соответствовать параметру кривошипно-кулисного механизма: при  $\lambda_k = 0; 0,3; 0,4; 0,5$  имеем  $Y = 0,500\Delta; 0,407\Delta; 0,379\Delta; 0,352\Delta$  ( $\Delta$  – подача распиливаемого материала за один оборот коленчатого вала, мм);

3) снижаются пиковые силы резания и увеличивается подача распиливаемого материала на 15...20 %.

*Компенсация* – уравнивание отрицательных факторов действиями противоположного знака.

Пример. При работе кривошипно-ползунного механизма лесопильных рам возникают большие силы инерции, вызванные возвратно-поступательным движением пильной рамки с поставом пил. Эти силы отрицательно влияют как на саму лесопильную раму, так и на окружающие механизмы, связанные с ее работой. Поэтому уравниванию сил инерции лесопильных рам должно уделяться большое внимание.

На рис. 6, *а* приведена схема кривошипно-шатунного механизма без уравнивания сил инерции, поэтому они передаются на станину и фундамент.

Вертикальные силы инерции можно полностью уравновесить за счет противовеса (рис. 6, *б*), но при этом возникают большие силы инерции от противовеса при нахождении кривошипа в горизонтальном положении. Поэтому идут на компромисс – вертикальные силы инерции уравниваются частично.

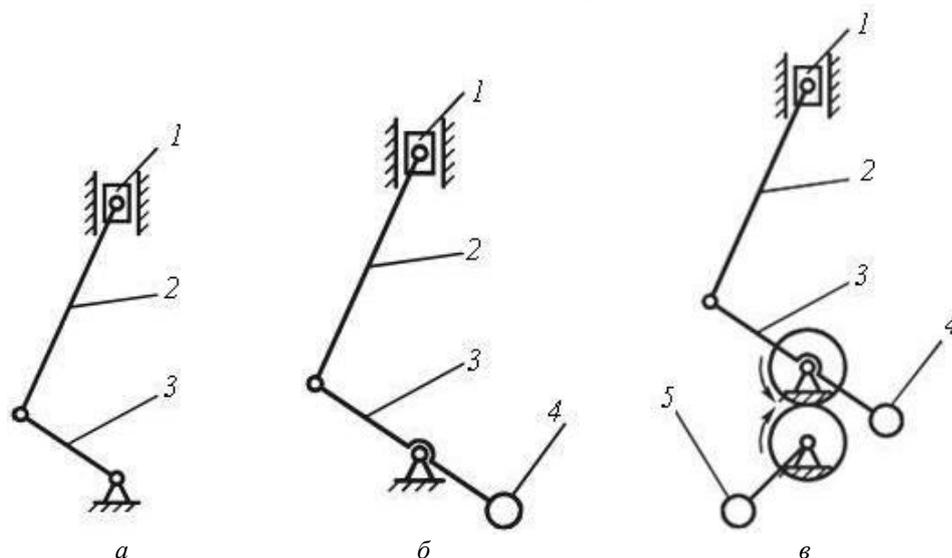


Рис. 6. Схемы кривошипно-ползунных механизмов: *а* – без уравнивания; *б* – частичное уравнивание; *в* – полное уравнивание; 1 – ползун; 2 – шатун; 3 – кривошип; 4 – противовес; 5 – дополнительный противовес

Fig. 6. Schemes of slider-crank mechanisms: *a* – without balancing; *б* – partial balancing; *в* – full balancing; 1 – slider block; 2 – crank rod; 3 – crank; 4 – balance weight; 5 – additional balance weight

Для полного уравнивания сил инерции кривошипно-ползунного механизма изобретатель Ланчестер предложил ввести в механизм дополнительный противовес, вращающийся в противоположную сторону с основным (пат. США № 1163832, 1915 г.). Принципиальная схема такого механизма приведена на рис. 6, в.

Вопросам виброактивности лесопильных рам и уравниванию сил инерции посвящено значительное количество работ [5, 7, 9, 11, 16–19], в большинстве из которых при уравнивании сил инерции лесопильных рам используется метод Ланчестера.

*Комбинирование* – использование в новом изделии сочетания различных конструкций, процессов.

Пример. Известен ленточнопильный станок с пилой, движущейся по криволинейным аэростатическим направляющим [15]. Принципиальная схема его приведена на рис. 7, а.

Существует конструкция линейного электродвигателя [6]. При комбинировании ленточнопильного станка с криволинейными аэростатическими направляющими и линейного электродвигателя получен новый ленточнопильный станок, принципиальная схема которого показана на рис. 7, б (а. с. № 8188662) [4].

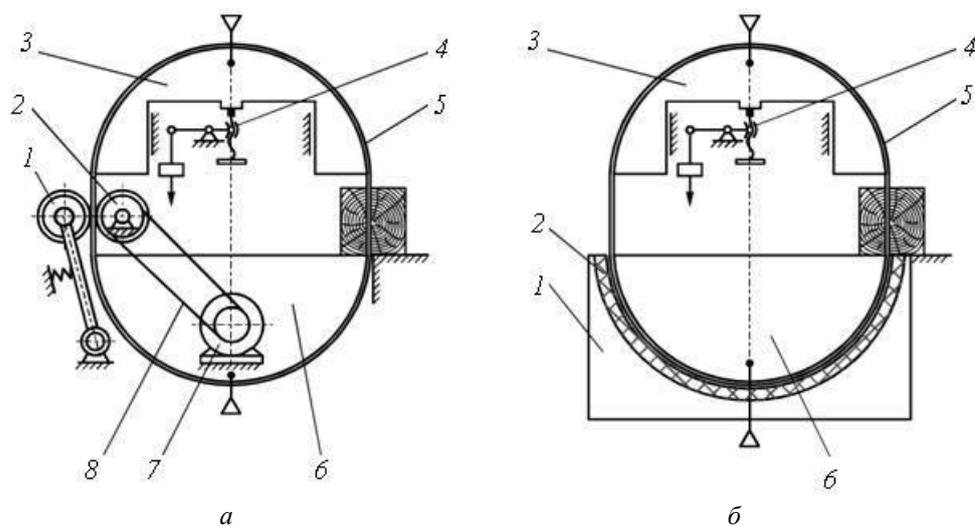


Рис. 7. Схемы узла резания ленточнопильного станка с криволинейными аэростатическими направляющими: а – привод пилы с помощью фрикционных колес: 1 – прижимное фрикционное колесо; 2 – приводное фрикционное колесо; 3, 6 – верхняя и нижняя направляющие; 4 – механизм натяжения; 5 – пила; 7 – электродвигатель; 8 – ременная передача; б – привод с помощью линейного электродвигателя: 1 – корпус статора; 2 – обмотка двигателя; 3, 6 – верхняя и нижняя направляющие; 4 – механизм натяжения; 5 – пила

Fig. 7. Schemes of a cutting unit of a band saw machine with cam aerostatic guides: а – drive the saw using friction wheels: 1 – clamping friction wheel; 2 – driving friction wheel; 3, 6 – upper and lower guides; 4 – tensioner; 5 – saw; 7 – electromotor; 8 – belt gear; б – drive the saw using a linear electromotor: 1 – stator shell; 2 – motor winding; 3, 6 – upper and lower guides; 4 – tensioner; 5 – saw

Бегущее магнитное поле статора, обмотка которого огибает нижнюю криволинейную аэростатическую направляющую, приводит в движение ленточную пилу, выполняющую функцию ротора электродвигателя. Так как магнитное поле статора одновременно огибает пилу от криволинейной направляющей, то имеем аэростатическую опору. Получается малогабаритный станок оригинальной конструкции лишь с одной подвижной деталью – ленточной пилой.

*Агрегатирование* – метод конструирования изделий на основании применения унифицированных и стандартных составных частей (модулей) путем изменения характера их соединений и пространственного сочетания применительно к заданным условиям. Агрегатирование сокращает трудоемкость проектирования и изготовления изделий, упрощает их эксплуатацию и ремонт [12].

При создании новых лесопильных линий необходимо использовать следующие модули: механизмы подачи, узлы резания (круглопильные, ленточнопильные, с полосовыми пилами, фрезерные), механизмы позиционирования узлов резания, сканирования пиловочного сырья для разработки оптимальных планов распиловки и режимов пиления, средств автоматизации для управления технологическим процессом.

*Компактирование* – метод создания нового изделия путем соединения двух или более одинаковых конструкций в целях увеличения мощности или производительности. Эти конструкции могут быть установлены параллельно как независимые или связаны между собой различными устройствами (синхронизирующими, транспортными и т. п.).

Пример. При использовании однопильного ленточнопильного станка для распиловки бревен на двухконтные брусья почти 2/3 времени расходуется на вспомогательные операции (установка бревна на тележку, остановка после первого пропила, смещение, возврат, кантовка).

Применение сдвоенного ленточнопильного станка позволяет производить пиление на проход и сразу получать двухконтный брус (пат. 2305625) [10], что увеличивает производительность до 6 раз (рис. 8).

Работает многопильный ленточнопильный станок данной конструкции следующим образом. С помощью программных средств в зависимости от размерно-качественных характеристик пиловочного сырья автоматически выбирается план его раскроя. Согласно ему подается команда на позиционеры для перемещения ленточнопильных модулей на расстояния, соответствующие плану раскроя. Одновременно с началом перемещения модулей включается подача к ползунам сжатого воздуха, образующего аэростатические опоры, что снижает трение ползунов о направляющие. При окончании перемещения модулей на заданные расстояния подача сжатого воздуха прекращается, одновременно включаются электромагниты. Такая конструкция многопильного станка обеспечивает высокую производительность, быстрое позиционирование модулей и жесткость их фиксации в процессе пиления.

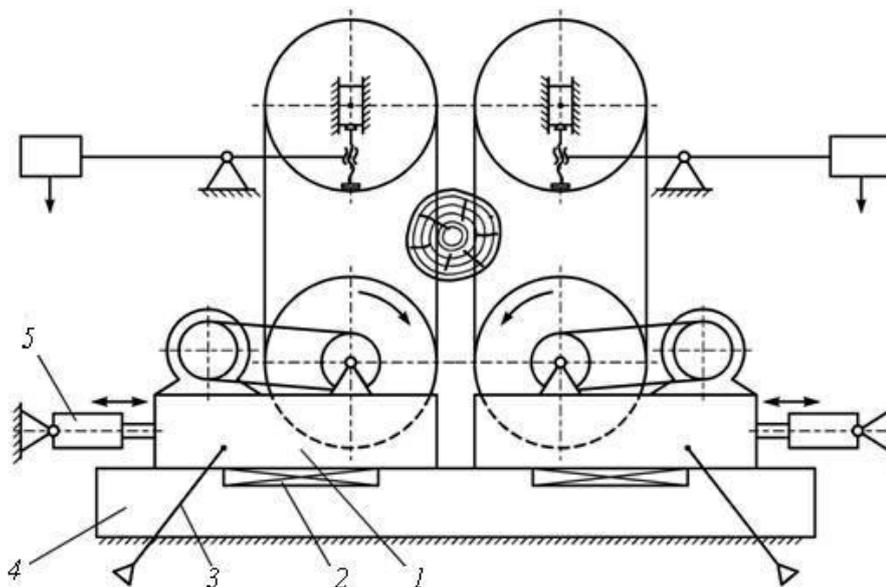


Рис. 8. Схема распиловки бревна с получением двухкантного бруса на сдвоенном ленточнопильном станке гибких автоматизированных лесопильных линий: 1 – подвижная станина однопильного модуля; 2 – электромагнит для жесткой фиксации модуля; 3 – воздухопровод; 4 – неподвижная станина сдвоенного станка; 5 – позиционер

Fig. 8. Scheme of log sawing for obtaining two-edged cant on a dual bandsaw machine of flexible wood-saw transfer lines: 1 – chassis frame of a single-blade unit; 2 – electromagnet for rigid fixation of the unit; 3 – air duct; 4 – fixed frame of a double edger; 5 – positioner

*Конструктивная преемственность* – это поэтапное совершенствование устройства изделия путем улучшения отдельных его деталей и узлов или введения дополнительных новых элементов.

Пример. На рис. 9 приведены варианты совершенствования узла резания ленточнопильного станка.

Пилы ленточнопильных станков, не имеющие направляющих (рис. 9, а), обладают недостаточной жесткостью и устойчивостью и не позволяют производить пиломатериалы с требуемой точностью. Такие станки не нашли применения в промышленности. Щелевые направляющие (рис. 9, б) широко используются в ленточнопильных станках благодаря простоте конструкции и низким требованиям к материалам, из которых они изготавливаются. Однако эти направляющие не оказывают влияния на устойчивость пилы и лишь частично повышают ее жесткость. Преимущественно они служат ограничителями предельных отклонений пилы во время работы.

Более эффективны односторонние отжимные направляющие (рис. 9, в). Они делают свободную длину пилы меньше в плоскости ее наименьшей жесткости, за счет этого повышаются ее жесткость и устойчивость, а также точность движения в зоне резания. Отжимные направляющие выполняются из дорогих тепло-износостойких материалов.

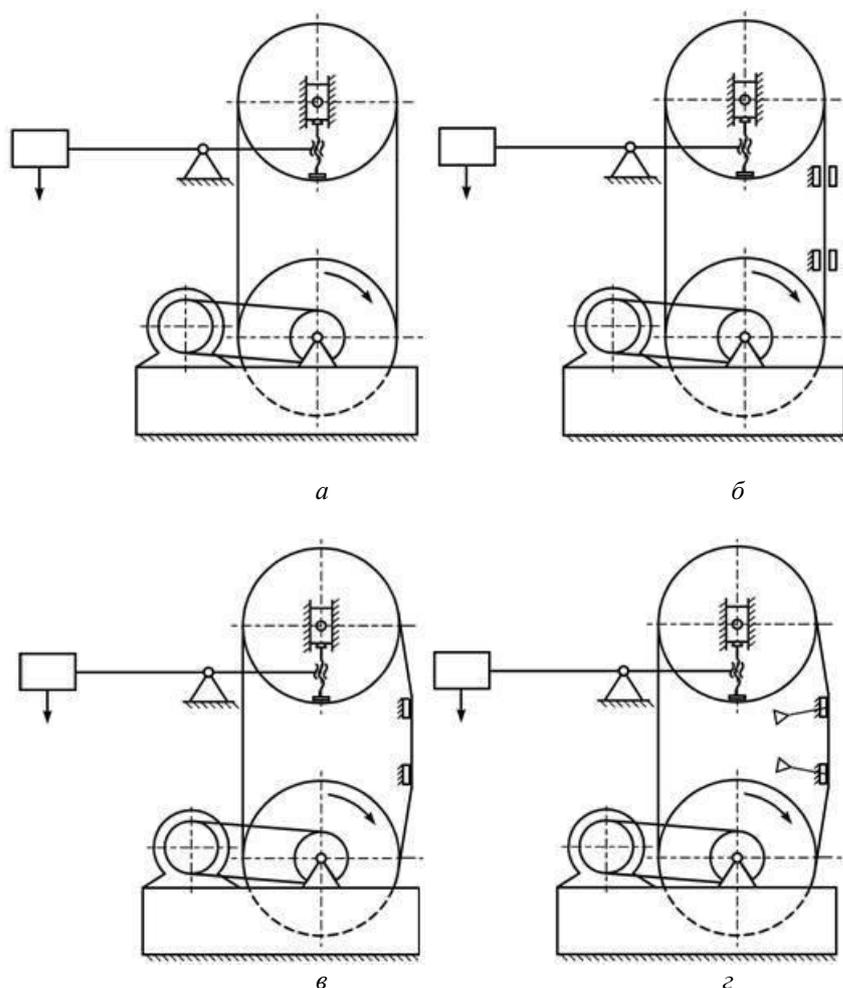


Рис. 9. Схемы совершенствования узла резания ленточнопильного станка: *а* – отсутствие направляющих у пилы; *б* – щелевые направляющие; *в* – отжимные контактные направляющие; *г* – отжимные направляющие, рабочие поверхности которых выполнены в виде аэроэстатических опор

Fig. 9. Development design of a bandsaw machine cutting unit: *a* – no saw guides; *б* – slotted guides; *в* – squeezing contact guides; *г* – squeezing guides, which working surfaces are designed as aerostatic supports

Существенно снизить трение полотна пилы о направляющие можно при использовании газовой смазки (рис. 9, *г*), т. е. когда рабочие поверхности отжимных направляющих выполняются в виде аэроэстатических опор. Достоинства таких направляющих: охлаждение пилы истекающим воздухом; максимальное снижение трения пилы о направляющие; отсутствие их износа; изготавливаются из недорогих тепло- и износостойких материалов.

Целесообразность применения отжимных аэроэстатических направляющих при модернизации ленточнопильных станков показана в работе [13].

#### Выводы

1. Основная задача, стоящая перед лесопильной отраслью страны, – интенсификация производства.

2. В процессе совершенствования лесопильных станков, создания новых станков на базе высоких технологий необходимо применять современные методы конструирования.

3. Приведены наглядные примеры использования современных методов конструирования при разработке технических решений, не имеющих аналогов за рубежом и направленных на совершенствование лесопильного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 408773 СССР, МКИ В 27 В 13/10. Ленточнопильный станок / Прокофьев Г.Ф. № 1802797/29-33; заявл. 29.06.72; опубл. 30.11.73, Бюл. № 48.
2. А. с. 676444 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 27 В 3/00. Лесопильная рама / Прокофьев Г.Ф. № 2172643/29-1; заявл. 15.09.75; опубл. 30.07.79, Бюл. № 28.
3. А. с. 697318 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 27 В 3/16, В 27 В 3/100. Механизм непрерывно-переменной подачи лесопильной рамы / Прокофьев Г.Ф. № 2610746/29-12; заявл. 04.05.78; опубл. 15.11.79, Бюл. № 42.
4. А. с. 818862 СССР, МКИ В 27 В 15/10. Ленточнопильный станок / Прокофьев Г.Ф. № 261072/29-15; заявл. 04.05.78; опубл. 07.04.81; Бюл. № 13.
5. Балагуров Н.Н. Уравновешивание возмущающих сил лесопильных рам // Механ. обработка древесины. 1971. № 9. С. 12–13.
6. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Саранулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
7. Дерягин Р.В. Уравновешивание кривошипно-ползунного механизма лесопильной рамы // Современные методы и средства уравновешивания машин и приборов: тез. докл. всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1979. С. 78–79.
8. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин: учеб. пособие для вузов. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1969. 583 с.
9. Малахов И.К. Расчет, конструирование, производство и эксплуатация лесопильных рам. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 436 с.
10. Пат. 2305625 Российская Федерация, МПК В 2 В 13/00. Многопильный ленточнопильный станок гибких автоматизированных линий / Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И. № 2005139675/03; заявл. 19.12.2005; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25.
11. Пат. № 2117306 (ФРГ), МКИ В 27 В 3/12. Приспособление для уравновешивания поступательно движущихся масс лесопильной рамы / Эстерер М. № P2117306.8.15; заявл. 08.04.71; опубл. 02.03.78.
12. Политехнический словарь / гл. ред. А.Ю. Ишлинский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. энцикл., 1980. 656 с.
13. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 240 с.
14. Прокофьев Г.Ф., Варфоломеев Ю.А. Применение кривошипно-кулисного механизма в качестве механизма согласования скоростей резания и подачи лесопильной рамы // Лесн. журн. 1990. № 3. С. 73–77. (Изв. высш. учеб. заведений).
15. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И. Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках: моногр. / под ред. Г.Ф. Прокофьева. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2009. 380 с.
16. Филькевич В.Я. Уравновешивание масс лесопильных рам. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1961. 116 с.
17. Якунин Н.К., Марнаутов Г.Е. Уравновешивание сил инерции в лесопильных рамах // Деревообаб. пром-сть. 1978. № 4. С. 10–12.
18. Holzweissig F., Meltzer G. Meßtechnik der Maschinendynamik. Leipzig: Fachbuchverlag, 1978. 418 S. (In German)
19. Kuhnert E., Hunger P. Schwingungsstillung an Gattersägemaschinen // Holzindustrie. 1976. В. 2. S. 58–60.

Поступила 18.01.18

UDC 621.933.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.128

### The Use of Modern Design Methods in Saw Machine Development

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

*M.Yu. Kabakova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*T.V. Tsvetkova, Senior Lecturer*

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

e-mail: g.prokofjev@narfu.ru, m.kabakova@narfu.ru, t.tsvetkova@narfu.ru

Modern equipment must comply with the production intensification requirements: price acceptable to consumer, high quality and low prime cost. Patent clearance factor is also important. Quality of equipment can be described by its efficiency, economic performance (economical effect, cost effectiveness, payoff period), power consumption, reliability, ergonomics, aesthetic qualities, environmental compliance, exploitation safety, maintainability and possibility of recycling. Prime cost includes personnel costs, carrying out applied researches, testing of patent clearance and patent search, raw materials and supplements, energy, manufacturing and assembling, maintenance and operation of technological equipment, product sales. Patent clearance is a legal property of a technological item. This means its ability to be freely used in the country without infringement of patents. Saw machine designers should use modern design methods to meet the requirements mentioned above. The article describes the examples of using these methods for development the sawmill equipment.

*Keywords:* inversion, empathy, analogy, balancing, combination, building block approach, compounding, succession in designing.

#### REFERENCES

1. Prokof'ev G.F. *Lentochnopil'nyy stanok* [Bandsaw Machine]. Authorship Certificate USSR, no. 1802797/29-33. 1973.
2. Prokof'ev G.F. *Lesopil'naya rama* [Frame Saw Machine]. Authorship Certificate USSR, no. 2172643/29-1. 1979.
3. Prokof'ev G.F. *Mekhanizm nepreryvno-peremennoy podachi lesopil'noy ramy* [The Mechanism of Continuous-Intermittent Feed of the Frame Saw Machine]. Authorship Certificate USSR, no. 2610746/29-12. 1979.
4. Prokof'ev G.F. *Lentochnopil'nyy stanok* [Bandsaw Machine]. Authorship Certificate USSR, no. 261072/29-15. 1981.
5. Balagurov N.N. Uravnoveshvaniye vozmushchayushchikh sil lesopil'nykh ram [Balancing the Exiting Forces of a Frame Saw Machine]. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny*, 1971, no. 9, pp. 12–13.
6. Veselovskiy O.N., Konyayev A.Yu., Sarapulov F.N. *Lineynyye asinkhronnyye dvigateli* [Linear Induction Motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p. (In Russ.)
7. Deryagin R.V. Uravnoveshvaniye krivoshipno-polzunnogo mekhanizma lesopil'noy ramy [Balancing the Slider-Crank Mechanism of a Frame Saw Machine]. *Sovremennyye metody i sredstva uravnoveshivaniya mashin i priborov: tez. dokl. vsoyuz.*

---

*For citation:* Prokof'ev G.F., Kabakova M.Yu., Tsvetkova T.V. The Use of Modern Design Methods in Saw Machine Development. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 128–140. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.128

*nauch.-tekhn. konf.* [Modern Methods and Means of Balancing Machines and Instruments: Report Abstracts of the All Union Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, 1979, pp. 78–79.

8. Kozhevnikov S.N. *Teoriya mekhanizmov i mashin: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Theory of Machines and Mechanisms: Educational Textbook for Higher Educational Institutions]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1969. 583 p. (In Russ.)

9. Malakhov I.K. *Raschet, konstruirovaniye, proizvodstvo i ekspluatatsiya lesopil'nykh ram* [Calculation, Design, Production and Use of Frame Saw Machines]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 436 p. (In Russ.)

10. Prokof'ev G.F., Ivankin I.I. *Mnogopil'nyy lentochnopil'nyy stanok gibkikh avtomatizirovannykh liniy* [Multi-Belt Saw]. Patent RF, no. 2305625. 2007.

11. Esterer M. *Prisposobleniye dlya uravnoveshivaniya postupatel'no dvizhushchikhsya mass lesopil'noy ramy* [The Device for Balancing the Reciprocating Masses of the Frame Saw Machine]. Patent FRG, no. 2117306. 1978.

12. *Politekhnicheskiy slovar'*. Editor in Chief A.Yu. Ishlinskiy. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1980. 656 p.

13. Prokof'ev G.F. *Intensifikatsiya pileniya drevesiny ramnymi i lentochnymi pilami* [Intensification of Timber Sawing with Frame and Band Saws]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 240 p. (In Russ.)

14. Prokof'ev G.F., Varfolomeyev Yu.A. *Primeneniye krivoshipno-kulisnogo mekhanizma v kachestve mekhanizma soglasovaniya skorostey rezaniya i podachi lesopil'noy ramy* [The Use of Crack-Rocker Mechanism as a Mechanism of Speed Matching of Frame Saw Machine Cutting and Feed]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1990, no. 3, pp. 73–77.

15. Prokof'ev G.F., Ivankin I.I. *Povysheniye effektivnosti pileniya drevesiny na lesopil'nykh ramakh i lentochnopil'nykh stankakh*: monogr. [Improving the Efficiency of Timber Sawing on Frame Saw and Bandsaw Machines: Monography]. Ed. by G.F. Prokof'ev. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2009. 380 p. (In Russ.)

16. Fil'kevich V.Ya. *Uravnoveshivaniye mass lesopil'nykh ram* [Mass Balancing of Frame Saw Machines]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1961. 116 p. (In Russ.)

17. Yakunin N.K., Marnautov G.E. *Uravnoveshivaniye sil inertsiy v lesopil'nykh ramakh* [Balancing the Fictitious Forces in Frame Saw Machines]. *Derevoobrabatvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking Industry], 1978, no. 4, pp. 10–12.

18. Holzweissig F., Meltzer G. *Messtechnik der Maschinendynamik*. Leipzig, Fachbuchverlag, 1978. 418 S.

19. Kuhnert E., Hunger P. *Schwingungsstillung an Gattersägemaschinen*. *Holzindustrie*, 1976, Bd. 2, S. 58–60.

Received on January 18, 2018



## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 628.161

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.141

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОАГУЛЯНТОВ  
ПРИ ВОДОПОДГОТОВКЕ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА***Т.Е. Бойкова<sup>1</sup>, ст. преподаватель**Н.И. Богданович<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.**К.Б. Воронцов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Филиал Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова в г. Северодвинске, ул. Капитана Воронина, д. 6, г. Северодвинск, Архангельская обл., Россия, 164520; e-mail: t.boykova@narfu.ru

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.bogdanovich@narfu.ru, k.vorontsov@narfu.ru

Исследованы процессы водоподготовки в условиях предприятия целлюлозно-бумажной промышленности. Выявлены недостатки, существующие в схеме очистки воды на фильтроочистных сооружениях целлюлозно-бумажного комбината в Архангельской области: влияние сезонных колебаний качества воды на эффективность очистки, содержание остаточного алюминия и химическое потребление кислорода в обработанной воде. Для повышения качества водоподготовки предложено заменить используемый реагент на один из современных коагулянтов. В лабораторном эксперименте работали по методике пробной коагуляции воды р. Северная Двина при температуре 15...20 °С. Отбор проб, определение исходных показателей качества воды и контроль процесса по остаточным железу и алюминию, цветности, рН, химическому потреблению кислорода выполнены по стандартным методикам. Исходная речная вода имела высокую цветность, малую мутность, низкую щелочность и высокое содержание органических природных соединений. Изучены условия применения реагентов для коагуляции и влияние их дозы на рН воды. Определена эффективность применения реагентов на основе полиоксихлорида алюминия (РАХ XL100, UltraРАС-V1, UltraРАС-V2, ПОХА), сернокислого алюминия и соли трехвалентного железа – Feгix-3. Выполнен сравнительный анализ эффективности действия коагулянтов между собой и с применяемым по стандартной схеме сернокислым алюминием. Отмечено, что использование коагулянта Feгix-3 в неоптимальных условиях (низкие значения рН,

---

*Для цитирования:* Бойкова Т.Е., Богданович Н.И., Воронцов К.Б. Эффективность применения коагулянтов при водоподготовке в целлюлозно-бумажной промышленности в условиях Севера // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 141–152. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.141

недостаточная или избыточная доза реагента) приводит к увеличению цветности обработанной воды в несколько раз по сравнению с исходными показателями. Установлено, что при применении сернокислого алюминия значительно уменьшается рН воды из-за ее невысокого щелочного запаса, при этом эффективность коагуляции снижается. Для решения этой проблемы необходимо увеличивать дозировку щелочного реагента. Экспериментальные данные подтверждают большую эффективность и глубину очистки в случае использования ПОХА по сравнению с другими реагентами. Доказана целесообразность замены сернокислого алюминия на ПОХА при очистке воды с высокой цветностью, низкими мутностью и щелочностью и большим содержанием природных органических соединений.

*Ключевые слова:* взвешенные вещества, рН, цветность, осветление природной воды, коагуляция, полиоксихлорид алюминия.

### *Введение*

Вода в целлюлозно-бумажной промышленности – важный компонент, который используется на всех стадиях производства: при варке целлюлозы, промывке, сортировке и др. На выработку 1 т бумаги расходуется от 100 до 200 м<sup>3</sup> воды. Для обеспечения необходимого качества целлюлозы и изделий на ее основе требуется чистая вода, содержание примесей в которой строго лимитировано. Повышенные требования к качеству воды, используемой в технологии целлюлозно-бумажного производства, обусловлены тем, что целлюлоза является активным поглотителем различных примесей, растворенных и суспендированных в воде [8]. На поверхности целлюлозы имеется большое количество функциональных групп, посредством которых она вступает в химическое взаимодействие с растворенными в воде веществами, а развитая поверхность и пористость волокнистой массы целлюлозы обуславливают ее хорошие сорбционные свойства. Органические примеси в воде придают целлюлозе окраску, снижают белизну бумаги, ухудшая качество получаемой продукции.

Для целлюлозно-бумажного производства значимыми являются следующие показатели качества технологической воды:

1. Цветность определяется содержанием в воде растворенных органических гумусовых кислот и измеряется в градусах платиново-кобальтовой шкалы (°ПКШ). Бесцветная вода необходима для выработки высококачественных видов целлюлозы (кордной и ацетатной) и бумаги. Цветность невозможно ликвидировать отстаиванием и фильтрованием, для ее снижения используют коагуляцию с последующей фильтрацией [2, 10].

2. На рН существенное влияние оказывает наличие в воде гумусовых веществ и других продуктов разложения растительных остатков. Показатель значительно изменяется в течение года и даже в течение суток. При отсутствии контроля за этим показателем идет перерасход наполнителей, проклеивающих веществ, красителей и других материалов.

3. Окисляемость – косвенный показатель загрязненности органическими и неорганическими веществами, выражающийся количеством потреб-

ленного кислорода ( $\text{мгO}_2/\text{л}$ ). Значительное потребление кислорода свидетельствует о возможном загрязнении воды.

4. Остаточный алюминий – это концентрация ионов  $\text{Al}^{+3}$ . В очищенной воде, в водоемах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения этот показатель не должен превышать  $0,2 \text{ мг/л}$  [5], в питьевой воде центральных систем водоснабжения –  $0,5 \text{ мг/л}$  [12]. При низких температурах процесс коагуляции протекает не всегда эффективно, и даже повышение дозы вводимого коагулянта не приводит к лучшему осветлению, в воде остаются ионы  $\text{Al}^{+3}$  в концентрации, превышающей предельно-допустимые значения [7, 13, 15].

Цели исследования – подбор наиболее эффективного современного коагулянта для осветления воды при водоподготовке на целлюлозно-бумажном комбинате; контроль за показателями рН, цветности и содержанием взвешенных веществ в обрабатываемой воде; снижение уровня органических веществ и цветности природной поступающей воды при низких температурах.

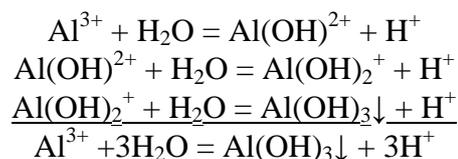
#### *Объекты и методы исследования*

Воду для исследования отбирали из р. Северная Двина в районе водозабора фильтроочистных сооружений ОАО «Архангельский ЦБК» – АЦБК (г. Новодвинск Архангельской области). АЦБК использует для производственных нужд воду из р. Мечки, вытекающей из болот и впадающей в Северную Двину. Вода поступает по системе речных водоводов на фильтроочистные сооружения станции водоочистки комбината, где реализуется двухступенчатая схема. Очистные сооружения, введенные в эксплуатацию еще в 1940 г., работают по стандартной схеме [7]. К поступившей в смеситель воде добавляется сначала коагулянт – сернокислый алюминий (СА) в количестве  $7,2 \%$ , далее – гипохлорит натрия для первичного хлорирования и окисления органических веществ, которые тормозят процесс коагуляции. Добавка последнего позволяет снизить дозу коагулянта и обеспечивает хорошее санитарное состояние оборудования станции. Туда же вводится щелочной реагент – кальцинированная сода, в конце смесителя – флокулянт. Вода с реагентами поступает в нижнюю часть камер хлопьеобразования, двигаясь вверх, при этом скорость потока замедляется, происходит процесс образования и укрупнения хлопьев. Коагулированная вода перетекает в двухъярусный четырехкоридорный отстойник для осаждения хлопьев. После отстойника осветленная вода поступает на скорые фильтры для удаления мелких хлопьев [7].

На выходе из водоочистных сооружений показатели воды должны соответствовать требованиям [11, 12]. Но есть некоторые трудности в получении воды нужного качества по ряду показателей: цветность, рН, ХПК, остаточный алюминий [10, 15]. Это связано с тем, что вода северных рек имеет высокую цветность (до  $200 \text{ }^\circ\text{ПКШ}$  в период осенне-весеннего паводка) при малой мутности и низкую температуру ( $1...3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в течение 8 мес., что затрудняет процесс осветления методом коагуляции [2, 3, 9]. Одним из решений, направленных на ликвидацию указанных затруднений, является применение современных высокоэффективных реагентов.

Для экспериментов использовали современные, более эффективные, коагулянты [3, 19, 21–23] различных марок: сернокислый алюминий (СА); полиоксихлорид алюминия с содержанием основного вещества ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 30 % (ПОХА); UltraPAC V-1 и UltraPAC V-2 различной плотности; PAX XL100 с содержанием основного вещества ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 17 % (на основе ПОХА); Ferix-3 на основе сернокислого железа.

При добавлении в обрабатываемую воду солей алюминия происходит гидролиз, при этом образуется плохо растворимый в воде гидроксид алюминия, который оказывает коагулирующее воздействие на загрязнения коллоидной степени дисперсности:



Данная реакция может полностью протекать либо только при условии нейтрализации образующейся кислоты, либо за счет карбонатной щелочности воды, либо за счет добавки щелочных реагентов (гашеной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , гидроксида натрия) с доведением pH до оптимальных значений [6, 16]. Поэтому в ходе эксперимента контролировали pH, при необходимости добавляли NaOH (10 %).

Цветность исследуемой воды определяли фотоколориметрическим методом [4], pH – мультитестом Анион 4100, ХПК – арбитражным методом [4].

Эксперимент проходил при температуре исследуемой воды 5 °С. Воду охлаждали и поддерживали необходимую температуру воды в лаборатории. В образце обрабатываемой воды (пробоотбор 10 октября 2017 г, период осеннего паводка) сразу исследовали основные показатели: цветность – 150 °ПКШ; pH 7,03; содержание взвешенных веществ – 46,2 мг/л; ХПК – 57,6 мг $\text{O}_2$ /л (при норме 15 мг $\text{O}_2$ /л для водоемов питьевого водопользования) [12]. Обработку проводили следующим образом: в стакан вместимостью 250 мл наливали 200 мл исследуемой природной воды, в которую при постоянном быстром перемешивании (180 об/мин) вносили заданный объем раствора коагулянта (стадия гидролиза). Пробу перемешивали в течение 1 мин при непрерывном контроле pH (при необходимости осуществляли корректировку раствором NaOH). После этого переключали мешалку на медленное перемешивание – 50 об/мин (период хлопьеобразования) в течение 10 мин. По окончании процесса пробу переливали в мерный цилиндр вместимостью 250 мл и измеряли высоту слоя осадка, содержание взвешенных веществ в надосадочном слое каждые 15 мин, а также основные показатели качества воды после фильтрования: pH, цветность, ХПК, концентрацию взвешенных веществ. По разности показателей до и после обработки рассчитывали эффективность обесцвечивания и снижения ХПК. В эксперименте варьировали дозировку коагулянта от 0 до 100 мг/л. pH поддерживали не ниже 5, так как при более низких значениях укрупнения хлопьев не происходило и применение коагулянта становилось неэффективным.

## Результаты исследования и их обсуждение

Результаты эксперимента представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2.

Таблица 1

**Динамика изменения рН и цветности профильтрованной пробы воды  
в зависимости от дозы коагулянта**

№ опыта	Доза коагулянта, мг/л	рН						Цветность после фильтрации, °ПКШ					
		РАХ XL100	UltraPAC V-1	UltraPAC V-2	Ferix-3	СА	ПОХА	РАХ XL100	UltraPAC V-1	UltraPAC V-2	Ferix-3	СА	ПОХА
1	10	7,00	6,86	6,88	–	5,87	6,86	52	132	117	–	18	140
2	20	5,84	6,51	6,54	6,25	5,02	6,52	18	22	31	312	3	32
3	30	5,72	6,42	6,40	–	4,60	6,31	1	13	19	–	2	14
4	40	4,93	6,21	6,14	5,67	4,51	5,97	5	–	13	104	1	16
5	50	4,54	6,10	6,01	5,06	4,48	5,89	5	20	9	17	1	6
6	60	4,67	5,97	5,82	4,32	4,42	5,69	4	–	9	16	1	7
7	70	4,36	5,82	5,77	3,36	4,28	5,50	51	6	8	16	1	5
8	80	4,17	5,63	5,37	3,28	4,27	5,30	113	–	12	10	1	–
9	90	4,66	5,41	5,53	–	4,41	5,26	81	–	10	–	15	84
10	100	4,12	5,22	5,31	3,12	4,34	5,23	102	77	35	8	3	–

Таблица 2

**Динамика формирования и осаждения взвешенных веществ (ВВ)  
в очищаемой воде**

№ опыта	Доза коагулянта, мг/л	Содержание ВВ, мг/л														
		на начало осветления					через 15 мин					через 30 мин				
		РАХ XL100	UltraPAC V-2	Ferix-3	СА	ПОХА	РАХ XL100	UltraPAC V-2	Ferix-3	СА	ПОХА	РАХ XL100	UltraPAC V-2	Ferix-3	СА	ПОХА
1	10	22	11	–	67	13	22	11	–	46	13	21	12	–	18	14
2	20	25	24	16	52	47	28	18	16	41	25	25	17	16	3	23
3	30	28	18	–	40	63	30	12	–	14	24	24	7	–	2	13
4	40	22	20	32	37	79	23	8	31	9	30	22	6	31	1	12
5	50	22	22	51	35	57	24	9	43	4	34	23	5	21	1	18
6	60	25	35	51	33	48	26	9	34	4	20	24	7	21	1	15
7	70	23	37	76	29	56	23	10	21	2	34	23	7	15	1	23
8	80	23	38	56	19	–	24	18	11	2	–	23	15	10	1	–
9	90	24	29	–	28	57	25	19	–	1	48	24	15	–	15	46
10	100	24	37	64	36	36	25	24	13	2	–	25	15	8	3	–

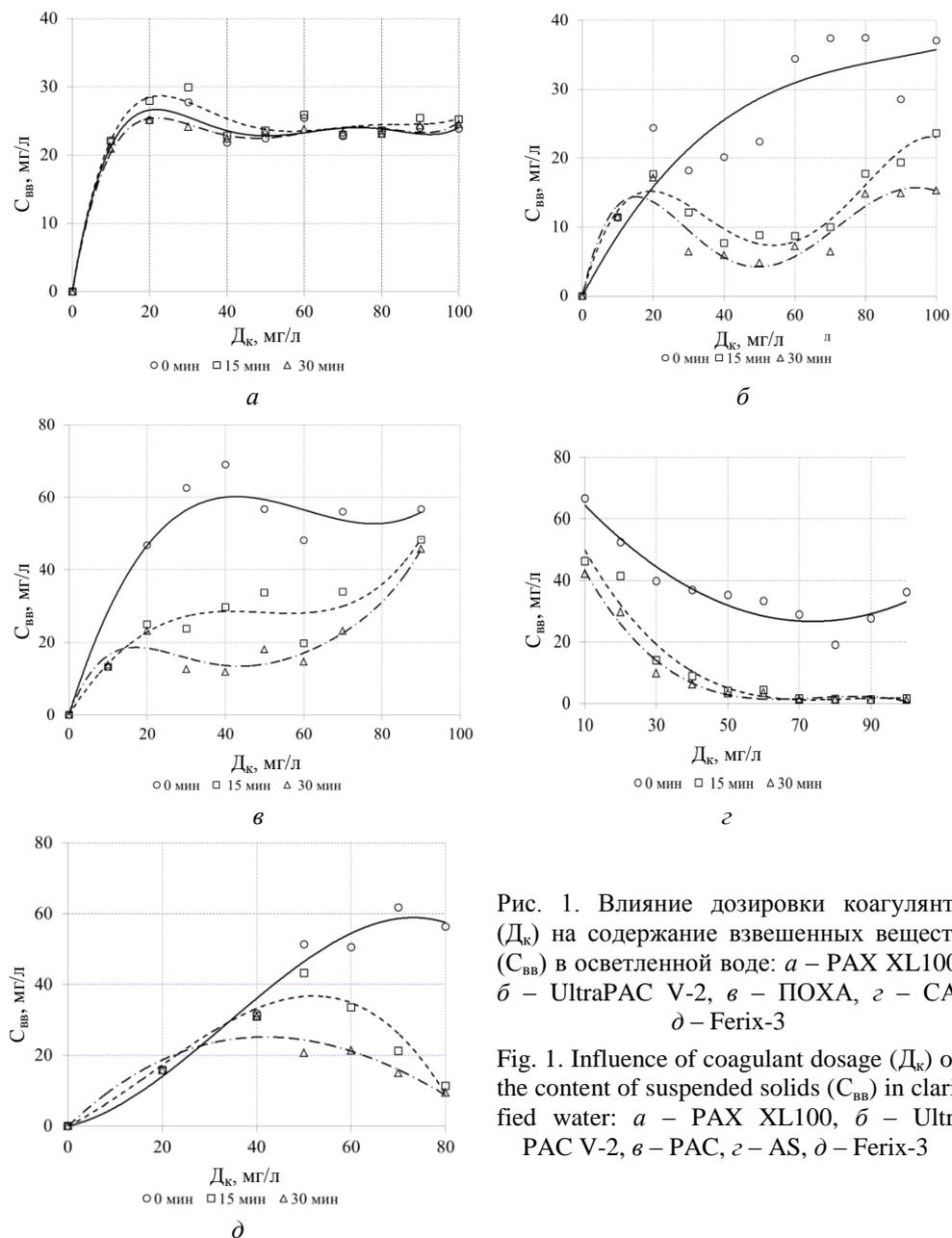


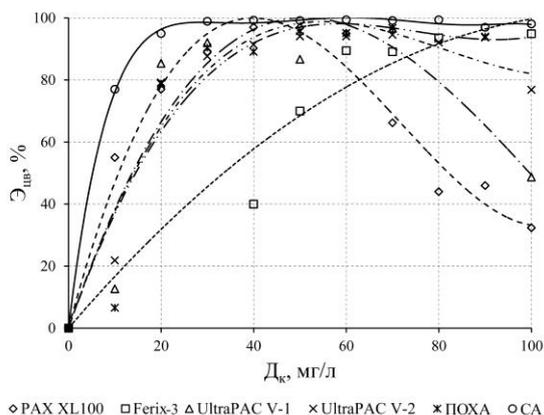
Рис. 1. Влияние дозировки коагулянта ( $D_k$ ) на содержание взвешенных веществ ( $C_{vv}$ ) в осветленной воде: а – PAX XL100, б – UltraPAC V-2, в – ПОХА, г – СА, д – Ferix-3

Fig. 1. Influence of coagulant dosage ( $D_k$ ) on the content of suspended solids ( $C_{vv}$ ) in clarified water: а – PAX XL100, б – UltraPAC V-2, в – PAC, г – AS, д – Ferix-3

При оценке эффективности коагулянта выбирали наименьшее значение  $D_k$ , достаточное для дестабилизации коллоидной системы и образования осадка. Требуемый эффект был достигнут при использовании ПОХА при дозировке коагулянта уже 20 мг/л (табл. 2), при этом содержание взвешенных веществ ( $C_{vv}$ ) в надосадочном слое составляло 47 мг/л на начало осаждения, через 15 мин – 25 мг/л, через 30 мин – 23 мг/л. Это свидетельствует об образовании крупных, хорошо осаждаемых хлопьев. Подобные результаты демонстрирует и СА при той же дозировке 20 мг/л (52→41→3 мг/л), но при этом pH

Рис. 2. Влияние дозировки коагулянта ( $D_k$ ) на эффективность очистки воды ( $\mathcal{E}_{цв}$ ) по цветности

Fig. 2. Influence of coagulant dosage ( $D_k$ ) on the efficiency of water purification ( $\mathcal{E}_{цв}$ ) by chromaticity



уже приближается к критической отметке 5,02. Коагулянт UltraPAC V-2 дает сформированные осаждаемые хлопья при дозировке в 3–4 раза больше (60...80 мг/л). При этом также не требуется подщелачивания. Коагулянт Ferix-3 становится эффективным при дозировке в 2,5 раза большей, т. е. 50 мг/л (51→43→21 мг/л), но pH также приближается к критической отметке 5,06. После добавления коагулянтов PAX XL100 и UltraPAC-V1 сформированных осаждаемых хлопьев на данной исходной воде при низкой температуре не обнаружено. Кроме того, PAX XL100 значительно уменьшил pH обрабатываемой пробы.

Максимальная эффективность по формированию крупных хлопьев достигнута коагулянтом ПОХА в дозировке 40 мг/л при содержании взвешенных веществ 79 мг/л на начало осветления. СА также эффективен при данной дозировке, но содержание взвешенных веществ на начало осветления – 37 мг/л, при этом хлопья хорошо осаждались. UltraPAC V-2 показывает максимум при дозировке в 1,5–2 раза больше (60...80 мг/л) и не требует подщелачивания, Ferix-3 при дозировке 70 мг/л снижает pH до 3,36, требуя значительного подщелачивания.

Экспериментальные данные по ХПК очищенной воды показали, что по эффективности снижения этого показателя лучший результат получен при использовании коагулянтов СА, Ferix-3 (эффективность 75 % при дозировке 80 мг/л), несколько хуже – ПОХА (72 % при дозировке 70 мг/л), остальные коагулянты снижают ХПК в пределах 52...56 % при той же дозировке. Необходимо отметить, что окисляемость пробы после ее обработки коагулянтами и фильтрования уменьшается значительно меньше, чем цветность: окисляемость – на 75 %, цветность – на 97...99 %. Это свидетельствует о наличии в данной природной воде большого количества неокрашенных органических веществ, не устранимых в процессе коагуляции.

#### Заключение

Анализ полученных в ходе эксперимента данных показал, что наиболее эффективны коагулянты СА и ПОХА, неплохие результаты получены также при использовании UltraPAC V-2. Однако более экономичным и экологичным оказался ПОХА. Применение коагулянта ПОХА позволит сократить дозу вводимого реагента, повысить эффективность осветления воды при значительно

меньшем снижении исходных значений рН среды, что приведет к экономии щелочного реагента.

Процесс коагулирования значительно ускорится, если в воду добавлять флокулянты, образующие с водой коллоидные дисперсные системы [1, 3, 14, 17, 18, 20]. Частицы флокулянта вместе с отрицательно заряженными частицами взвеси адсорбируются на хлопьях коагулянтов, что ускоряет укрупнение и осаждение хлопьев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апельцина Е.И., Беляева С.Д., Короткова Е.В.* Исследование влияния свойств анионных флокулянтов на эффективность коагуляционной очистки природных цветных вод // Изв. Жилищ.-коммун. акад. гор. хоз-ва и экологии. 1999. № 3. С. 64–68.
2. *Бабенков Е.Д.* Очистка воды коагулянтами. М.: Наука, 1977. 356 с.
3. *Гандурина Л.В.* Органические флокулянты в технологии очистки природных и промышленных сточных вод и обработки осадка: аналит. обзор / ФГУП ВОДГЕО. М., 2002. 41 с.
4. *Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В.* Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М.: АСВ, 2008. 272 с.
5. ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы. М., 2003. 154 с.
6. *Гончарук В.В., Герасименко Н.Г.* Электрокинетические свойства продуктов гидролиза основных сульфатов железа в условиях процесса водоподготовки // Химия и технология воды. 1996. Т. 18, № 3. С. 227–232.
7. *Зубакова Л.Б., Тевлина А.С., Даванков А.Б.* Синтетические ионообменные материалы. М.: Химия, 1978. 184 с.
8. *Комиссаренков А.А., Пругло Г.Ф., Федоров В.А., Федорова О.В.* Основы водоподготовки в целлюлозно-бумажной промышленности и теплоэнергетике: учеб.-метод. пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2012. 98 с.
9. *Коряйкина А.В., Аюкаев Р.И.* Применение биотехнологий для очистки высокоцветных природных вод из поверхностных источников в условиях Севера // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та, 2010. № 1(13). С. 245–251.
10. *Лотош В.Е.* Экология природопользования: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2002. 540 с.
11. СанПиН 2.1.5.980–00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. М.: Минздрав России, 2000. 18 с.
12. СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М.: Информ.-изд. центр Минздрава России, 2002.
13. *Ebeling J.M., Sibrell P.L., Ogden S.R., Summerfelt S.T.* Evaluation of Chemical Coagulation–Flocculation Aids for the Removal of Suspended Solids and Phosphorus from Intensive Recirculating Aquaculture Effluent Discharge // Aquacultural Engineering. 2003. Vol. 29, iss. 1-2. Pp. 23–42. DOI: 10.1016/S0144-8609(03)00029-3
14. *Folkard G.K., Sutherland J.P., Shaw R.* Water Clarification Using *Moringa Oleifera* Seed Coagulant. London: Intermediate Technology Publications, 1999. Pp. 109–112.
15. *Letterman R.D., Driscoll Ch.T.* Survey of Residual Aluminum in Filtered Water // Journal AWWA. 1988. Vol. 80, iss. 4. Pp. 154–158. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1988.tb03020.x

16. Letterman R.D., Pero R.W. Contaminants in Polyelectrolytes Used in Water Treatment // Journal AWWA. 1990. Vol. 82, iss. 11. Pp. 87–97. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1990.tb07056.x

17. Muyibi S.A., Evison L.M. Coagulation of Turbid Water and Softening of Hard-Water with *Moringa Oleifera* Seeds // International Journal of Environmental Studies. 1996. Vol. 49, iss. 3. Pp. 247–259. DOI: 10.1080/00207239608711028

18. Narkis N., Rebhum M. Flocculation in Present of Organic Macromolecules of Natural Water and Secondary Effluents // Water Science and Technology. 1997. Vol. 36, iss. 4. Pp. 85–91. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00423-X

19. Park H., Lim S., Lee H., Woo D.-S. Water Blending Effects on Coagulation-Flocculation Using Aluminum Sulfate (alum), Polyaluminum Chloride (PAC), and Ferric Chloride (FeCl<sub>3</sub>) Using Multiple Water Sources // Desalination and Water Treatment. 2016. Vol. 57, iss. 16. Pp. 7511–7521. DOI: 10.1080/19443994.2015.1025583

20. Roussy J., Van Vooren M., Dempsey B.A., Guibal E. Influence of Chitosan Characteristics on the Coagulation and the Flocculation of Bentonite Suspensions // Water Research. 2005. Vol. 39, iss. 14. Pp. 3247–3258. DOI: 10.1016/j.watres.2005.05.039

21. Wei N., Zhang Z., Liu D., Wu Y., Wang J., Wang Q. Coagulation Behavior of Polyaluminum Chloride: Effects of pH and Coagulant Dosage // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2015. Vol. 23, iss. 6. Pp. 1041–1046. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.02.003

22. Zhang Z., Wang J., Liu D., Li J., Wang X., Song B., Yue B., Zhao K., Song Y. Hydrolysis of Polyaluminum Chloride Prior to Coagulation: Effects on Coagulation Behavior and Implications for Improving Coagulation Performance // Journal of Environmental Sciences (China). 2017. Vol. 57. Pp. 162–169. DOI: 10.1016/j.jes.2016.10.014

23. Zhao Y.X., Phuntsho S., Gao B.Y., Yang Y.Z., Kim J.H., Shon H.K. Comparison of a Novel Polytitanium Chloride Coagulant with Polyaluminium Chloride: Coagulation Performance and Floc Characteristics // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 147. Pp. 194–202. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.09.023

Поступила 16.02.18

UDC 628.161

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.141

### **The Efficiency of Coagulants in Water Treatment in the Pulp and Paper Industry in the North**

*T.E. Boykova*<sup>1</sup>, Senior Lecturer

*N.I. Bogdanovich*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering Sciences, Professor

*K.B. Vorontsov*<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

<sup>1</sup>Severodvinsk Branch of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ul. Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164520, Russian Federation; e-mail: t.boykova@narfu.ru

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: n.bogdanovich@narfu.ru, k.vorontsov@narfu.ru

---

*For citation:* Boykova T.E., Bogdanovich N.I., Vorontsov K.B. The Efficiency of Coagulants in Water Treatment in the Pulp and Paper Industry in the North. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 141–152. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.141

Water treatment processes at a pulp and paper mill were studied. Weaknesses of the water purification scheme on the wastewater filter treatment facilities of the pulp and paper mill of Arkhangelsk region are revealed: influence of water quality seasonal fluctuations on the purification efficiency, content of residual aluminum, and chemical oxygen demand (COD) in the treated water. In order to improve the water treatment quality, it was offered to replace the used reagent with one of the modern coagulants. The experiment was made under the laboratory conditions by the procedure of trial coagulation of the Northern Dvina river water at a temperature about 15–20 °C. Sampling, definition of initial parameters of water quality, and control of residual iron and aluminum, chromaticity, pH, COD were carried out by the standard methods. The initial river water had high chromaticity, low turbidity, low alkalinity, and high content of organic natural compounds. Reagent application conditions and the influence of a reagent dosage on pH were studied. The usage efficiency of reagents based on polyaluminum chloride (PAX XL100, UltraPAC-V1, UltraPAC-V2, PAC), aluminum sulfate and ferric salt – Ferix-3 is defined. Comparative analysis of coagulant efficiency was made between the coagulants and with aluminum sulfate (AS) applied according to the standard scheme. Ferix-3 coagulant usage in suboptimal conditions (low pH values, insufficient or excess dosage of reagent) leads to increase in chromaticity of the treated water by several times in comparison with the initial parameters. AS usage leads to the significant decrease of water pH because of its low alkaline water supply, at the same time the coagulation efficiency decreases. It is important to increase alkaline reagent dosage in response to this problem. Experimental data confirms high efficiency of treatment with polyaluminum chloride (PAC) in comparison with other reagents. The relevance of replacement AS by PAC in water purification with high chromaticity, low turbidity and alkalinity, and high content of natural organic compounds is approved.

*Keywords:* suspended solids, pH, chromaticity, clarifying of natural water, coagulation, polyaluminum chloride.

#### REFERENCES

1. Apel'tsina E.I., Belyayeva S.D., Korotkova E.V. Issledovaniye vliyaniya svoystv anionnykh flokulyantov na effektivnost' koagulyatsionnoy ochistki prirodnykh tsvetnykh vod [Study the Influence of Anionic Flocculants Properties on the Efficiency of Coagulative Treatment of Natural Colored Water]. *Izvestiya Zhilishchno-kommunal'noy akademii gorodskogo khozyaystva i ekologii*, 1999, no. 3, pp. 64–68.
2. Babenkov E.D. *Ochistka vody koagulyantami* [Water Purification by Coagulants]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 356 p. (In Russ.)
3. Gandurina L.V. *Organicheskiye flokulyanty v tekhnologii ochistki prirodnykh i promyshlennykh stochnykh vod i obrabotki osadka: analit. obzor* [Organic Flocculants in the Technology of Natural and Industrial Wastewater Purification and Sludge Treatment: Analytical Overview]. Moscow, FGUP VODGEO Publ., 2002. 41 p. (In Russ.)
4. Getmantsev S.V., Nechayev I.A., Gandurina L.V. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod koagulyantami i flokulyantami* [Industrial Wastewater Treatment with Coagulants and Flocculants]. Moscow, ASV Publ., 2008. 272 p. (In Russ.)
5. *Hygienic Standards 2.1.5.1315–03. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaystvenno-pit'yevogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya* [Hygienic Standards 2.1.5.1315–03. The Maximum Allowable Concentration (MAC) of Chemicals in Water of Water Bodies of Drinking and Household Water Use]. Moscow, 2003. 154 p.
6. Goncharuk V.V., Gerasimenko N.G. *Elektrokineticheskiye svoystva produktov gidroliza osnovnykh sul'fatov zheleza v usloviyakh protsessa vodopodgotovki* [Electrokinetic Properties of Hydrolysis Products of Basic Iron Sulfates under the Conditions of Water

Treatment]. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Journal of Water Chemistry and Technology], 1996, vol. 18, no. 3, pp. 227–232.

7. Zubakova L.B., Tevlina A.S., Davankov A.B. *Sinteticheskiye ionoobmennyye materialy* [Synthetic Ion-Exchange Materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 184 p. (In Russ.)

8. Komissarenkov A.A., Pruglo G.F., Fedorov V.A., Fedorova O.V. *Osnovy vodopodgotovki v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti i teploenergetike: ucheb.-metod. posobiye* [Basics of Water Treatment in the Pulp and Paper Industry and Heat Power Engineering: Study Guide]. Saint Petersburg, HSTE Publ., 2012. 98 p. (In Russ.)

9. Koryaykina A.V., Ayukayev R.I. *Primeneniye biotekhnologiy dlya ochistki vysokotsvetnykh prirodnykh vod iz poverkhnostnykh istochnikov v usloviyakh Severa* [The Use of Biotechnologies for Purification of High Colored Natural Waters from Diffuse Sources in the North]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2010, no 1(13), pp. 245–251.

10. Lotosh V.E. *Ekologiya prirodopol'zovaniya: ucheb. posobiye* [Ecology of Nature Management: Educational Textbook]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2002. 540 p. (In Russ.)

11. *SanPiN 2.1.5.980–00. Gigiyenicheskiye trebovaniya k okhrane poverkhnostnykh vod* [Health and Hygiene Rules and Standards 2.1.5.980–00. Hygienic Requirements for Surface Water Protection]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 2000. 18 p.

12. *SanPiN 2.1.4.1074–01. Pit'yevaya voda. Gigiyenicheskiye trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pit'yevogo vodosnabzheniya. Kontrol' kachestva. Gigiyenicheskiye trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya* [Health and Hygiene Rules and Standards 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic Requirements for Water Quality of Drinking Water Supply Host Systems. Quality Control. Hygienic Requirements for the Safety Ensuring of Hot Water Supply Systems]. Moscow, Informatsionno-izdatel'skiy tsentr Minzdrava Rossii Publ., 2002.

13. Ebeling J.M., Sibrell P.L., Ogden S.R., Summerfelt S.T. Evaluation of Chemical Coagulation–Flocculation Aids for the Removal of Suspended Solids and Phosphorus from Intensive Recirculating Aquaculture Effluent Discharge. *Aquacultural Engineering*, 2003, vol. 29, iss. 1–2, pp. 23–42. DOI: 10.1016/S0144-8609(03)00029-3

14. Folkard G.K., Sutherland J.P., Shaw R. *Water Clarification Using Moringa Oleifera Seed Coagulant*. London, Intermediate Technology Publications, 1999, pp. 109–112.

15. Letterman R.D., Driscoll Ch.T. Survey of Residual Aluminum in Filtered Water. *Journal AWWA*, 1988, vol. 80, iss. 4, pp. 154–158. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1988.tb03020.x

16. Letterman R.D., Pero R.W. Contaminants in Polyelectrolytes Used in Water Treatment. *Journal AWWA*, 1990, vol. 82, iss. 11, pp. 87–97. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1990.tb07056.x

17. Muyibi S.A., Evison L.M. Coagulation of Turbid Water and Softening of Hard-Water with *Moringa Oleifera* Seeds. *International Journal of Environmental Studies*, 1996, vol. 49, iss. 3, pp. 247–259. DOI: 10.1080/00207239608711028

18. Narkis N., Rebhum M. Flocculation in Present of Organic Macromolecules of Natural Water and Secondary Effluents. *Water Science and Technology*, 1997, vol. 36, iss. 4, p. 85–91. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00423-X

19. Park H., Lim S., Lee H., Woo D.-S. Water Blending Effects on Coagulation-Flocculation Using Aluminum Sulfate (alum), Polyaluminum Chloride (PAC), and Ferric Chloride (FeCl<sub>3</sub>) Using Multiple Water Sources. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, iss. 16, pp. 7511–7521. DOI: 10.1080/19443994.2015.1025583

20. Roussy J., Van Vooren M., Dempsey B.A., Guibal E. Influence of Chitosan Characteristics on the Coagulation and the Flocculation of Bentonite Suspensions. *Water Research*, 2005, vol. 39, iss. 14, pp. 3247–3258. DOI: 10.1016/j.watres.2005.05.039

21. Wei N., Zhang Z., Liu D., Wu Y., Wang J., Wang Q. Coagulation Behavior of Polyaluminum Chloride: Effects of pH and Coagulant Dosage. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 23, iss. 6, pp. 1041–1046. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.02.003

22. Zhang Z., Wang J., Liu D., Li J., Wang X., Song B., Yue B., Zhao K., Song Y. Hydrolysis of Polyaluminum Chloride Prior to Coagulation: Effects on Coagulation Behavior and Implications for Improving Coagulation Performance. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2017, vol. 57, pp. 162–169. DOI: 10.1016/j.jes.2016.10.014

23. Zhao Y.X., Phuntsho S., Gao B.Y., Yang Y.Z., Kim J.H., Shon H.K. Comparison of a Novel Polytitanium Chloride Coagulant with Polyaluminium Chloride: Coagulation Performance and Floc Characteristics. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 147, pp. 194–202. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.09.023

Received on February 16, 2018

---

УДК 66.092-977

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПИРОЛИЗНОЙ ЗОНЕ

*А.В. Сафина, канд. техн. наук, доц.*

*Н.Ф. Тимербаев, д-р техн. наук, проф.*

*Д.Ф. Зиятдинова, д-р техн. наук, проф.*

*Р.Г. Сафин, д-р техн. наук, проф.*

*А.Р. Хабибуллина, ассистент*

Казанский национальный исследовательский технологический университет,

ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420015;

e-mail: cfaby@mail.ru, cpekgeu@gmail.com, ziatdinova2804@gmail.com, safin@kstu.ru,

almira-h@rambler.ru

В настоящее время в стране заготавливается около 200 млн м<sup>3</sup> древесины. При этом на всех стадиях процесса (от заготовки до переработки древесного сырья) образуется большое количество отходов, которые не находят применения и оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Одним из возможных направлений переработки таких отходов является их пиролиз. Выход продуктов пиролиза зависит от внешних условий и свойств сырья. Приведено описание установки, разработанной для производства активированного угля из древесной щепы. Установка выполнена в виде шахты, в ней имеется зона пиролиза, работающая в периодическом режиме. В нижней части пиролизной зоны расположены нагревательные элементы, прогревающие технологическую щепу до начала интенсивных экзотермических реакций. Нагревательным элементам тепловая энергия передается с помощью тепловой трубы, размещенной в древесном угле после стадии активации, имеющей температуру около 800 °С. С использованием этой установки из древесных отходов получают ценные продукты, пользующиеся большим спросом в промышленности, и решается экологическая проблема многих деревоперерабатывающих предприятий – утилизация отвалов. На основе анализа физической картины и формализации процесса пиролиза в установке производства активированного угля разработана математическая модель процесса, позволяющая рассчитать общее время, затраченное на переработку древесных отходов, и основные конструктивные параметры установки.

*Ключевые слова:* математическая модель, тепломассоперенос, древесный уголь, пиролиз, активация, газовый поток.

### *Введение*

Проблемами деревообработки на современном этапе являются низкая эффективность использования древесного сырья, высокие энергозатраты на переработку вторичных биоресурсов, связанные с отсутствием энергосберегающего оборудования и методик для его расчета. К существующим перспективным направлениям переработки древесных отходов относится термохимическое с получением активированного угля [2, 3, 6, 7].

---

*Для цитирования:* Сафина А.В., Тимербаев Н.Ф., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Хабибуллина А.Р. Моделирование тепломассопереноса в пиролизной зоне // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 153–160. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

При термохимической переработке протекают взаимосвязанные процессы тепломассопереноса, осложненные химическими превращениями, состоящими из множества параллельно протекающих реакций, в которых эндотермические процессы со стоком тепловой энергии сменяются экзотермическими [1, 12, 13].

Вопросам пирогенетической переработки древесных материалов посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых.

В связи с повышенной сложностью процессов, происходящих при термическом разложении древесины, отсутствуют единые методы расчетов технологических процессов и аппаратов непрерывной пирогенетической технологии переработки древесных отходов в активированный уголь.

#### *Объекты и методы исследования*

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национально-исследовательского технологического университета создана установка для переработки древесных отходов в активированный уголь (см. рисунок) [1, 5].

Установка состоит из вертикальной реторты 2, в которой за счет гравитационных сил происходит движение древесных отходов через зоны предварительного нагрева 3, сушки 4, пиролиза 5, активирования 7, охлаждения 9, 10 с превращением отходов в активированный уголь, системы сепарации пиролизных газов, топочное устройство 22, системы газоочистки 21, рекуперативные теплообменники 8, 14. Готовый продукт охлаждается в две ступени: на первой ступени тепло от активированного древесного угля отводится с помощью тепловой трубы 6 на нагрев древесных частиц в зонах пиролиза 5 и предварительного нагрева 3.

При сепарации в конденсаторах смешения 15, 23 пиролизные газы разделяются на высоко- и низкокипящие фракции. Неконденсирующиеся газы сжигаются в топке 22. Тепловая энергия топочных газов расходуется на производство перегретого пара для проведения процессов сушки древесных частиц и активации угля. Окислитель перед подачей в топку подогревается за счет конвективного охлаждения активированного угля на второй ступени и кондуктивного охлаждения топочного газа в рекуперативном теплообменнике 8. Для охлаждения хладагента в конденсаторах смешения используют отработанный абсорбент из насадочной колонны 21.

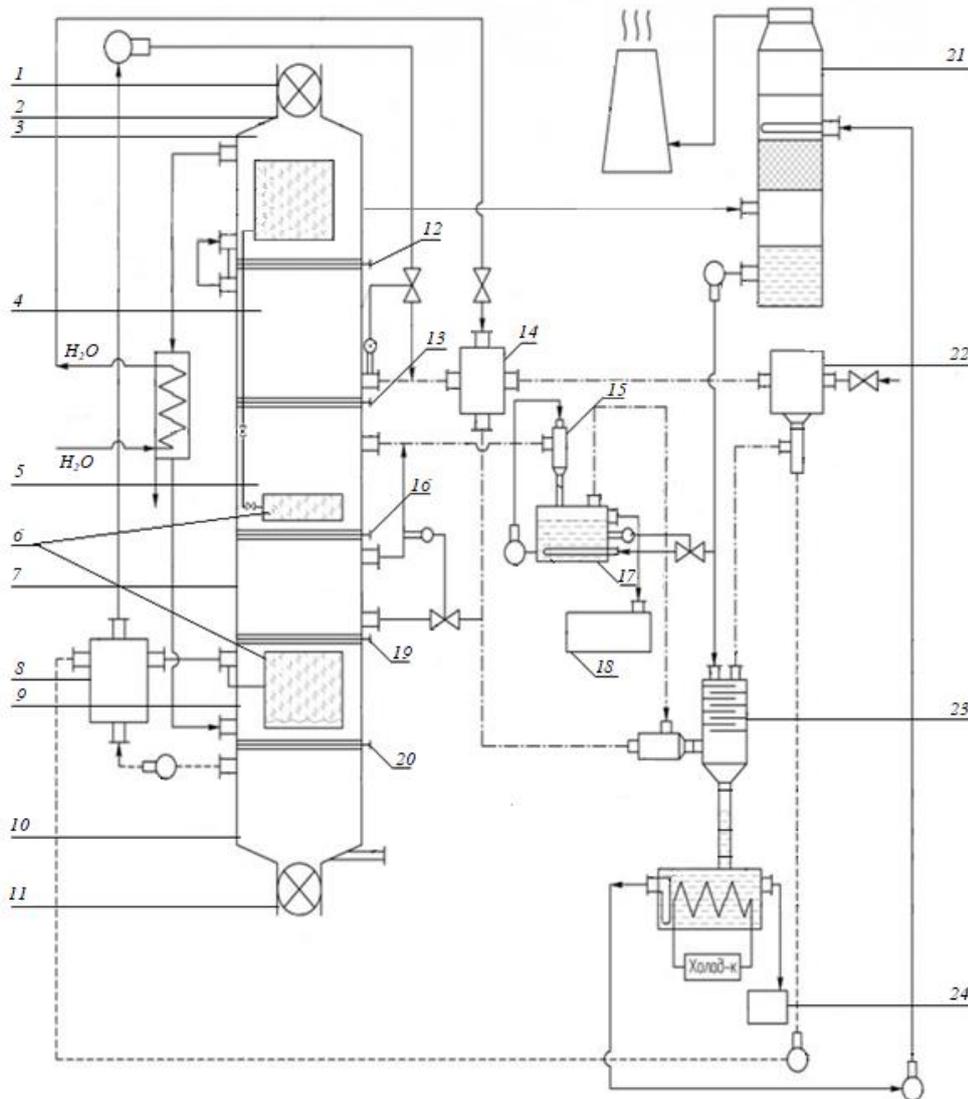
Технологические зоны реторты 3, 4, 5, 7, 9, 10 разделены шиберными заслонками 12, 13, 16, 19, 20 и изолированы от окружающей среды секционными питателями 1, 11.

В разделительном аппарате 17 жижка охлаждается отработанным абсорбентом и паровая фаза пиролизных газов разделяется на смесь высоко- и низкокипящих компонентов.

Сжиженные высококипящие компоненты с температурой кипения более 100 °С собираются в емкость 18, а обезвоженные низкокипящие компоненты (температура кипения менее 100 °С) – в емкость 24.

Для запуска установки и поддержания требуемого теплового баланса предусмотрена подача в топку природного газа.

В результате активирования свободная поверхность древесного угля увеличивается от 100...150 м<sup>2</sup>/г до 600...900 м<sup>2</sup>/г, что приводит к возрастанию сорбционной активности готового продукта [1, 2].



Установка для производства активированного угля  
Activated carbon plant

*Результаты исследования и их обсуждение*

Математически процесс пиролиза в установке описан нами следующим образом.

Температурное поле в технологических зонах установки определяется уравнением теплопереноса [8, 10, 11], которое описывает изменение во времени ( $\tau$ ) температуры материала по слоям [1, 4, 6]. Для одномерного слоя имеем:

$$\rho_{\text{сл}} c_{\text{сл}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial h} \left( \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial h} \right) + q_{\text{сл}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{сл}}$  – насыпная плотность слоя материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_{\text{сл}}$  – теплоемкость насыпного слоя материала,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $T_{\text{сл}}$  – температура слоя,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $h$  – координата частицы в слое,  $\text{м}$ ;  $\lambda_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент теплопроводности слоя

материала, Вт/(м·К);  $q_{\text{сл}}$  – удельный поток тепла, Дж/м<sup>2</sup>·с, определяемый прогревом материала и протекающими химическими реакциями,  $q_{\text{сл}} = q_{\text{п}} + q_{\text{хр}}$ ;  $q_{\text{п}}$  – сток тепла на прогрев материала, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $q_{\text{хр}}$  – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м<sup>2</sup>·с) [1, 4, 6].

Решение дифференциального уравнения (1) проводится при следующих краевых условиях:

$$T_{\text{сл}}(0; h) = T_{\text{н}};$$

$$T_{\text{сл}}(\tau; 0) = T_{\text{п}}.$$

Здесь  $T_{\text{н}}$  – начальная температура в слое, определяется конечной температурой материала после предыдущей зоны;  $T_{\text{п}}$  – температура теплоподводящих поверхностей, определяется текущей температурой на границе слоя материала.

При температуре более 180 °С начинается термохимическое разложение древесины с образованием угля, парогазовой смеси и убылью массы древесины.

Изменение массы в единице объема для каждого из перечисленных компонентов можно записать в следующем виде [1, 4, 6]:

для древесины

$$\frac{\partial \rho'_{\text{др}}}{\partial \tau} = -k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}; \quad (2)$$

для угля

$$\frac{\partial \rho'_y}{\partial \tau} = \varphi k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}; \quad (3)$$

для парогазовой смеси

$$\frac{\partial \rho'_{\text{пр}}}{\partial \tau} = (1 - \varphi) k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}, \quad (4)$$

где  $\rho'_{\text{др}} = \frac{m_{\text{др}}}{V_0}$  – удельная масса древесины в пиролизной зоне, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho'_y = \frac{m_y}{V_0}$  –

удельная масса угля в пиролизной зоне, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho'_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}}}{V_0}$  – удельная масса об-

разовавшихся пирогазов, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{др}}$ ,  $m_y$  и  $m_{\text{пр}}$  – масса древесины, угля и пирогазов;  $k_{\text{др}}$  – константа скорости химической реакции разложения древесины, с<sup>-1</sup>.

Степень пиролиза определяется как

$$\varphi = \frac{\rho'_y}{\rho'_y + \rho'_{\text{др}0}}.$$

Изменение массы парогазовой фазы пиролизной зоны найдем по сумме массовых потоков за счет конвекции и реакций термического разложения древесины [1, 4, 6]:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho'_{\text{пр}})}{\partial \tau} = -\frac{\partial(w_{\text{пр}} \rho'_{\text{пр}})}{\partial h} + (1 - \varphi) k_{\text{др}} \rho'_{\text{др}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – пористость частицы, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_{\text{др}}(1 - \varepsilon_{\text{др}})}{m_{\text{др}0}}.$$

Для определения скорости потока газов воспользуемся законом Дарси:

$$w_{\text{пр}} = -\frac{K_{\text{ч}}}{\mu_{\text{пр}}} \frac{\Delta P}{H}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{ч}}$  – газовая проницаемость частицы,  $K_{\text{ч}} = (1 - \varphi)K_{\text{пр}} + \varphi K_{\text{г}}$ ;  $K_{\text{пр}}$ ,  $K_{\text{г}}$  – газовая проницаемость пирогазовой смеси и угля;  $\mu_{\text{пр}}$  – динамическая вязкость пирогазов, Па·с.

Сток тепла при пиролизе древесины влияет на изменение температуры слоя. Считаем, что температуры древесной частицы и образующихся пирогазов одинаковы, а газовая и твердая фазы находятся в термодинамическом равновесии. Температура частицы при этом определяется из уравнения сохранения энергии [5]:

$$(c_{\text{г}}\rho_{\text{г}} + c_{\text{др}}\rho_{\text{др}}) \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \ell} \left( \lambda_{\text{ч}} \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \ell} \right) - \rho_{\text{пр}} c_{\text{пр}} w_{\text{пр}} \frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \ell} + q_{\text{хр}}, \quad (7)$$

где  $\ell$  – текущая координата частицы, м;  $\lambda_{\text{ч}}$  – коэффициент теплопроводности для частицы, Вт/(м·К);  $w_{\text{пр}}$  – скорость пирогазовой смеси, м/с;  $q_{\text{хр}} = q_0(-k_{\text{др}}\rho_{\text{др}})$ ;  $q_0$  – удельная теплота химической реакции, Дж/кг.

Константа скорости химической реакции определяется в соответствии с законом Аррениуса:

$$k_{\text{др}} = k_{\text{др}0} \exp\left(-\frac{E_{\text{а}}}{RT}\right),$$

где  $k_{\text{др}0}$  – предэкспоненциальный множитель, с<sup>-1</sup>;  $E_{\text{а}}$  – энергия активации, Дж/моль.

Запишем начальные условия для решения уравнений (2)–(5) и (7):

$$\rho'_{\text{др}} = \rho'_{\text{др}0}; \rho'_{\text{г}} = 0; \rho'_{\text{пр}} = 0; T_{\text{ч}} = T_{\text{н}},$$

а также граничные условия для уравнения (7):

$$T_{\text{ч}}|_{\ell=L} = T_{\text{сл}}.$$

Эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  в уравнении (1) зависит от порозности и температуры слоя:

$$\lambda_{\text{эф}} = f(\varepsilon, T_{\text{сл}}),$$

т. е. его можно определить экспериментальным путем.

Коэффициент теплопроводности для частицы в уравнении (7) найдем как сумму теплопроводностей древесины ( $\lambda_{\text{др}}$ ), угля ( $\lambda_{\text{г}}$ ) и летучих веществ ( $\lambda_{\text{т}}$ ) с учетом степени пиролиза и излучения тепла через поры [3, 9]:

$$\lambda_{\text{ч}} = (1 - \varphi) \lambda_{\text{др}} + \varphi \lambda_{\text{г}} + \varepsilon \lambda_{\text{г}} + \frac{13,5c_0 T^3 d_{\text{пор}}}{\psi_{\text{г}}},$$

где  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;  $d_{\text{пор}}$  – размер пор,  $d_{\text{пор}} = 5 \cdot 10^{-5}(1 - \varphi) + 10^4 \varphi$ ;  $\psi_{\text{г}}$  – степень черноты газового потока.

Таким образом, разработанная нами математическая модель процесса позволяет рассчитать его основные характеристики, а также параметры установки.

*Заключение*

На основе анализа физической картины процесса пиролиза в установке для производства древесного угля была разработана математическая модель тепломассопереноса, осложненного химическими превращениями, которая описывает пирогенетическое разложение древесины и может быть использована для математического моделирования и проведения расчетов при проектировании этих установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2582696 Российская Федерация, МПК С 10 В 1/04. Установка для производства древесного угля / Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Р., Зиятдинова Д.Ф., Хабибуллина А.Р., Ахметова Д.А., Сафина А.В., Саттарова З.Г., Степанова Т.О. 2014.
2. Сафин Р.Г. Актуальные проблемы технологических процессов лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств: учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 408 с.
3. Сафин Р.Г., Ахметова Д.А., Сафина А.В., Зиятдинов Р.Р., Хабибуллина А.Р. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 3. С. 161–163.
4. Сафин Р.Г., Зиятдинов Р.Р., Сафина А.В., Хабибуллина А.Р. Пиролизная переработка отходов лесопромышленного комплекса в древесный уголь // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 20. С. 132–134.
5. Сафин Р.Г., Степанова Т.О., Хабибуллина А.Р. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 7-2(18-2). С. 413–417.
6. Сафина А.В., Тимербаев Н.Ф., Хабибуллина А.Р., Асаева Л.Ш., Калашиникова А.С. Моделирование процесса конвективного охлаждения древесного угля в пиролизной установке // Деревообраб. пром-сть. 2017. № 1. С. 33–39.
7. Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Хисамеева А.Р., Шулаев М.В., Хузеев М.В. Разработка энергосберегающей технологии газогенерации древесных отходов // Вестн. Казан. энергет. ун-та. 2012. № 1(12). С. 24–32.
8. Bridgwater A.V. Biomass Fast Pyrolysis // Thermal Science. 2004. Vol. 8, no. 2. Pp. 21–49. Режим доступа: [www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2004/0354-98360402021B.pdf](http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2004/0354-98360402021B.pdf) (дата обращения: 17.10.18). DOI: 10.2298/TSCI0402021B
9. Di Blasi C. Heat, Momentum and Mass Transport through a Shrinking Biomass Particle Exposed to Thermal Radiation // Chemical Engineering Science. 1996. Vol. 51, iss. 7. Pp. 1121–1132. DOI: 10.1016/S0009-2509(96)80011-X
10. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Gerasimov M.K., Petrov V.I., Gilfanov K.K. The Mathematical Description of the Gasification Process of Woody Biomass in Installations with a Plasma Heat Source for Producing Synthesis Gas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. Pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012092
11. Safin R., Barcik Š., Tuntsev D., Safin R., Hismatov R. A Mathematical Model of Thermal Decomposition of Wood in Conditions of Fluidized Bed // Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. 2016. Vol. 58(2). Pp. 141–148. DOI: 10.17423/afx.2016.58.2.15
12. Timerbaev N.F., Safin R.R., Safin R.G., Ziatdinova D.F. Modeling of the Process of Energy-Technological Treatment of Wood Waste by Method of Direct-Flow Gasification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9, no. 5. Pp. 141–146.

13. Tuntsev D.V., Safin R.G., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The Mathematical Model of Fast Pyrolysis of Wood Waste // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015), Tomsk, December 1–4, 2015. Tomsk, 2015. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.7414929

Поступила 17.10.18

UDC 66.092–977

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

### Heat and Mass Transfer Simulation in the Pyrolysis Zone

*A.V. Safina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*N.F. Timerbaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*D.F. Ziatdinova, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*R.G. Safin, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*A.R. Khabibullina, Assistant*

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; e-mail: cfaby@mail.ru, cpekgeu@gmail.com, ziatdinova2804@gmail.com, safin@kstu.ru, almira-h@rambler.ru

Nowadays, about 200 mln m<sup>3</sup> of timber is harvested in our country. At all stages of the process (from harvesting to raw wood processing) a large amount of waste that does not find any usage and has negative influence on the environment is generated at the same time. Pyrolysis is one of the feasible directions of such waste processing. The yield of pyrolysis products depends on the external conditions and the raw materials properties. The article describes a plant targeting for production of activated carbon from wood chips. The plant is designed as a mine. It has a pyrolysis zone operating in periodic mode. Heating elements are located in the lower part of the pyrolysis zone. They heat industrial chips prior to intense exothermic reactions. Thermal energy is transferred to the heating elements by a heat pipe placed in charcoal after the activation stage, which has temperature about 800 °C. Valuable products are obtained from wood waste with the use of this plant, which are in a great demand in the industry. The environmental problem of many wood processing enterprises is being solved; disposal of waste dumps. Mathematical model of the process has been developed based on the analysis of the physical phenomenon and pyrolysis process formalization in the activated carbon plant. The model allows calculating the total time spent on wood waste processing and the main design parameters of the plant.

*Keywords:* mathematical model, heat and mass transfer, charcoal, pyrolysis, activation, gas flow.

### REFERENCES

1. Safin R.G., Timerbaev N.F., Safin R.R., Ziatdinova D.F., Khabibullina A.R., Akhmetova D.A., Safina A.V., Sattarova Z.G., Stepanova T.O. *Ustanovka dlya proizvodstva drevesnogo uglya* [Charcoal Plant]. Patent RF, no. 2582696. 2014.

2. Safin R.G. *Aktual'nyye problemy tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovitel'nykh i derevopererabatyvayushchikh proizvodstv*: ucheb. posobiye [Topical Issues of Wood Processing and Woodworking Technologies]: учеб. пособие [Topical Issues of Wood Processing and Woodworking Technologies]. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2018. Pp. 1–100.

---

*For citation:* Safina A.V., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F., Safin R.G., Khabibullina A.R. Heat and Mass Transfer Simulation in the Pyrolysis Zone. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 153–160. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.153

sues of technological Processes of Logging and Wood Conversion Industries: Educational Textbook]. Kazan, KSTU Publ., 2016. 408 p. (In Russ.)

3. Safin R.G., Akhmetova D.A., Safina A.V., Ziatdinov R.R., Khabibullina A.R. Matematicheskaya model' teplomassoobmennykh protsessov, protekayushchikh pri pererabotke drevesnykh otkhodov [Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes Occurring in Wood Waste Processing]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 161–163.

4. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Safina A.V., Khabibullina A.R. Piroliznaya pererabotka otkhodov lesopromyshlennogo kompleksa v drevesnyy ugol' [Pyrolysis of Forest Sector Waste to Charcoal]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 20, pp. 132–134.

5. Safin R.G., Stepanova T.O., Khabibullina A.R. Matematicheskaya model' teplomassoobmennykh protsessov, protekayushchikh pri pererabotke drevesnykh otkhodov [Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes Occurring in Wood Waste Processing]. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Topical Areas of Research of the 21st Century: Theory and Practice]. 2015, vol. 3, no. 7-2(18-2), pp. 413–417.

6. Safina A.V., Timerbaev N.F., Khabibullina A.R., Asayeva L.Sh., Kalashnikova A.S. Modelirovaniye protsessa konvektivnogo okhlazhdeniya drevesnogo uglya v piroliznoy ustanovke [Modeling of Charcoal Convective Cooling in Pyrolysis Plant]. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost'* [Woodworking Industry], 2017, no. 1, pp. 33–39.

7. Timerbaev N.F., Safin R.G., Khisameyeva A.R., Shulayev M.V., Khuzeev M.V. Razrabotka energosberegayushchey tekhnologii gazogeneratsii drevesnykh otkhodov [Development of Energy-Saving Technology of Wood Waste Gas Generation]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012, no. 1(12), pp. 24–32.

8. Bridgwater A.V. Biomass Fast Pyrolysis. *Thermal Science*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 21–49. Available at: [www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2004/0354-98360402021B.pdf](http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2004/0354-98360402021B.pdf) (accessed 17.10.18). DOI: 10.2298/TSCI0402021B

9. Di Blasi C. Heat, Momentum and Mass Transport through a Shrinking Biomass Particle Exposed to Thermal Radiation. *Chemical Engineering Science*, 1996, vol. 51, iss. 7, pp. 1121–1132. DOI: 10.1016/S0009-2509(96)80011-X

10. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Gerasimov M.K., Petrov V.I., Gilfanov K.K. The Mathematical Description of the Gasification Process of Woody Biomass in Installations with a Plasma Heat Source for Producing Synthesis Gas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012092

11. Safin R., Barcik Š., Tuntsev D., Safin R., Hismatov R. A Mathematical Model of Thermal Decomposition of Wood in Conditions of Fluidized Bed. *Acta Facultatis Xylogicae Zvolen*, 2016, vol. 58(2), pp. 141–148. DOI: 10.17423/afx.2016.58.2.15

12. Timerbaev N.F., Safin R.R., Safin R.G., Ziatdinova D.F. Modeling of the Process of Energy-Technological Treatment of Wood Waste by Method of Direct-Flow Gasification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9, no. 5, pp. 141–146.

13. Tuntsev D.V., Safin R.G., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The Mathematical Model of Fast Pyrolysis of Wood Waste. *2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015). Tomsk, December 1–4, 2015*. Tomsk, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.7414929

Received on October 17, 2018



УДК 621.316

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

*А.С. Афанасьев<sup>1</sup>, канд. техн. наук*

*М.А. Болдырев<sup>1</sup>, ст. науч. сотр.*

*П.С. Воронцов<sup>1</sup>, науч. сотр.*

*В.М. Суслов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.*

*Ю.Т. Котов<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.*

*В.К. Вороницын<sup>2</sup>, канд. техн. наук, зав. каф.*

*А.А. Камусин<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.*

<sup>1</sup>Филиал ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, ул. Комарова, д. 13, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141006; e-mail: hit-el@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 1-я Институтская ул., д. 1, г. Мытищи, Московская область, Россия, 141005; e-mail: kotov46@inbox.ru, voronitsyn@mgul.ac.ru

Лесозаготовительная отрасль на сегодняшний день весьма прибыльна и продукция ее востребована. Однако условия работы техники в районах лесозаготовок в России соответствуют III–V категориям эксплуатации. Актуальными являются проблемы, связанные с работой техники в холодный период года. В полной мере это относится и к системам электропитания, основу которых в ряде случаев могут составлять высокоэнергетические литиевые химические источники тока, обеспечивающие надежную работу лесозаготовительной техники и образцов специальной техники в сложных условиях эксплуатации. По сравнению с традиционными электрохимическими системами (никель-кадмиевой, никель-металлгидридной и свинцово-кислотной) литий-ионные аккумуляторные батареи обладают такими преимуществами, как высокие напряжение и плотность энергии, широкий диапазон рабочих температур, длительный срок хранения. Однако данные источники тока имеют ряд недостатков, одним из которых является их пожаро- и взрывоопасность, т. е. возможность возникновения при определенных условиях неуправляемых химических реакций, приводящих к возгоранию и взрыву. В статье показана необходимость применения в высокомоощных литий-ионных аккумуляторных батареях электронных средств защиты, рассмотрены системы контроля и управления с пассивной и активной балансировкой аккумуляторов, предложены рекомендации по их эксплуатации. Приведены результаты испытаний экспериментального образца литий-ионной стартерной аккумуляторной батареи.

*Ключевые слова:* системы контроля и управления, высокомоощная литий-ионная аккумуляторная батарея, пожаро- и взрывобезопасность, пассивная и активная балансировка.

---

*Для цитирования:* Афанасьев А.С., Болдырев М.А., Воронцов П.С., Суслов В.М., Котов Ю.Т., Вороницын В.К., Камусин А.А. Система контроля и управления высокомоощных литий-ионных аккумуляторных батарей // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 161–170. (Изн. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

### *Введение*

Проблемы заготовки древесины в нашей стране становятся все более актуальными. Сегодня лесозаготовки полностью механизированы. На лесосеках можно увидеть разнообразную лесозаготовительную технику: от валочно-пакетирующих машин до харвестеров, от трелевочного трактора до форвардера. Более половины современных и большинство перспективных районов лесозаготовок в России находятся в трех климатических поясах (холодном, умеренно холодном и очень холодном), где средняя продолжительность периода с отрицательными температурами составляет 180 сут при средней температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . Температура воздуха наиболее холодной пятидневки может достигать до  $-35\dots-40^{\circ}\text{C}$ , наиболее холодных суток – до  $-39\dots-45^{\circ}\text{C}$  [2, 3].

Условия работы лесозаготовительной техники в районах лесозаготовок соответствуют III–V категориям эксплуатации. Кроме того, преобладают безгазное ее хранение и продолжительная работа в отрыве от производственной базы [8]. В полной мере это относится и к работе их систем электропитания в холодный период года. В ряде случаев основу систем электропитания могут составлять высокоэнергетические литиевые химические источники тока (ХИТ).

### *Объекты и методы исследования*

ХИТ могут являться одними из основных компонентов, обеспечивающих надежную работу лесозаготовительной техники и образцов специальной техники в сложных условиях эксплуатации. По сравнению с традиционными электрохимическими системами (никель-кадмиевой, никель-металлгидридной и свинцово-кислотной) литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) обладают высокими напряжением и плотностью энергии, широким диапазоном рабочих температур, длительным сроком хранения. Именно ЛИАБ выступают объектом нашего исследования. Однако данные источники тока имеют ряд недостатков, одним из которых является их пожаро- и взрывоопасность, т. е. возникновение при определенных условиях неуправляемых химических реакций, приводящих к возгоранию и взрыву [10]. Современные высокоомощные ЛИАБ способны накапливать значительное количество энергии, высвобождение которой неконтролируемым способом (возгорание или взрыв) может привести к катастрофическим последствиям. В связи с этим при разработке высокоомощных ЛИАБ особое внимание необходимо уделять вопросам обеспечения их пожаро- и взрывобезопасности, что исключило бы возможность возникновения взрыва и возгорания в процессе хранения и эксплуатации. До настоящего времени эти вопросы изучены недостаточно. Цель данной статьи более полно осветить современные подходы к обеспечению пожаро- и взрывобезопасности высокоомощных ЛИАБ.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Подход к решению данного вопроса обусловлен необходимостью широкого внедрения ЛИАБ в перспективные образцы лесозаготовительной и специальной техники, энерговооруженность которых при этом существенно возрастает. Наиболее эффективным методом обеспечения пожаро- и взрывобезопасности высокоомощных ЛИАБ является включение в их конструкцию дополнительных электронных устройств – систем контроля и управления (СКУ) [9].

СКУ представляет собой сложное функциональное устройство, предназначенное для контроля состояния батареи, ключевых эксплуатационных параметров во время заряда и разряда (напряжение, токи, внутренняя температура и температура окружающей среды батареи). Возникновение перезаряда и переразряда, короткого замыкания и чрезмерного разогрева – вот основные причины возгорания и взрыва ЛИАБ. Контролирующие цепи СКУ обеспечивают подачу сигнала на устройства защиты, которые дают сигнал тревоги либо отключают батарею от нагрузки или зарядного устройства при выходе любого из параметров за установленные пределы.

Защита от возникновения опасных режимов работы ЛИАБ осуществляется путем нивелирования разбаланса напряжений аккумуляторов, входящих в ее состав, и формирования управляющих сигналов для изменения работы внешних устройств с помощью СКУ, конструктивно размещаемой как в составе ЛИАБ, так и вне ее [1].

В СКУ, обеспечивающих выравнивание степени заряженности (балансировку) аккумуляторов, применяются методы пассивной и активной балансировки.

СКУ с пассивной балансировкой отличаются тем, что часть энергии аккумулятора с большим напряжением они рассеивают в виде тепла в окружающее пространство. При заряде путем отбора части энергии (тока) такая СКУ снижает ток заряда нивелируемого аккумулятора, уменьшая скорость заряда до тех пор, пока не зарядятся все остальные аккумуляторы. Соответствующую схему можно создать с помощью резистора необходимой мощности и управляемого ключа. Нивелирование можно осуществлять практически на протяжении всего времени заряда. Пример схемы построения пассивной балансировки приведен на рис. 1.

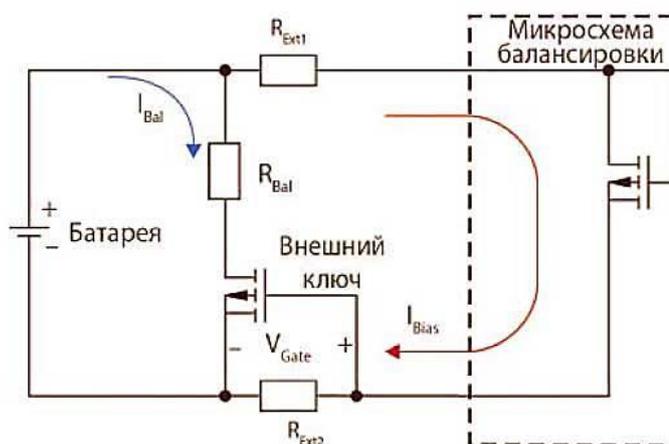


Рис. 1. Схема пассивной балансировки ( $I_{Bal}$  – ток балансировки;  $I_{Bias}$  – ток смещения;  $R_{Bal}$  – сопротивление балансировки;  $V_{Gate}$  – напряжение ключа;  $R_{Ext1}$ ,  $R_{Ext2}$  – выходное сопротивление)

Fig. 1. Scheme of passive balancing ( $I_{Bal}$  – electric current of balancing,  $I_{Bias}$  – displacement current,  $R_{Bal}$  – resistance of balancing,  $V_{Gate}$  – voltage of key,  $R_{Ext1}$ ,  $R_{Ext2}$  – output resistance)

При такой реализации контроллер (микросхема) осуществляет сбор информации о состоянии всех аккумуляторов батареи, сравнивая напряжения на каждом аккумуляторе с верхним и нижним порогом допустимого напряжения. По результатам сравнения с помощью внутреннего логического устройства изменяется алгоритм работы зарядного или разрядного ключевого транзистора. В режиме, когда часть аккумуляторов достигает верхнего порога напряжения, зарядный процесс выполняется одновременно с разрядом каждого из таких аккумуляторов на свое сопротивление с помощью внутренних транзисторных ключей, т. е. осуществляется выравнивание степени заряженности (балансировка) аккумуляторов. При этом ключи разряда недозаряженных элементов не включаются. Поскольку необходимо управлять и зарядом, и разрядом батареи, т. е. токами, текущими в противоположных направлениях, в схеме управления должно быть как минимум два транзисторных ключа. SKU с пассивной балансировкой в основном применяются для ЛИАБ относительно небольшой емкости при ограниченном объеме размещения [5].

В SKU с активной балансировкой передача энергии от более заряженного к менее заряженному аккумулятору осуществляется с минимальными энергетическими потерями. В [13] приводится схема построения системы активной балансировки с использованием микросхемы BQ78PL114, произведенной по технологии PowerPump, и индуктивного преобразователя для передачи энергии (рис. 2).

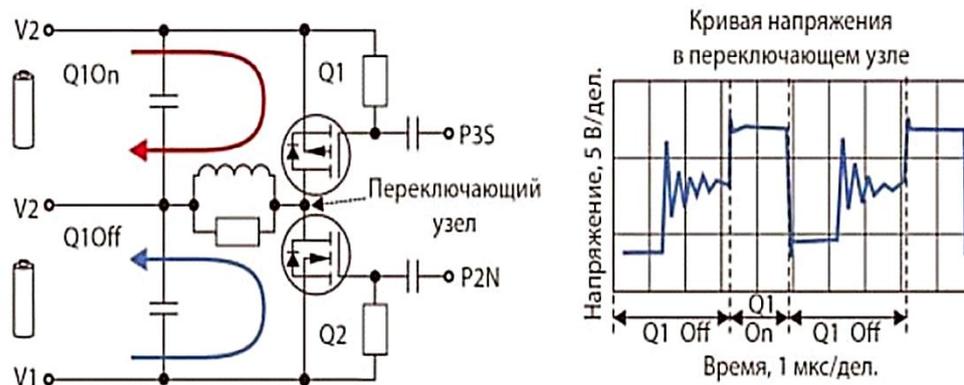


Рис. 2. Схема активной балансировки по технологии PowerPump (Q1, Q2 – ключи управления; V1, V2 – напряжения на выводах аккумулятора; P3S, P2N – управляющие выводы микросхемы)

Fig. 2. Scheme of an active balancing system designed by PowerPump technology (Q1, Q2 – control keys, V1, V2 – voltages at the battery terminals, P3S, P2N – microchip gate terminals)

Метод перераспределения заряда по технологии PowerPump при нивелировании аккумуляторов учитывает состояние заряда батареи, а не напряжение на аккумуляторе, что значительно улучшает характеристики ЛИАБ [10].

Полевые транзисторы и дроссель составляют промежуточный понижающий/повышающий преобразователь. Если микросхема определяет, что верхнему аккумулятору нужно передать энергию нижнему аккумулятору, то на выводе схемы P3S формируется сигнал частотой около 200 кГц с коэффициентом заполнения примерно 30 %. Когда ключ Q1 открыт, энергия верхнего аккумуля-

лятора запасается в дросселе, когда ключ Q1 закрыт, энергия, запасенная в дросселе, через обратный диод ключа Q2 поступает в нижний аккумулятор. Потери энергии при этом невелики и в основном приходятся на диод и дроссель. В качестве накопителей энергии могут использоваться конденсаторы [1].

Активную балансировку аккумуляторов в батареях можно также осуществлять с помощью преобразователей энергии. В этих устройствах для выравнивания заряда применяют индукторы, или преобразователи для переноса энергии с одного аккумулятора на другой.

К активному способу балансировки аккумуляторов в батарее можно отнести и следующее решение. Заряд каждого аккумулятора производится отдельно, а контроль параметров аккумуляторов (напряжение, температура и т. д.) и своевременное отключение батареи от нагрузки при достижении предельных значений параметров осуществляются за счет встроенной в батарею схемы. При этом зарядное устройство не только контролирует напряжение каждого аккумулятора, но и предохраняет все аккумуляторы от перезаряда [12].

Современная концепция проектирования электрической схемы аккумуляторной батареи сводится к тому, чтобы снабдить батарею электронным блоком, управляющим ее работой. Каждый аккумулятор батареи имеет свою микросхему, которая контролирует зарядный цикл, температуру, давление и т. д. и проектируется для каждого типа аккумулятора под заданный набор параметров.

Хотя использование микроконтроллеров в ЛИАБ увеличивает стоимость, массу и размеры оборудования, но зато многократно повышает ресурс, надежность и, главное, пожаро- и взрывобезопасность.

Высокомощные ЛИАБ имеют в своем составе большое количество аккумуляторов. В ЛИАБ каждый аккумулятор должен быть снабжен своим собственным устройством обнаружения перенапряжения. Требуются также несколько температурных датчиков, так как батарея не имеет однородной температуры по всем аккумуляторам. Последовательно соединенные аккумуляторы должны комплектоваться одним устройством контроля и защиты, если только конструкция не предполагает, что заряд каждого аккумулятора обеспечивается отдельно. В таких случаях для каждого аккумулятора предполагается собственный контроль. Подобное усложнение необходимо для высоковольтных батарей, содержащих большое количество последовательно соединенных аккумуляторов. В противном случае отдельные аккумуляторы могут стать перезаряженными и вызвать преждевременный отказ целой батареи.

Для высоковольтных батарей следует применять принцип блочно-модульного конструирования. В этом случае батареи собирают из модулей, состоящих не более чем из 8 последовательно соединенных аккумуляторов. Конструкция модуля должна обеспечивать автоматическое отключение отказавшего аккумулятора с сохранением работоспособности всего модуля. Количество модулей в составе ЛИАБ определяется требуемыми значениями выходного напряжения и емкости. Каждый модуль должен иметь собственное устройство электронного контроля.

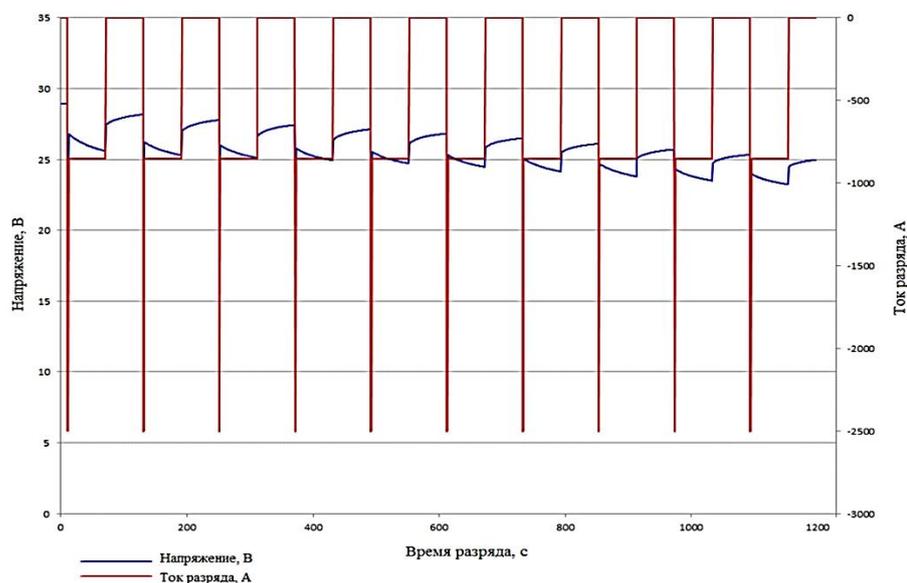
Высокомощные ЛИАБ большой емкости целесообразно комплектовать только датчиками давления и температуры, а токовыводы от каждого аккумулятора выводить на отдельный разъем. В этом случае микроконтроллером должны быть снабжены и зарядные устройства. При усовершенствовании по требованию потребителя в такие батареи могут быть дополнительно встроены микроконтроллер, термопредохранители, датчики температуры и давления для индивидуального заряда и разряда и контроля параметров каждого аккумулятора.

В 2014 г. в лаборатории Филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России были проведены испытания экспериментального образца литий-ионной стартерной аккумуляторной батареи 7×10ЛИГП-К, разработанной Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе с использованием приведенных выше принципов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности.

Цель испытаний – определение фактических эксплуатационных характеристик и возможности применения высокоомощных ЛИАБ в перспективной лесозаготовительной и специальной технике.

Технические характеристики ЛИАБ 7×10ЛИГП-К, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице, а вольт-амперные характеристики – на рис. 3.

Характеристика	Единица измерения	Значение
Номинальное напряжение	В	25
Номинальная емкость	А·ч	190
Напряжение полностью заряженной батареи	В	29±0,05
Конечное напряжение разряда	В	17,5±0,5
Максимальный ток стартерного режима разряда	А	850
Максимальный (пиковый) ток в стартерном режиме разряда	А	2500
Диапазон температур при эксплуатации	°С	-40...-50
Габаритные размеры	мм	235×237×515
Масса	кг	53



*a*

Рис. 3 (начало). Вольт-амперные характеристики ЛИАБ 7×10ЛИГП-К при разряде стартерным режимом в нормальных климатических условиях (*a*)

Fig. 3. (Continue on next page). Volt-ampere characteristics of Li-ion batteries 7×10LIGP-K at discharge in starter made under normal climatic conditions (*a*)

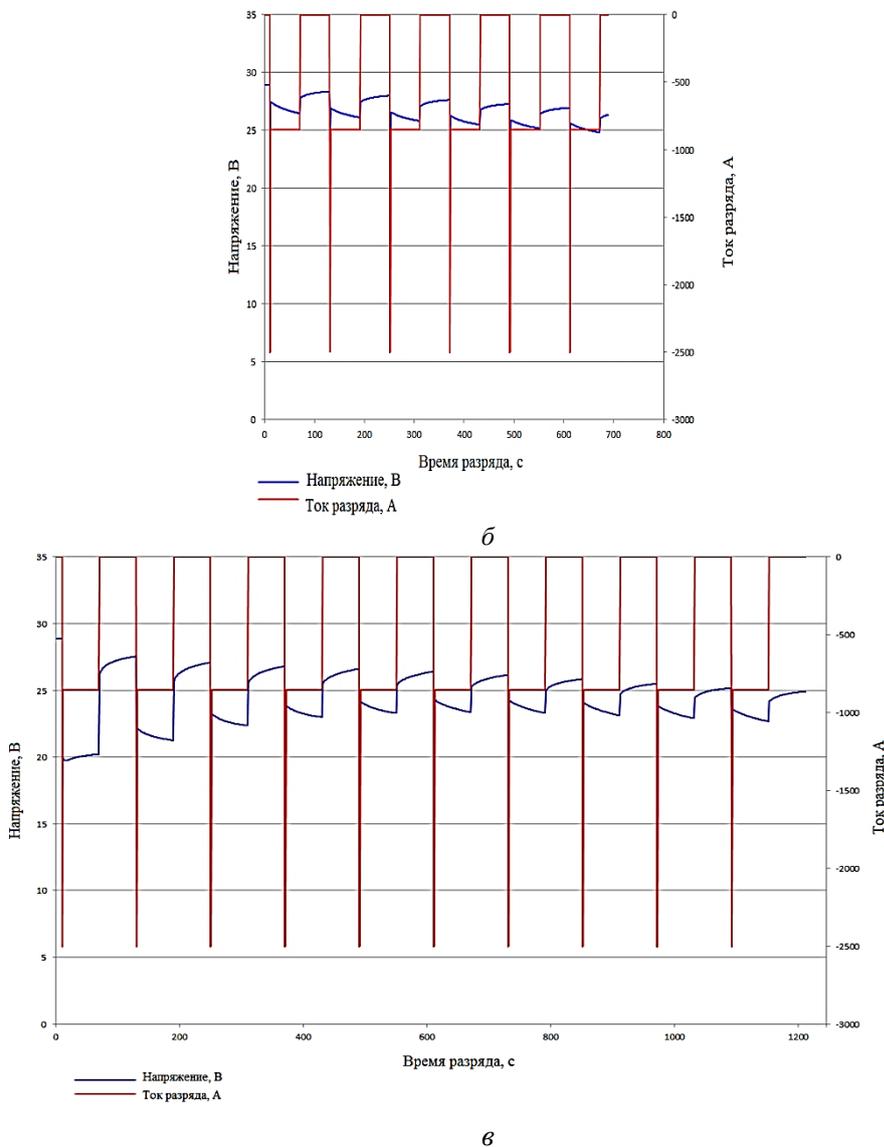


Рис. 3 (окончание). Вольт-амперные характеристики ЛИАБ 7×10ЛИГП-К при воздействии повышенной (**а**) и пониженной (**б**) температуры окружающей среды

Fig. 3. (Continued). Volt-ampere characteristics of Li-ion batteries 7×10LIGP-K at exposure to high (**a**) and low (**b**) temperatures of the environment

В результате испытаний экспериментального образца 7×10ЛИГП-К в нормальных климатических условиях и при воздействии повышенной и пониженной температуры окружающей среды была подтверждена его работоспособность при последовательных циклических разрядах стартерным режимом согласно диаграмме нагрузок перспективных объектов специальной техники [4–7, 11].

Безопасность эксплуатации 7×10ЛИГП-К обеспечивается встроенной СКУ, которая осуществляет:

балансировку аккумуляторов в ЛИАБ с точностью  $\pm 0,05$  В;

измерение напряжений на аккумуляторах с точностью  $\pm 0,02$  В в рабочем диапазоне изменения напряжения на аккумуляторе 1,40...4,14 В;  
измерение температуры аккумуляторов с точностью  $\pm 2$  °С;  
измерение тока с точностью  $\pm 3$  А;  
управление процессом заряда.

СКУ содержит пассивную систему баланса, блок питания, мультиплексор напряжений блоков аккумуляторов и датчиков температуры, датчик тока, силовое зарядное реле, датчик контроля предохранителя, предохранитель на 50 А, блок усилителей согласования, процессор управления (микромикроконтроллер). Устройство с помощью системы баланса обеспечивает балансировку (выравнивание) напряжений аккумуляторов последовательно соединенных аккумуляторных блоков, сводя разность напряжений самого заряженного и самого разряженного блока в аккумуляторной батарее к минимуму.

В результате испытаний подтверждена эффективность работы СКУ, нештатных ситуаций в отношении безопасности эксплуатации испытуемого образца не зафиксировано.

#### *Заключение*

Система контроля и управления является неотъемлемой частью современных высокомоощных ЛИАБ и предназначена для обеспечения их пожаро- и взрывобезопасности. Функционал и схемы построения СКУ в ЛИАБ, как правило, реализуются индивидуально с учетом требований конкретного потребителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганзбург М.Ф., Груздев А.И., Кузовков А.В., Трофименко В.И. Принципы построения систем контроля и защиты литий-ионных аккумуляторных батарей // Физические проблемы водородной энергетики: тез. докл. V рос. конф., Санкт-Петербург, 16–18 нояб. 2009 г. СПб., 2009. С. 205–206.
2. Горбунов А.А., Бургонутдинов А.М., Бурмистрова О.Н., Тимохова О.М. К вопросу увеличения срока службы работы лесовозного автомобильного транспорта в суровых климатических условиях // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-10. С. 2092–2098.
3. Котиков В.М., Егоров Л.И., Ерхов А.В., Куликов М.И. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли (Колесные и гусеничные лесные машины). Т. 1. Двигатели внутреннего сгорания: учеб. М.: МГУЛ, 2007. 353 с.
4. Протоколы испытаний № 2-2014, 3-2014, 4-2014 испытательной лаборатории Филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России. Мытищи, 2014.
5. Румянцев А.М., Рыкованов А.С., Беляев С.С. Современные литий-ионные аккумуляторы. Батареи на их основе // Компоненты и технологии. 2015. № 5. С. 96–100.
6. Рыкованов А. Системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая Электроника. 2009. № 1. С. 52–55.
7. Садовников А.В., Макаручук В.В. Литий-ионные аккумуляторы // Молодой ученый. 2016. № 23. С. 84–89.
8. Силаев Г.В. Тракторы и автомобили с основами технической механики: учеб. для вузов. М.: МГУЛ, 2009. 370 с.
9. Таганова А.А. Современный рынок герметичных аккумуляторов для портативной аппаратуры // Современная электроника. 2009. № 1. С. 10–12.
10. Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: справ. СПб.: Химиздат, 2005. 264 с.

11. Gao H.-Q., Zhang Z.-A., La Y.-Q., Li J., Liu Y.-X. // J. Cent. S. University Technol. Sci. And Technol. Mining and Met. 2008. Vol. 15, no. 6. 830 p.

12. Wen S. Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life // Analog Applications Journal. 2009. 1Q (1-й квартал). Pp. 14–18. Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf> (дата обращения: 16.01.19).

13. 電子デバイス・産業用機器 [Electronic Devices/Industrial Equipment]. Panasonic Site. Режим доступа: <http://industrial.panasonic.com/jp/> (дата обращения 17.10.18).

Поступила 17.10.18

UDC 621.316

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

### The Control and Management System of High-Power Lithium-Ion Batteries

*A.S. Afanas'ev*<sup>1</sup>, *Candidate of Engineering Sciences*

*M.A. Boldyrev*<sup>1</sup>, *Senior Research Scientist*

*P.S. Vorontsov*<sup>1</sup>, *Research Scientist*

*V.M. Suslov*<sup>1</sup>, *Candidate of Engineering Sciences, Leading Research Scientist*

*Yu.T. Kotov*<sup>2</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*V.K. Voronitsyn*<sup>2</sup>, *Candidate of Engineering Sciences, Head of Department*

*A.A. Kamusin*<sup>2</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor*

<sup>1</sup>Branch of the 46th Central Research Institute of the Russian Defense Ministry, ul. Komarova, 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russian Federation; e-mail: hit-el@mail.ru

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi Branch, 1-ya Institutskaya ul., 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: kotov46@inbox.ru, voronitsyn@mgul.ac.ru

Today the logging industry is very profitable and its products are highly-demanded. However, the operating conditions of vehicles in the Russian logging areas correspond to the 3rd – 5th operation categories. Topical issues connected with the vehicle operation in the cold period. It applies to power supply systems to the full extent. High-power lithium chemical current sources, which ensure reliable operation of logging vehicles and samples of special vehicles under difficult operating conditions, can be a base for the power supply systems. In comparison with traditional electrochemical systems (nickel-cadmium, nickel-metal hydride and lead-acid), lithium-ion batteries have such advantages as high voltage, and energy density, broad range of operating temperatures, long shelf life. However, these current sources have a number of drawbacks; one of which is risk of fire and explosion, i.e. the possibility of uncontrolled chemical reactions in certain conditions leading to flame development and detonation. The article shows the importance of usage electronic means of protection in high-power lithium-ion batteries; control and management systems with passive and active balancing of batteries; offered recommendations for their use. The results of testing an experimental sample of a lithium-ion starter battery are presented.

**Keywords:** control and management systems, high-power lithium-ion battery, fire and explosion safety, passive and active balancing.

---

*For citation:* Afanas'ev A.S., Boldyrev M.A., Vorontsov P.S., Suslov V.M., Kotov Yu.T., Voronitsyn V.K., Kamusin A.A. The Control and Management System of High-Power Lithium-Ion Batteries. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 161–170. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.161

## REFERENCES

1. Ganzburg M.F., Gruzdev A.I., Kuzovkov A.V., Trofimenko V.I. Printsipy postroyeniya sistem kontrolya i zashchity lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey [Design Concepts of Monitoring and Protection Systems of Lithium-Ion Batteries]. *Fizicheskiye problemy vodorodnoy energetiki: tez. dokl. V ros. konf., Sankt-Peterburg, 16–18 noyab. 2009 g.* [Physical Issues of Hydrogen Energy: Proceedings of the 5th Russian Conf., Saint Petersburg, November 16–18, 2009]. Saint Petersburg, 2009, pp. 205–206.
2. Gorbunov A.A., Burgonutdinov A.M., Burmistrova O.N., Timokhova O.M. K voprosu uvelicheniya sroka sluzhby raboty lesovoznogo avtomobil'nogo transporta v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [To the Issue of Increasing the Service Life of Logging Transport in Harsh Climate]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 2-10, pp. 2092–2098.
3. Kotikov V.M., Egorov L.I., Erkhov A.V., Kulikov M.I. *Teoriya i konstruktsiya mashin i oborudovaniya otrasli (Kolesnyye i gusenichnyye lesnyye mashiny). T. 1. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: ucheb.* [Theory and Design of Machines and Equipment of the Industry (Wheeled and Tracked Forest Vehicles). Vol. 1. Internal Combustion Engines: Textbook]. Moscow, MGUL Publ., 2007. 353 p. (In Russ.)
4. *Protokoly ispytaniy № 2-2014, 3-2014, 4-2014 ispytatel'noy laboratorii Filiala FGBU «46 TSNII» Minoborony Rossii* [Testing Records no. 2-2014, 3-2014, 4-2014 of the Testing Laboratory of Branch of the 46th Central Scientific Research Institute, Ministry of Defense, Russia]. Mytishchi, 2014.
5. Rummyantsev A.M., Rykovanov A.S., Belyayev S.S. Sovremennyye lityi-ionnyye akkumulyatory. Batarei na ikh osnove [Modern Lithium-Ion Batteries. Batteries Based on Them]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2015, no. 5, pp. 96–100.
6. Rykovanov A. Sistemy balansa Li-ion akkumulyatornykh batarey [Balance Systems of Li-ion Batteries]. *Silovaya Elektronika* [Power Electronics], 2009, no. 1, pp. 52–55.
7. Sadovnikov A.V., Makarchuk V.V. Lityi-ionnyye akkumulyatory [Lithium-Ion Batteries]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, no. 23, pp. 84–89.
8. Silayev G.V. *Traktory i avtomobili s osnovami tekhnicheskoy mekhaniki: ucheb. dlya vuzov* [Tractors and Automobiles with the Basics of Engineering Mechanics: Textbook for Universities]. Moscow, MGUL Publ., 2009. 370 p. (In Russ.)
9. Taganova A.A. Sovremennyy rynek germetichnykh akkumulyatorov dlya portativnoy apparatury [Modern Market of Sealed Batteries for Portable Equipment]. *Sovremennaya elektronika*, 2009, no. 1, pp. 10–12.
10. Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S.B. *Germetichnyye khimicheskiye istochniki toka: elementy i akkumulyatory. Oborudovaniye dlya ispytaniy i ekspluatatsii: spravochnik* [Sealed Chemical Current Sources: Elements and Batteries. Equipment for Testing and Operation: Handbook]. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2005. 264 p. (In Russ.)
11. Gao H.-Q., Zhang Z.-A., La Y.-Q., Li J., Liu Y.-X. *J. Cent. S. University Technol. Sci. And Technol. Mining and Met.*, 2008, vol. 15, no. 6. 830 p.
12. Wen S. Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life. *Analog Applications Journal*, 2009, 1Q, pp. 14–18. Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf> (accessed 17.10.18).
13. 電子デバイス・産業用機器 [Electronic Devices/Industrial Equipment]. *Panasonic Site*. Available at: <http://industrial.panasonic.com/jp/> (accessed 17.10.18).

Received on October 17, 2018



УДК 049.3

## НОВАЯ КНИГА О МЕЖДУНАРОДНОМ СОЮЗЕ ЛЕСНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

В сентябре 2018 г. в Корваллисе (штат Орегон, США) во время заседания Совета Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО) состоялась презентация новой книги Виктора Константиновича Теплякова «Почетные члены ИЮФРО: 1953–2017/Honorary Members of IUFRO: 1953–2017», изданной в Вене на английском языке. В ней впервые представлены краткие биографические очерки о сорока почетных членах ИЮФРО с момента основания в 1953 г. этого самого высокого признания ИЮФРО и до настоящего времени.

Содержательный текст книги предваряет вступительное слово Президента ИЮФРО профессора Майкла Вингфилда, который тепло и весьма комплиментарно отозвался о работе В.К. Теплякова, упомянув и его предшествующую, изданную на двух языках монографию «История съездов ИЮФРО и Россия».

ИЮФРО, основанный в 1892 г. в Эберсвальде и отметивший свой 125-летний юбилей в Эберсвальде и Фрайбурге, на протяжении многих десятилетий объединяет исследователей леса со всего мира. Союз является некоммерческим и добровольным международным научным объединением, открытым для всех организаций и частных лиц, участвующих в изучении лесного дела. В настоящее время в составе ИЮФРО более 110 стран, которые представляют более 15 000 ученых из 700 учреждений-членов. Организации, учреждения и ученые нашей страны широко, хотя может быть и недостаточно, представлены в этом Союзе.

Необходимо признать, что структура ИЮФРО – совокупность, как правило, достаточно активных и плодотворных ученых-участников Союза – достаточно представительно отражает весь спектр лесных (в самом широком смысле слова) и смежных с ними исследований. И в этом случае выход в свет книги биографий наиболее выдающихся и известнейших ученых, фактически элиты лесной науки, следует считать значимым событием.

Среди почетных членов ИЮФРО – ученые Австралии, Австрии, Великобритании, Венгрии, Германии, Италии, Канады, Малайзии, Нидерландов, Норвегии, Польши, Республики Корея, Соединенных Штатов Америки, Финляндии, Франции, Швейцарии, Швеции, Югославии. В 1986 г. на XVIII Всемирном конгрессе ИЮФРО в Любляне (Югославия) почетным членом стал наш соотечественник, академик Иван Степанович Мелехов. Наряду с широко известными профессиональными достижениями И.С. Мелехова была отмечена его почти 30-летняя деятельность в ИЮФРО как участника и докладчика на ряде конгрессов, в разные годы в качестве регионального представителя от Восточной Европы, члена Постоянного комитета ИЮФРО, Исполнительного совета ИЮФРО, Номинационного комитета ИЮФРО по награждениям.

Объем книги predetermined форму биографических очерков. Каждый из них включает годы жизни, краткое описание семьи, полученного образования, развития карьеры, характеристику профессиональной деятельности и признание заслуг на национальном и международном уровнях, описание работы в ИЮФРО, краткий список важнейших публикаций, а также ссылки на библиографические источники. Книга написана на английском языке, однако в ней были использованы разнообразные материалы на других языках, что, естественно, потребовало дополнительных и весьма трудоемких усилий.

Оценивая индивидуально почетных членов ИЮФРО, можно найти много общих черт: хороший исследователь, администратор, педагог и общественный деятель, признанный на национальном и международном уровнях. Все эти выдающиеся люди в разные годы оказали значительное влияние на развитие ИЮФРО, способствовали росту и расширению сфер деятельности этой старейшей и уникальной организации. Их личная история и профессиональная карьера отражают развитие различных направлений лесных исследований в постоянно изменяющихся социальных, экономических и политических условиях. Почетные члены являются яркими примерами мудрого руководства в преодолении препятствий, при поддержке и развитии возможностей. Их опыт представляет весьма ценный ресурс, из которого не только молодые, но и состоявшиеся ученые могут извлечь положительные уроки и создать основу на будущее.

Эта книга, несомненно, будет представлять определенный интерес для студентов, исследователей и руководителей лесных отраслей, для тех, кто стремится больше узнать об ИЮФРО и путях развития исследований в лесном секторе.

Текст книги в электронном виде размещен на сайте ИЮФРО в разделе «Основные публикации/General Publications»: <https://www.iufro.org/uploads/media/iufro-honorary-members-2018.pdf>.

***В.С. Шалаев, д-р техн. наук, проф.***

Мытищинский филиал  
Московского государственного технического  
университета им. Н.Э. Баумана

**New Book on the International Union of Forest Research Organizations**

*V.S. Shalaev, Doctor of Engineering Sciences*

Mytishchi Branch, Bauman Moscow State Technical University

---