

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

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

2024

УЧРЕДИТЕЛЬ И 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)

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Гаврилова О.И., д-р с.-х. 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)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Коновалов В.Ф., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Уфа)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
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)
Посыпанов С.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
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)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Царев А.П., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Воронеж)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Щекалев Р.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

1

2024

FOUNDER AND 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)

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Gavrilova O.I., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Konovalov V.F., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Ufa)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
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)
Posypanov S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
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)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Tsarev A.P., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Voronezh)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shchekalev R.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- С.Л. Шевелев, С.В. Усов, Л.И. Романова.* Оценка секвестрационного потенциала осиново-березовых древостоев островных лесостепей Средней Сибири..... 9
- А.Л. Федорков.* Лесная селекция и генетическое разнообразие древесных пород..... 23
- Д.А. Семенякин, И.В. Тихонова.* Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок..... 33
- А.С. Ильинцев, Е.М. Романов, В.В. Воронин, А.П. Богданов.* Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России..... 52
- М.И. Седаева, А.К. Эжарт, А.Н. Кравченко.* Репродуктивные показатели липы Нащокина (*Tilia nasczokinii* Stepanov)..... 65
- Н.Р. Сунгурова, О.П. Лебедева, С.Р. Страздаускене.* Адаптивный потенциал видов рода *Spiraea* L. в условиях Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича..... 77
- М.З. Моллаева, Ф.А. Темботова.* Морфологическая изменчивость ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris* L. в пределах Тебердинского национального парка..... 91
- Г.Г. Терехов, Е.М. Андреева, С.К. Стеценко.* Выращивание культур кедра сибирского в условиях повреждаемости дикими животными..... 101
- Е.В. Болданова.* Точка росы как основа оперативного показателя лесопожарной опасности..... 114

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- И.В. Петухов, К.О. Иванов, Д.М. Ворожцов, А.А. Роженцов, Н.И. Роженцова, Л.А. Стешина.* Сегментация перекрывающихся изображений деревьев на цифровых снимках лесных массивов..... 126
- С.В. Посыпанов, К.В. Козлов.* Теоретическое обоснование держащей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов..... 141

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.А. Каптелкин, Н.В. Куликова, С.Н. Рыкунин.* Повышение выхода пиломатериалов при распиловке с брусковкой..... 152
- В.А. Мартынов, М.С. Лисятников, А.В. Лукина, С.И. Рощина.* Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях..... 168

*ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ
И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ*

- С.В. Анискин, В.С. Куров.* Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства..... 182
- А.В. Сафина, Д.Ф. Зиятдинова, Л.Р. Назипова, Р.Г. Сафин, К.В. Валеев.* Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы..... 195
-


 CONTENTS

FORESTRY

<i>S.L. Shevelev, S.V. Usov, L.I. Romanova.</i> Assessment of the Sequestration Potential of the Aspen-Birch Stands in the Insular Forest-Steppes of Central Siberia.....	9
<i>A.L. Fedorkov.</i> Forest Tree Breeding and Genetic Diversity of Wood Species.....	23
<i>D.A. Semenyakin, I.V. Tikhonova.</i> The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling.....	33
<i>A.S. Ilintsev, E.M. Romanov, V.V. Voronin, A.P. Bogdanov.</i> Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia	52
<i>M.I. Sedaeva, A.K. Ekart, A.N. Kravchenko.</i> Reproductive Indicators of Nasczokin's Lime (<i>Tilia nasczokinii</i> Stepanov).....	65
<i>N.R. Sungurova, O.P. Lebedeva, S.R. Strazdauskene.</i> Adaptive Capacity of Species of the Genus <i>Spiraea</i> L. in the Conditions of the Dendrological Garden Named after I.M. Stratonovich.....	77
<i>M.Z. Mollaeva, F.A. Tembotova.</i> Morphological Variability of the Assimilation Apparatus of <i>Pinus sylvestris</i> L. within the Teberda National Biosphere Reserve.....	91
<i>G.G. Terekhov, E.M. Andreeva, S.K. Stetsenko.</i> Cultivating Siberian Stone Pine Plantations under Wild Animal Damage Conditions.....	101
<i>E.V. Boldanova.</i> Dew Point as a Basis for the Operational Indicator of Forest Fire Danger.....	114

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>I.V. Petukhov, K.O. Ivanov, D.M. Vorozhtsov, A.A. Rozhentsov, N.I. Rozhentsova, L.A. Steshina.</i> Segmentation of Overlapping Tree Images in the Digital Photographs of Forest Areas.....	126
<i>S.V. Posypanov, K.V. Kozlov.</i> Theoretical Justification of the Holding Power of a Mobile Anchor for Holding Timber-Rafting Objects.....	141

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- A.A. Kaptelkin, N.V. Kulikova, S.N. Rykunin.* Increasing Sawn Timber Yield in Cant Sawing..... 152
- V.A. Martynov, M.S. Lisyatnikov, A.V. Lukina, S.I. Roshchina.* The Use of Thermally Damaged Wood in Laminated Wood Beam Structures..... 168

*TECHNOLOGY OF CHEMICAL WOOD PROCESSING
AND PRODUCTION OF WOOD-POLYMER COMPOSITES*

- S.V. Aniskin, V.S. Kurov.* Recovery and Purification of Gas Emissions from Pulp Production..... 182
- A.V. Safina, D.F. Ziatdinova, L.R. Nazipova, R.G. Safin, K.V. Valeev.* The Engineering Procedure for Calculating the Plant for Betulin Extraction from Birch Bark..... 195
-



Научная статья

УДК 630.235.5:630.9(1-925.12)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-9-22

Оценка секвестрационного потенциала осиново-березовых древостоев островных лесостепей Средней Сибири

С.Л. Шевелев, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-7282-2019](https://orcid.org/0000-0002-6127-8589),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6127-8589>

С.В. Усов, аспирант; ResearcherID: [AAB-4651-2022](https://orcid.org/0000-0003-2516-694X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2516-694X>

Л.И. Романова[✉], канд. биол. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-2272>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; shewel341@yandex.ru, serus1303@yandex.ru, ontogenez16@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 03.02.22 / Одобрена после рецензирования 10.05.22 / Принята к печати 13.05.22

Аннотация. Лесостепи Средней Сибири, занимающие предгорные прогибы и межгорные котловины, разделенные таежной растительностью, считаются островными. Лесная древесная растительность по большей части представлена березовыми, осиновыми, лиственничными и сосновыми древостоями. Определяющую роль в экологической устойчивости лесных территорий играют лиственные насаждения. Цель работы – установление особенностей динамики отдельных элементов леса в смешанных лиственных древостоях в пределах лесного массива. Решались следующие задачи: дать характеристику лесного массива, динамики таксационных показателей основных и сопутствующих элементов смешанных древостоев; оценить вклад древостоев в углеродный баланс. В основу работы положены данные 548 таксационных выделов. Выявлены особенности возрастной структуры массива, представленность древостоев различных полнот и производительности. Выполнена оценка изменчивости средних таксационных показателей древостоев в разные возрастные периоды. Полученные средние значения стали основой для математического моделирования. Оказалось, что процесс с достаточной степенью адекватности отражается функцией Вейбулла. Оценка точности уравнений велась по коэффициенту детерминации и стандартной ошибке уравнения. На основе полученных математических моделей построена таблица динамики средних таксационных показателей древостоев элементов леса и всего смешанного древостоя в целом. Рассматриваемая биологическая система древесной лесной растительности обладает значительными возможностями депонирования углерода. В настоящее время нет единой общепризнанной методики оценки эффективности данного процесса. Отечественными и зарубежными исследователями на материале различных лесорастительных зон собран большой объем данных, однако методики сбора различны. Для установления запасов углерода в древостоях – объектах исследования – использован

© Шевелев С.Л., Усов С.В., Романова Л.И., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

конверсионно-объемный метод. Получены данные, иллюстрирующие динамику запасов углерода в осиново-березовых древостоях островных лесостепей Средней Сибири. **Ключевые слова:** лесной массив, островные лесостепи, углерод, депонирование углерода, секвестрационный потенциал, Средняя Сибирь

Для цитирования: Шевелев С.Л., Усов С.В., Романова Л.И. Оценка секвестрационного потенциала осиново-березовых древостоев островных лесостепей Средней Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 9–22. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-9-22>

Original article


Assessment of the Sequestration Potential of the Aspen-Birch Stands in the Insular Forest-Steppes of Central Siberia

Sergey L. Shevelev, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-7282-2019](https://orcid.org/0000-0002-6127-8589),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6127-8589>

Sergey V. Usov, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAB-4651-2022](https://orcid.org/0000-0003-2516-694X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2516-694X>

Larisa I. Romanova , Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-2272>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; shewel341@yandex.ru, serus1303@yandex.ru, ontogenez16@mail.ru 

Received on February 3, 2022 / Approved after reviewing on May 10, 2022 / Accepted on May 13, 2022

Abstract. The forest-steppes of Central Siberia occupying submontane troughs and intermountain basins separated by taiga vegetation are considered insular. Forest woody vegetation is mainly represented by birch, aspen, larch and pine stands. A decisive role in the ecological sustainability of forest areas is played by larch plantations. This study has aimed to identify the characteristics of the dynamics of individual forest elements in the mixed deciduous stands within the forest area. The tasks have been to identify the characteristics of the forest area, characterize the dynamics of the taxation parameters of major and minor elements of the mixed stands and assess the contribution of the stands to the carbon balance. The work is based on the data of 548 strata. We have established the characteristics of the forest area age structure and how the stands of various completeness and productivity are represented in it. We have also estimated the variability of the average stands taxation parameters in different age periods. The average values obtained have become the basis for mathematical modeling of the table of the dynamics of the taxation parameters of the mixed stands. It turns out that the process to a reasonable degree of adequacy is reflected by the Weibull distribution. The accuracy of the equations has been estimated by the value of the coefficient of determination (R^2) and the standard error of the equation (S). On the basis of the obtained mathematical models, we have constructed the table of the dynamics of the average taxation parameters of the stands of the forest elements and of the mixed stand as a whole. The biological system of forest woody vegetation under consideration has a significant carbon sequestration potential. However, there is currently no generally accepted procedure for assessing the effectiveness of this process. Russian and foreign researchers have collected a large amount of data from different regions, but they have been using different methods. To estimate carbon stocks in the stands that are the object of the study, we have used the conversion-volume method for



estimating carbon stocks in forest plantations. The result is the obtained data illustrating the dynamics of carbon stocks in the aspen-birch stands in the insular forest-steppes of Central Siberia.

Keywords: forest area, insular forest-steppes, carbon, carbon sequestration, sequestration potential, Central Siberia

For citation: Shevelev S.L., Usov S.V., Romanova L.I. Assessment of the Sequestration Potential of the Aspen-Birch Stands in the Insular Forest-Steppes of Central Siberia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 9–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-9-22>

Введение

Лесостепи Средней Сибири – Ачинская, Красноярская и Канская, – занимая предгорные прогибы и межгорные котловины, разделены таежной растительностью и поэтому считаются островными. Территория островных лесостепей является одним из наиболее хозяйственно освоенных регионов, вследствие чего здесь образовались достаточно специфические формы растительного покрова. Растительность выполняет важнейшие средообразующие и частично эксплуатационные функции. Знания региональных особенностей формирования лесной растительности, ее динамики могут помочь при решении ряда проблем рационального природопользования; при сохранении необходимых объемов природных комплексов для обеспечения устойчивости биологических лесных систем, свойственных данным природным территориям; при восстановлении и стабилизации углеродного баланса.

Изучение растительного покрова островных лесостепей Средней Сибири ведется уже достаточно продолжительный период. Первые наблюдения были сделаны Д.Г. Мессершмитом, С.Г. Гmeliным, П.С. Палассом, более поздние – В.В. Ревердатто [16], Л.М. Черепниным [21], Е.М. Антиповой [2, 3] и др. По данным последней, в районе исследования лесная растительность представлена 2 классами (лиственные и хвойные леса), 3 группами (мягколиственные, светлохвойные и темнохвойные) и 6 формациями, составленными березовыми (*Betula pendula* Roth.), осиновыми (*Populus tremula* L.) и смешанными (березово-осиновыми) насаждениями, при этом преобладающими являются березовые древостои. Насаждения формируют массивы, а также расположены «колками» среди сельхозугодий и по склонам сопкок. Сосновые (*Pinus sylvestris* L.) и лиственничные (*Larix sibirica* L.) леса тяготеют к окраинам островных лесостепей и в значительной степени расстроены. В настоящее время определяющую роль в поддержании экологической устойчивости лесных территорий в данном регионе играют лиственные насаждения, смешанные и чистые, состоящие из березы, осины, иногда с примесью хвойных пород.

Цель работы – установление особенностей динамики отдельных элементов леса в смешанных осиново-березовых древостоях в пределах лесного массива.

Решались следующие задачи: установление особенностей структуры лесного массива; выявление динамики таксационных показателей основных и сопутствующих элементов леса смешанных лиственных древостоев; оценка вклада рассматриваемых древостоев в углеродный баланс.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время динамике смешанных древостоев не уделяется достаточного внимания, планирование лесохозяйственных мероприятий осуществляется по нормативам,

разработанным на основе данных роста чистых древостоев, что влечет за собой ошибки. Вопросам роста и строения смешанных древостоев посвящен ограниченный ряд исследований [7]. Не менее актуальной является проблема изучения секвестрационного потенциала древостоев.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали смешанные осиново-березовые и березово-осиновые древостои, сформировавшие крупный лесной массив.

Лесной массив как структурная единица леса изучался многими исследователями (В.А. Антанайтис, И.Н. Репшис [1]; Р.А. Зиганшин, А.В. Качаев [14]; Л.Н. Ващук, А.З. Швиденко [6] и др.), но до сих пор особенности строения и изменчивость элементов этой крупной биологической системы установлены далеко не в полном объеме. Оценивая сложность решения данной проблемы, И.С. Мелехов отмечал, что «...лесной массив нельзя принимать за элементарную таксономическую категорию леса, так как он неоднороден и представляет собой совокупность элементарных участков – насаждений (лесных фитоценозов), а последние – еще более мелких, уже структурных подразделений» [15, с. 95].

В настоящей работе под лесным массивом понимается биологическая лесная система, сформировавшаяся в определенных географических условиях, соответствующая отдельным элементам ландшафта и занимающая целостную территорию с естественными границами, которой присущи опосредованные орографическими, почвенными, погодно-климатическими и другими факторами структуры биоценозов [23].

В основу работы положены материалы глазомерно-измерительной таксации 548 таксационных выделов, выполненной в процессе инвентаризации лесов Уярского лесничества Красноярского края в 2016–2017 гг. филиалом Рослесинфорга «Востсиблеспроект». Древостои представляли главные лесорастительные формации. Совокупность собранных данных использовалась для характеристики структуры лесного массива, особенности динамики древостоев были рассмотрены на примере осиново-березовых насаждений.

Для построения таблиц динамики использованы методические положения, изложенные Н.В. Третьяковым и получившие развитие в трудах И.В. Семечкина [17]. Опирались также на методические выкладки Д.Г. Замолодчикова, А.И. Уткина, Г.Н. Коровина [12]; Д.Г. Замолодчикова, А.И. Уткина, О.В. Честных [13] в области разработки и совершенствования конверсионно-объемного метода определения запасов углерода в лесных насаждениях. В этих исследованиях приводятся регрессионные уравнения, связывающие фракционную структуру фитомассы древостоев с их запасом и возрастом, получены конверсионные коэффициенты, позволяющие устанавливать запас депонированного углерода для древостоев основных лесобразующих пород в зависимости от их возраста. Составленная нами таблица динамики не претендует на роль таксационного норматива – таблицы хода роста. Она отражает характер изменений, происходящих в 2 взаимосвязанных, взаимообусловленных элементах леса сложного древостоя.

Результаты исследования и их обсуждение

Аналізу подвергся лесной массив, сформированный смешанными лиственными древостоями, представленный 548 таксационными выделами.

264 выдела (48,2 %) приходится на древостои с преобладанием осины, 284 (51,8 %) – с преобладанием березы. В составе древостоев кроме осины и березы в незначительном количестве (не более 1 ед., очень редко 2 ед., а в основном с + или единично) принимали участие сосна, лиственница, пихта (*Abies sibirica* L.), ель (*Picea obovata* Lab.), ива (*Salix caprea* L.) и кедр (*Pinus sibirica* Du Tour). Все древостои относятся к формации травяных лесов лесостепей и группе типов леса «разнотравные».

Деление древостоев на возрастные группы приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение смешанных лиственных древостоев по группам возраста (%)
Distribution of the mixed deciduous stands by age group (%)

Группа возраста	Доля в древостоях			
	С преобладанием осины		С преобладанием березы	
	по количеству выделов	по площади	по количеству выделов	по площади
Молодняки	7,2	3,9	9,8	5,9
Средневозрастные и приспевающие	45,5	41,6	31,0	29,6
Спелые	35,6	42,2	52,2	59,8
Перестойные	11,2	12,3	7,0	4,7

Из табл. 1 следует, что доля молодняков в смешанных лиственных древостоях составляет менее 10 % как по количеству древостоев, так и по занимаемой ими площади. Причем характерной особенностью молодняков является незначительная площадь отдельных участков. Так, количество молодняков с преобладанием осины составляет 7,2 % от их общего числа в лесном массиве, а по площади доля этих древостоев всего 3,9 %. Аналогичная картина наблюдается в смешанных древостоях с преобладанием березы, где доля молодняков по количеству выделов составляет 9,8 %, а по площади – 5,9 %. Средневозрастные и приспевающие древостои составляют 30–46 %, спелые – 36–60 %. Перестойных древостоев немного: не более 12,3 % по площади. Однако совокупная доля спелых и перестойных древостоев равняется 50–60 %.

Полученные данные отражают ситуацию, когда в древостоях в истекшие десятилетия эксплуатация была ограничена (в силу различных причин, среди которых не последнюю роль играла невысокая востребованность древесины этих пород) и они в основном выступали в качестве формации, обеспечивающей экологическую стабильность региона.

Динамика состава древостоев с преобладанием осины характеризуется увеличением доли основной породы в древостое с возрастом (рис. 1). В числе сопутствующих пород в этих древостоях на 1-м месте береза и в незначительных объемах ива козья, а также пихта сибирская. В древостоях с преобладанием березы доля главной породы более стабильна – только в молодняках она соответствует 5 ед. среднего состава смешанных березовых древостоев. В древостоях остальных групп возраста в формуле среднего состава древостоев коэффициент для данного вида равен 6. Основные сопутствующие породы – осина и сосна, их доли в составе отражаются соответственно коэффициентами 3-2 и 2-1.

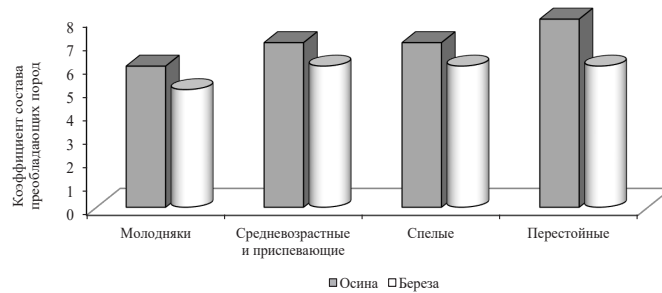


Рис. 1. Доля преобладающих пород в составе смешанных древостоев

Fig. 1. The proportion of predominant species in the composition of the mixed stands

Различия по производительности древостоев разных лиственных пород значительны, несмотря на то, что средние относительные полноты близки, при некотором отставании у древостоев с преобладанием березы (рис. 2). Древостои, слагающие лесной массив, в абсолютном преобладании модальные. В выборке таксационных выделов с превалярованием березы древостои с полнотой 1,0 отсутствуют, а в древостоях, где больше осины, составляют 4,1 %.

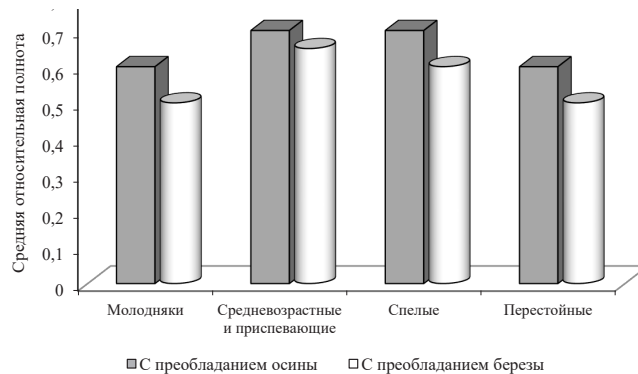


Рис. 2. Средняя относительная полнота смешанных лиственных древостоев

Fig. 2. Average relative completeness of the mixed deciduous stands

Соотношение общих средних запасов древостоев по группам возраста приведено на рис. 3.

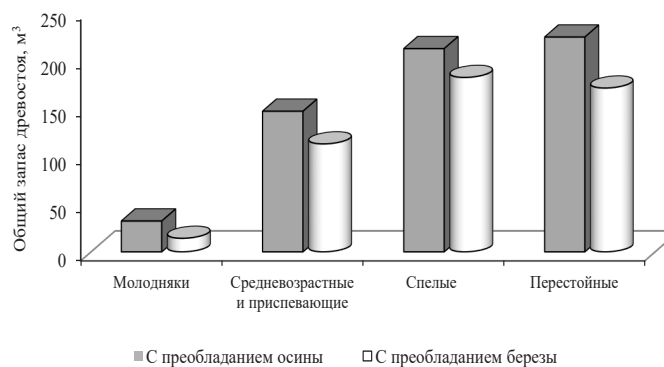


Рис. 3. Производительность смешанных лиственных древостоев по запасу

Fig. 3. Productivity of the mixed deciduous stands based on the growing stocks

Одним из факторов, отражающих производительность древостоя, наряду с запасом является средний диаметр. В работе Р.А. Зиганшина, А.В. Качаева, посвященной динамике средних диаметров лиственных древостоев лесного массива в Прибайкалье, отмечается, что «...в производственной таксации они [средние диаметры] определяются наиболее надежно» [14, с. 95], это,

в свою очередь, обеспечивает надежность конечных выводов. Различия средних диаметров в определенной степени отражают разницу в темпах формирования запасов смешанных древостоев, хотя следует отметить, что были сопоставлены средние диаметры только преобладающих пород (табл. 2).

Таблица 2

**Различия средних диаметров преобладающих пород
в смешанных лиственных древостоях**
**The differences in average diameters of predominant species
in the mixed deciduous stands**

Группа возраста	Средний диаметр (см) в древостоях с преобладанием		Разница средних диаметров	
	осины	березы	см	%
Молодняки	5,5	3,1	2,4	43,6
Средневозрастные и приспевающие	17,6	15,5	2,1	11,9
Спелые	22,1	21,0	1,1	5,0
Перестойные	31,2	26,0	5,2	1,7

Из табл. 2 следует, что древостои, где осина является главной породой, на всех возрастных этапах имеют преобладание в темпах формирования средних диаметров, что неизбежно находит отражение в формировании запасов.

Обработка данных в пределах классов возраста позволила получить средние значения основных таксационных показателей с достаточно высокой точностью: по рядам высот точность опыта для всех насаждений, исключая молодняки, лежит в пределах 0,7–3,1 %; у молодняков этот показатель равен 7,0 %; для диаметров – соответственно 1,8–4,0 и 7,6 %.

Изменчивость средних высот для древостоев, кроме молодняков, – 3,6–16,3 %, у молодняков – 19,8 %. Варьирование средних диаметров в пределах классов возраста – 10,1–17,2 %, у молодняков – 31,4 %.

Полученные средние значения стали основой для математического моделирования таблицы динамики таксационных показателей смешанных лиственных древостоев. Оказалось, что динамика основных таксационных показателей главного и сопутствующего элементов леса в осиново-березовых древостоях, т. е. средних высоты, диаметра, запаса древостоев, а также рассчитанных по ним при помощи общеприменяемых зависимостей суммы площадей поперечного сечения древостоев, числа стволов на 1 га и среднего видового числа с достаточной степенью адекватности отображается функцией Вейбулла вида:

$$y = a - b \exp(-cx^d).$$

В табл. 3 приведены коэффициенты уравнений и показатели их адекватности.

Таблица 3

**Коэффициенты уравнений и показатели их адекватности
для основных таксационных показателей смешанных лиственных древостоев
The coefficients of the equations and the indicators of their adequacy
for the major taxation parameters of the mixed deciduous stands**

Таксационный показатель	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	S	R ²
<i>Осина</i>						
Средняя высота, м	34,743334	37,222143	0,051216762	0,7333378	0,42	0,998
Средний диаметр, см	209,494220	208,000400	0,002652302	0,9243837	2,11	0,974
Сумма площадей сечения, м ² /га	36,655418	41,673533	0,096702529	0,4856498	0,27	0,998
Число стволов, шт./га	2378,168000	2310,281900	56,137109000	-1,4898536	4,03	0,998
Среднее видовое число	1,004738	0,560769	9,483937000	-1,4697599	0,002	0,999
Запас, м ³ /га	745,068100	756,272380	0,005196019	0,9471741	9,23	0,988
Среднее изменение запаса, м ³ /га	2,652011	1,540203	0,005264163	2,2809249	0,06	0,992
Текущее изменение запаса, м ³ /га	3,099993	0,993942	818,531140	-1,8983996	0,08	0,968
<i>Береза</i>						
Средняя высота, м	22,315422	19,239657	0,000581939	2,0061042	0,42	0,998
Средний диаметр, см	41,084243	41,882138	0,007342342	1,0831666	0,35	0,998
Сумма площадей сечения, м ² /га	28,190128	28,733116	0,018805487	0,6142289	0,41	0,972
Число стволов, шт./га	12487,536000	12380,871000	34,402417000	-2,0634857	34,8	0,998
Среднее видовое число	0,688394	0,298548	78,750858000	-1,6827721	0,002	0,998
Запас, м ³ /га	205,222890	202,252530	0,000251208	1,6745303	2,87	0,986
Среднее изменение запаса, м ³ /га	2,523697	2,161022	0,006307354	0,8421572	0,04	0,958
Текущее изменение запаса, м ³ /га	2,073306	1,627204	5,8199421e-005	2,1532383	0,08	0,945

На основе полученных математических моделей построена таблица, отражающая динамику смешанных осиново-березовых древостоев. Фрагмент этой таблицы приведен ниже (табл. 4).

Таблица 4

**Динамика основных таксационных показателей смешанных
осиново-березовых древостоев**
The dynamics of the basic taxation parameters of the mixed aspen-birch stands

Возраст, лет	Средние		Сумма площадей сечения на 1 га	Запас, м ³ /га	Изменение запаса, м ³ /га	
	высота, м	диаметр, см			среднее	текущее
<i>Осина</i>						
5	3,2	3,9	2,8	7	1,40	–
15	9,1	8,1	7,9	38	2,53	3,1
25	13,1	12,0	10,4	67	2,68	2,9
35	16,2	15,7	12,4	95	2,71	2,8
45	18,6	19,3	13,9	120	2,67	2,5
55	20,6	22,7	15,3	144	2,62	2,4
65	22,3	26,1	16,4	166	2,55	2,2
<i>Береза</i>						
5	3,3	1,0	0,7	2	0,40	–
15	5,4	4,6	2,6	8	0,53	0,6
25	9,0	8,1	3,2	14	0,56	0,6
35	13,0	11,4	3,5	20	0,57	0,6
45	16,6	14,4	4,3	30	0,67	1,0
55	19,1	17,2	5,0	40	0,73	1,0
65	20,8	19,8	5,7	49	0,75	1,1
<i>Древостой в целом</i>						
5	–		3,5	9	1,80	–
15			10,5	46	3,07	3,7
25			13,6	81	3,24	3,5
35			15,9	115	3,29	3,5
45			18,2	150	3,33	3,5
55			20,3	184	3,35	3,4
65			22,1	215	3,31	3,3

Динамика смешанных осиново-березовых древостоев имеет ряд особенностей. На стадии молодняка формируются древостои, в которых присутствие по количеству экземпляров обеих пород очень близко, иногда с преобладанием березы. Затем в ходе лесообразовательного процесса отпад березы происходит более интенсивно. Формирование стволов осины и березы также неодинаково. Стволы осины имеют большую полндревесность, средние значения видовых чисел для древостоев отдельных классов возраста у осины на 7–12 % превышают эти показатели у березы.

Средний диаметр древостоев по элементу «береза» с точки зрения темпов формирования отстает от среднего диаметра осины. Если средний прирост средних диаметров березы лежит в пределах 0,20–0,33 см, то для осины – в пределах 0,40–0,78 см. Причем характер изменения показателя различен: у осины максимум среднего прироста диаметров приходится на стадию молодняка, у сопутствующего элемента, березы, наступает только в IV классе возраста. Отстают, хотя и незначительно, древостои элемента леса «береза» и по средней высоте. Для осиново-березовых древостоев характерна простая форма, однако, образуя один ярус, высоты отдельных элементов леса имеют некоторые различия. Как следствие, осина в смешанном древостое продуцирует больший запас по сравнению с березой и является главной породой. На рис. 4 показана динамика среднего прироста объема одного ствола разных пород в древостое.

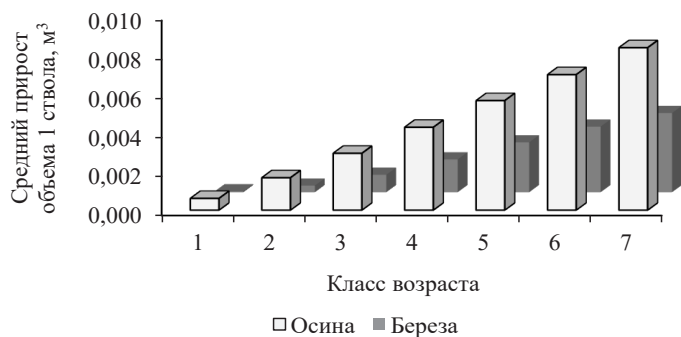


Рис. 4. Средний прирост объема одного ствола в осиново-березовых древостоях
Fig. 4. Average increase in stem volume in the aspen-birch stands

Рассматриваемые биологические системы обладают значительными возможностями депонирования углерода из атмосферы. Однако в настоящее время нет единой общепризнанной методики подсчета эффективности данного процесса, о чем говорилось на 26-й конференции ООН в Глазго (31.10–12.11.2021), а также сказано в работах ряда исследователей [12, 22].

Вопросы реальной оценки способности различных древостоев поглощать углерод, установления их секвестрационного потенциала в последние годы стали весьма актуальными. В настоящее время на «карбоновых полигонах» развернуты исследования, включающие мониторинг динамики депонирования углерода в лесных экосистемах, секвестрационного потенциала пород, быстроты их роста и развития. В то же время уже накоплен значительный объем данных для разных лесорастительных зон как в России, так и за рубежом, хотя эти данные собраны по различным методикам [4, 5, 9–11, 18, 20, 24–27]. Однако уже сейчас специалистами Рослесинфорга сформирован рейтинг древесных пород по способности к поглощению углерода. Первое место в нем занимает осина, второе – береза. Ориентировочно 1 га осинового древостоя поглощает до 3,6 т CO₂/год, а березового – до 3,3 т CO₂/год.

Таким образом, осиново-березовые насаждения островных лесостепей являются значительными накопителями углерода и важным фактором в борьбе с парниковым эффектом, депонируя углерод в различных пулах.

По данным Д.Г. Замолодчикова, А.И. Уткина, Г.Н. Коровина [12], Д.Г. Замолодчикова, В.И. Грабовского, О.В. Честных [8], средний запас углерода в наземной и подземной фитомассе древостоев Российской Федерации составляет 42,6 т С/га, по данным В.А. Усольцева, для лесов Уральского

федерального округа – 43 т С/га [19, 20], по данным Рослесинфорга – 42,9 т С/га. В табл. 5 приводятся полученные с использованием конверсионных коэффициентов величины, характеризующие динамику запасов депонированного углерода наземной и подземной фитомассы осиново-березовых лесов островных лесостепей Средней Сибири – результат настоящей работы.

Таблица 5

**Динамика запасов углерода в надземном и подземном пулах
смешанных осиново-березовых древостоев
The dynamics of carbon stocks in the above-ground and underground
pools of the mixed aspen-birch stands**

Возраст, лет	Запас углерода, т С/га		
	осина	береза	всего
5	3,1	1,1	4,2
15	13,3	3,1	16,4
25	21,4	5,3	26,7
35	27,8	7,2	35,0
45	29,9	8,0	37,9
55	36,3	10,7	47,0
65	41,8	13,3	55,1

Заключение

Зона островных лесостепей Средней Сибири характеризуется специфическими формами лесной растительности, и если хвойные сосновые и лиственничные древостои хозяйственно осваиваются человеком и в высокой степени расстроены, то лиственные древостои в основном выполняют стабилизирующую роль в экологической устойчивости территории.

В связи с обострением проблемы оценки секвестрационных потенциалов лесных участков перед лесным хозяйством страны, по-видимому, встанет вопрос разделения древостоев на наиболее хозяйственно ценные (хвойные, твердолиственные) и на обладающие наибольшим секвестрационным потенциалом. К последним можно отнести и рассматриваемые древостои.

В результате проведенных работ установлены особенности динамики отдельных элементов леса и возрастной структуры смешанных осиново-березовых древостоев, а также формирования состава древостоев и их производительности. Полученные данные позволяют судить о характере секвестрационных процессов в лесах Средней Сибири и могут быть использованы при разработке нормативов оценки запасов углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антанайтис В.А., Репшис И.Н. Опыт инвентаризации лесов Литвы математико-статистическим методом. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 102 с.
Antanaitis V.A., Repshis I.N. *Experience of Inventory of Forests in Lithuania by the Mathematical-Statistical Method*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 102 p. (In Russ.).

2. Антипова Е.М. Флора северных лесостепей Средней Сибири: конспект. Красноярск: РИО КГПУ, 2003. 464 с.

Antipova E.M. *Flora of the Northern Forest-Steppes of Central Siberia: Synopsis*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Pedagogical University Publ., 2003. 464 p. (In Russ.).

3. Антипова Е.М. Флора северных лесостепей Средней Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2008. 35 с.

Antipova E.M. *Flora of the Northern Forest-Steppes of Central Siberia: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs.* Tomsk, 2008. 35 p. (In Russ.).

4. Бобкова К.С., Галенко Э.П., Тужилкина В.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А. Роль бореальных лесов Европейского Севера России в регулировании углеродного баланса северного полушария // Управленческие аспекты развития северных территорий России: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Сыктывкар, 20–23 окт. 2015 г. Сыктывкар: КРАГСиУ, 2015. Ч. 3. С. 36–41.

Bobkova K.S., Galenko E.P., Tuzhilkina V.V., Osipov A.F., Kuznetsov M.A. The Role of Boreal Forests of the European North of Russia in Carbon Balance Regulation of the Northern Hemisphere. *Management Aspects of Development of the Northern Territories of Russia. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Syktyvkar, KRASSA Publ., 2015, part 3, pp. 36–41. (In Russ.).

5. Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Кружлов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12, № 4. С. 631–650.

Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and Swamps of Siberia in the Global Carbon Cycle. *Siberian Ecological Journal*, 2005, vol. 12, no. 4, pp. 631–650. (In Russ.).

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

Vashchuk L.N., Shvidenko A.Z. *Dynamics of Forest Spaces of the Irkutsk Region*. Irkutsk, Irkutsk Regional Printing House, 2006, no. 1. 392 p. (In Russ.).

7. Высоцкий К.К. Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Гослесбумиздат, 1962. 178 с.

Vysotsky K.K. *Regularity of Structure of Mixed Stands*. Moscow, Goslebumizdat, 1962. 178 p. (In Russ.).

8. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопр. лесн. науки. 2018. Т. 1, № 1. С. 12–14.

Zamolodchikov D.G., Grabovsky V.I., Chestnykh O.V. Dynamic Pattern of Carbon Balance in the Forests of Federal Districts of the Russian Federation. *Forest Science Issues*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 12–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24>

9. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Современное сокращение стока углерода в леса России // Докл. АН. 2017. Т. 476, № 6. С. 719–721.

Zamolodchikov D.G., Grabovsky V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V. Recent Decrease in Carbon Sink to Russian Forests. *Doklady Biological Sciences*, 2017, vol. 476, no. 6, pp. 719–721. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565217300259>

10. Замолодчиков Д.Г., Иванов А.В. Запасы и потоки углерода в лесах Уссурийского лесничества согласно оценке по системе РОБУЛ // Аграр. вестн. Приморья. 2016. № 1. С. 12–15.

Zamolodchikov D.G., Ivanov A.V. Carbon Pools and Fluxes in Forests of the Ussuri Forestry According to Evaluation by the ROBUL System. *Agrarian Bulletin of Primorye*, 2016, no. 1, pp. 12–15. (In Russ.).

11. Замолодчиков Д.Г., Иванов А.В., Мудрак В.П. Запасы и потоки углерода на землях лесного фонда Приморского края при оценке по системе РОБУЛ // Аграр. вестн. Приморья. 2018. № 2. С. 46–51.

Zamolodchikov D.G., Ivanov A.V., Mudrak V.P. Carbon Pools and Fluxes on Forest Fund Lands of Primorsky Krai by Assessment Using ROBUL System. *Agrarian Bulletin of Primorye*, 2018, no. 2, pp. 46–51. (In Russ.).

12. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. Determination of Carbon Reserves by Conversion-Volumetric Coefficients Related to Age of Stands. *Forestry*, 1998, no. 3, pp. 84–93. (In Russ.).

13. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // Лесн. таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1(32). С. 119–127.

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V. Conversion Rates of Planting Stocks into the Phytomass of the Main Forest-Forming Species of Russia. *Forest Taxation and Forest Management*, 2003, iss. 1(32), pp. 119–127. (In Russ.).

14. Зиганшин Р.А., Качаев А.В. Лесной массив: динамика средних диаметров лиственных древостоев ведущих типов леса // Сиб. лесн. журн. 2014. № 3. С. 91–106.

Ziganshin R.A., Kachaev A.V. Woodland: Dynamics of Deciduous Tree Stand Average Diameters of the Principal Forest Types. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 3, pp. 91–106. (In Russ.).

15. Мелехов И.С. Лес // Лесная энциклопедия. Т. 1. М.: Совет. энцикл., 1985. С. 503–508.

Melekhov I.S. Forest. *Soviet Encyclopedia: Forestry Encyclopedia*. Moscow, 1985, vol. 1, pp. 503–508. (In Russ.).

16. Ревердатто В.В. Растительность Сибирского края (опыт дробного районирования) // Изв. РГО. 1931. Т. XVI, вып. 1. С. 43–70.

Reverdatto V.V. Vegetation of the Siberian Territory (Experience of Fractional Zoning). *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva = Proceedings of the Russian Geographical Society*, 1931, vol. 16, iss. 1, pp. 43–70. (In Russ.).

17. Семечкин И.В. Опыт использования данных глазомерной таксации для изучения динамики насаждений // Организация лесного хозяйства и инвентаризация лесов: сб. ст. Вып. 1. Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1962. С. 119–131.

Semechkin I.V. The Experience of Using Visual Survey Data to Study the Dynamics of Spaces. *Proceedings Organization Forestry and Forest Inventory: Collection of Articles*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Publishing House, 1962, iss. 1, pp. 119–131. (In Russ.).

18. Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексева, Р.А. Бердси. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 1994. 224 с.

Carbon in the Ecosystems of Forests and Swamps of Russia. Eds. V.A. Alekseev, R.A. Berd-si. Krasnoyarsk, Publishing House of the Institute of Forest SB RAS, 1994. 224 p. (In Russ.).

19. Усольцев В.А. Депонирование углерода лесами Уральского региона России (по состоянию Государственного учета лесного фонда на 2007 год): моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 265 с.

Usoltsev V.A. *Carbon Sequestration by Forests of the Ural Region of Russia (on the Base of Forest State Inventory Data 2007): Monograph*. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University, 2018. 265 p. (In Russ.).

20. Усольцев В.А., Филиппов Ю.В., Крапивина О.А., Усольцева Ю.В., Терентьев В.В., Шишкин А.В., Белоусов Е.В., Азаренок М.В., Ненашев Н.С. Совмещение баз данных о

запасах углерода и его годичном депонировании в лесных экосистемах Северной Евразии // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2004. № 8. Ч. 1. С. 44–46.

Usoltsev V.A., Filippov Yu.V., Krapivina O.A., Usoltseva Yu.V., Terentyev V.V., Shishkin A.V., Belousov E.V., Azarenok M.V., Nenashev N.S. Combining Databases on Carbon Stocks and its Annual Deposition in Forest Ecosystems of Northern Eurasia. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2004, part 1, no. 8, pp. 44–46. (In Russ.).

21. Черепнин Л.М. Растительный покров южной части Красноярского края и задачи его изученности // Уч. зап. Краснояр. пед. ин-та. 1956. Т. 5. С. 3–43.

Cherepnin L.M. Vegetation Cover of the Southern Part of the Krasnoyarsk Krai and the Tasks of its Study. *Scientific Notes of the Krasnoyarsk Pedagogical Institute*, 1956, vol. 5, pp. 3–43. (In Russ.).

22. Швиденко А.З., Щепашченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Carbon Budget of Russian Forests. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.).

23. Шевелев С.Л. Некоторые закономерности строения лесных массивов Каа-Хемского округа горно-таежных лесов Республики Тыва // Хвойные бореал. зоны. 2008. Т. XXV, № 1-2. С. 84–87.

Shevelev S.L. Some Laws of a Large Forest Stands Structure Kaа-Hemskiy Mountain-Taiga Woods of Tyva Republic. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2008, vol. XXV, no. 1-2, pp. 84–87. (In Russ.).

24. Kiviste A., Korjus H. Forest Scenario Modelling for Optimal Adaptation to Possible Climate Change in Estonia. *Proc. Conf. "Forest Scenario Modelling at Landscape Level"*. Netherlands, Wageningen, 1997, pp. 1–10.

25. Matthews G. *The Carbon Content of Trees: Forestry Commission Technical Paper 4*. Edinburgh, Forestry Commission, 1993. 21 p.

26. Neumann M., Moreno A., Mues V., Härkönen S., Mura M., Bouriaud O., Lang M., Achten W.M.J., Thivolle-Cazat A., Bronisz K., Merganič J., Decuyper M., Alberdi I., As-trupm R., Mohren F., Hasenauer H. Comparison of Carbon Estimation Methods for European Forests. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 361, pp. 397–420. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.016>

27. Penner M., Power K., Muhairwe C., Tellier R., Wang Y. *Canada's Forest Biomass Resources: Deriving Estimates from Canada Forest Inventory. Information report BC-X-370*. Victoria, BC, Pacific Forestry Centre, 1997. 33 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Обзорная статья

УДК 630*165.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-23-32

Лесная селекция и генетическое разнообразие древесных пород

А.Л. Федорков, д-р биол. наук, вед. науч. сотр.; *ResearcherID*: [C-8811-2009](https://orcid.org/0000-0001-7800-7534),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7800-7534>

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия, 167982; fedorkov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 12.10.21 / Одобрена после рецензирования 14.01.22 / Принята к печати 19.01.22

Аннотация. В научной литературе представлены различные мнения о связи лесной селекции и генетической изменчивости древесных пород. Целью данной работы является обзор современной отечественной и зарубежной литературы о влиянии селекционных мероприятий на уровень генетического разнообразия лесных древесных пород. Сохранение достаточной генетической изменчивости необходимо для адаптации к изменениям внешней среды, а также долговременной селекции. Поскольку источником улучшенных семян для воспроизводства лесов являются лесосеменные плантации, детально рассмотрено влияние на уровень генетической изменчивости потомства таких факторов, как число клонов и фоновое опыление. Приведены данные о минимальном числе клонов на лесосеменных плантациях в различных странах, обсуждается значение изменчивости клонов по фертильности. Обращено внимание на важность фонового опыления на лесосеменных плантациях, которое, с одной стороны, снижает эффект селекции, а с другой, повышает уровень генетической изменчивости потомства. Уменьшение генетического разнообразия древесных пород может происходить при клоновом отборе, являющемся основой клонового лесоводства, однако анализ литературных источников свидетельствует, что при соблюдении научных рекомендаций сокращение генетического разнообразия минимально. Использование при соматическом эмбриогенезе ели европейской семян от контролируемых скрещиваний плюсовых деревьев, отобранных в результате генетической оценки (так называемое семейное лесоводство с вегетативным размножением), повышает уровень генетической изменчивости потомства. Показано, что система селекции множественных популяций (*multiple population breeding system*) позволяет объединить интенсивную долговременную селекцию и сохранение генофонда древесных пород. Сделан вывод, что реализация оптимально спланированных селекционных программ древесных пород не приводит к значительному сужению генетического разнообразия. Напротив, лесная селекция способствует сохранению лучшего генофонда, передавая его при воспроизводстве лесов через улучшенные семена и клоны в искусственные насаждения. Кроме того, объекты лесного семеноводства, такие как архивы клонов плюсовых деревьев, лесосеменных плантаций, испытательные культуры, содержат *ex situ* ценный генетический материал.

Ключевые слова: генетическая изменчивость, генетическое разнообразие, клоновое лесоводство, лесная селекция, соматический эмбриогенез, фоновое опыление, число клонов

Для цитирования: Федорков А.Л. Лесная селекция и генетическое разнообразие древесных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 23–32. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-23-32>

Review article

Forest Tree Breeding and Genetic Diversity of Wood Species

Aleksey L. Fedorkov, Doctor of Biology, Leading Research Scientist; ResearcherID: [C-8811-2009](https://orcid.org/0000-0001-7800-7534),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7800-7534>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; fedorkov@ib.komisc.ru

Received on October 12, 2021 / Approved after reviewing on January 14, 2022 / Accepted on January 19, 2022

Abstract. In scientific literature there are different views on the connection between forest tree breeding and genetic variability of wood species. This article has aimed to review the current Russian and foreign literary sources on the impact of breeding measures on the level of genetic diversity of forest wood species. Maintaining adequate genetic variability is necessary for adaptation to the environmental changes, as well as for long-term breeding. As soon as seed plantations are the source of improved seeds for forest regeneration, the influence of such factors as the number of clones and background pollination on the level of genetic variability of the progeny has been considered in detail. The data on the minimal clone number in seed plantations in different countries has been presented and the variability of the clones based on their fertility has been discussed. The importance of background pollination in seed plantations has been highlighted as soon as, on the one hand, it reduces the effect of breeding, but on the other hand, it increases the level of genetic variability of the progeny. A decline in genetic diversity of wood species can be caused by clone selection (which is the basis for clonal forestry). However the analysis of literary sources has shown that the reduction in genetic diversity is minimal if scientific recommendations are fulfilled. The use of the seeds from controlled cross-breeding of plus trees selected as a result of genetic evaluation (the so-called family forestry with vegetative propagation) in the somatic embryogenesis of the common spruce increases the level of genetic variability of the progeny. It has been shown that the multiple population breeding system allows to combine intensive long-term breeding and genetic conservation of wood species. The conclusion has been drawn that the implementation of optimally planned wood species breeding programs does not lead to significant narrowing of genetic diversity. On the contrary, forest tree breeding contributes to the preservation of a better gene pool, transmitting it in the process of forest regeneration through improved seeds and clones into homogeneous stands. Moreover, the objects of forest seed growing such as the archives of plus tree clones and forest seed plantations, as well as test cultures contain valuable genetic material *ex situ*.

Keywords: genetic variability, genetic diversity, clonal forestry, forest tree breeding, somatic embryogenesis, background pollination, clone number

For citation: Fedorkov A.L. Forest Tree Breeding and Genetic Diversity of Wood Species. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 23–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-23-32>

Генетическая структура природных популяций характеризуется частотами генов, находящимися под влиянием факторов эволюции: случайного дрейфа генов, мутаций, миграций и естественного отбора [1]. В научной литературе сложилось мнение, что лесная селекция, использующая искусственный отбор плюсовых деревьев, по определению приводит к сужению генетического разнообразия древесных пород [6, 8, 10, 24]. Это связывают с тем, что в результате отбора образуется селекционная популяция с ограниченной численностью, что может сопровождаться повышением уровня инбридинга и, как следствие, инбредной депрессии. Другое



возможное последствие низкого уровня генетической изменчивости – ухудшение способности популяции адаптироваться к изменениям условий внешней среды. Генетическое разнообразие оценивают по обилию аллелей, идентифицируемых с помощью генетических маркеров; изменчивости количественных признаков, оцениваемой методами математической статистики, и эффективной численности популяции, учитывающей родство между особями. Цель работы – дать обзор современной отечественной и зарубежной литературы по обозначенной проблеме.

Действительно, значительное снижение уровня генетической изменчивости по сравнению с естественными насаждениями установлено методами биохимической генетики в потомстве 2 лесосеменных плантаций (ЛСП), состоящих из 20 и 33 клонов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в Латвии [11]. В ходе другого исследования, также выполненного в Латвии с использованием методов молекулярной генетики, проведена сравнительная оценка генетического разнообразия на 2 участках экспериментальных культур ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), заложенных потомством 2 ЛСП (50 и 20 клонов, 162 подеревных образца), и в естественных насаждениях в национальном парке, генетическом резервате и заповеднике (свыше 300 подеревных образцов). Результаты показали, что генетическое разнообразие в потомстве ЛСП сопоставимо с естественными насаждениями, хотя некоторые редкие аллели могут быть потеряны [39]. Сходные данные получены по ели в Норвегии при сравнении генетического разнообразия у потомства 2 ЛСП (25 и 60 клонов) и 2 естественных насаждений [44]. Генетический анализ с использованием ДНК-маркеров, проведенный в 6 природных популяциях и на ЛСП сосны в Карелии, не выявил статистически значимых различий между ними по уровню генетического разнообразия [4]. Сравнение показателей генетического разнообразия на основе анализа изоферментов по 21 ЛСП сосны, 19 ЛСП ели и природных популяций этих пород в Белоруссии не показало существенных различий [3].

Масштабное исследование, выполненное в Канаде с помощью биохимических маркеров, с использованием материала дугласии (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), собранного в 49 естественных насаждениях, на 12 ЛСП 1-го порядка и 4 ЛСП 2-го порядка, не показало значительного снижения генетического разнообразия в результате фенотипического отбора и селекции [14]. Используя методы количественной генетики, А.С. Бондаренко с соавторами [2] оценили генетическую изменчивость основных ростовых признаков у полусибсов плюсовых деревьев сосны и ели в сравнении с контролем и пришли к выводу, что фенотипический отбор не приводит к сужению генетического разнообразия. Оценка изменения основных генетических параметров при моделировании последовательных изреживаний в испытательных культурах полусибсов плюсовых деревьев сосны выявила, что даже при значительной интенсивности изреживаний не происходит снижения показателей, характеризующих генетическое разнообразие [17].

Основная цель сохранения генофонда – поддержать достаточную для адаптации к изменениям внешней среды генетическую изменчивость лесобразующих древесных пород. Изменчивость нужна также для успешной долговременной селекции [16]. В этом случае важно сохранение на прежнем уровне высокой аддитивной дисперсии (вариансы), т. е. генетической дисперсии, которая определяет селекционную ценность (или общую комбинационную способность) дерева [10]. Показано, что потеря аддитивной дисперсии является значительной при эффективной численности популяции 20 и ниже, при этом редкие аллели не вносят вклад в приспособленность индивидов [16].

В большинстве стран, ведущих интенсивное лесное хозяйство, для создания лесных культур используется улучшенный репродуктивный материал. Для древесных пород, размножаемых при лесовосстановлении семенным путем, например для сосны и ели, источником улучшенных семян являются ЛСП. Так, в Швеции при воспроизводстве лесов доля семян, заготовленных на ЛСП, составляет для сосны около 90 %, для ели – около 79 %; в Финляндии эти соотношения немного ниже, причем просматривается общий тренд к увеличению использования улучшенных семян [40]. В Норвегии, где главной породой является ель, доля улучшенных семян в производстве посадочного материала равняется в юго-восточной части страны 96 %, на остальной территории – 75 % [47]. Общеизвестно, что на ЛСП представлены потомства, обычно клоновые, определенного числа плюсовых деревьев, чем оно больше, тем шире генетическое разнообразие и, напротив, при его уменьшении генетическое разнообразие сужается. В Российской Федерации в соответствии с «Правилами создания и выделения объектов лесного семеноводства...» (2015) число клонов на ЛСП должно быть не менее 50, независимо от уровня генетической оценки исходного материала. Действовавшие ранее «Основные положения по лесному семеноводству в СССР» (1976) предусматривали меньшее число клонов на ЛСП – 20–25. Обычно предполагается равное представительство рамет в каждом клоне, это далеко не всегда соблюдается. Кроме того, значительная межклоновая изменчивость по фертильности (пыльцевой и семенной продуктивности) приводит к неравномерному вкладу клонов в общий пул мужских и женских гамет на ЛСП. Есть даже мнение, что списочное число клонов не имеет значения для характеристики генетического разнообразия, если число рамет в клонах и их семенная продуктивность различны [23]. Разработана статистическая модель для определения оптимального числа клонов на ЛСП для ряда хвойных пород, учитывающая фертильность, влияние фонового опыления, генетическое разнообразие и некоторые другие условия [29]. Основываясь на результатах этого исследования, шведской селекционной программой было принято высаживать на ЛСП 3-го цикла 20 клонов испытанных по потомству плюсовых деревьев [36]. В Финляндии число клонов на ЛСП должно составлять не менее 20 [42]. В Германии, согласно новой селекционной стратегии, для основных лесобразующих пород при создании ЛСП рекомендуется использовать 60–80 клонов с равным представительством рамет, что дает возможность в будущем проводить изреживания по результатам генетической оценки [27].

Лесобразующие хвойные продуцируют колоссальные объемы пыльцы, которая с потоками воздуха способна перемещаться на значительные расстояния [7]. Фоновое опыление, т. е. опыление семян семенных деревьев на ЛСП пыльцой деревьев из-за ее пределов, обычно рассматривается как негативное явление, поскольку приводит к снижению генетического улучшения (эффекта селекции), хотя привнесение новых генов повышает генетическое разнообразие потомства. Учитывая важность проблемы, в 1991 г. в Швеции была созвана международная конференция для рассмотрения этого вопроса. Участники конференции констатировали, что фоновое опыление может достигать 25–50 % от общего числа семян [32]. Дальнейшие исследования также показали, что оценки степени фонового опыления сильно варьируют – от 5–7 [18] до 52 [48] и даже до 76 [33] % в зависимости от возраста деревьев на ЛСП, погодных ус-

ловий в год опыления и других факторов. Для исключения фонового опыления на ЛСП в Швеции был поставлен эксперимент по изоляции семян сосны от фоновой пыльцы путем полного укрытия рядов семенных деревьев на ЛСП полиэтиленовой пленкой, натянутой на металлический каркас. Эксперимент выявил, что полиэтиленовый тент полностью предотвращает фоновое опыление, которое на контрольных блоках составило 23 %. В то же время изоляция от фонового опыления приводит к повышению частоты самоопыления, хотя ее можно снизить за счет искусственного доопыления пыльцой клонов плюсовых деревьев [49].

Клоновое лесоводство, основанное на отборе и размножении лучших клонов, уходит корнями в далекую историю. Так, вегетативное размножение криптомерии японской (*Cryptomeria japonica* (Lf.) D. Don) с лесоводственными целями проводилось в Японии уже в XV в. Промышленное создание клоновых плантаций тополей (*Populus spp.*), стартовало в странах Южной Европы в начале XX в., ели европейской в Германии – в конце 1960-х [43]. В настоящее время наиболее распространенной древесной породой, используемой в клоновом лесоводстве, является эвкалипт и его гибриды (*Eucalyptus* L.) [50]. Активно реализуются селекционные программы по клоновому лесоводству сосны лучистой (*Pinus radiata* D. Don) в Новой Зеландии и Австралии, сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) в США и некоторых других древесных пород.

Основное преимущество клонового лесоводства – существенное генетическое улучшение по росту, достигающее 10–25 % у хвойных и 25–50 % у лиственных пород (эвкалипт и его гибриды) [50]. Последние работы показывают, что, проводя скрещивания с последующим отбором, и у ели европейской можно получать генетическое улучшение по объему ствола, достигающее 50 % [12]. Кроме того, временной разрыв между отбором и реализацией его результатов значительно меньше по сравнению с закладкой ЛСП и получением семян. Также при вегетативном размножении ограниченного числа клонов лесная продукция (выход сортиментов) более однородна. Максимальное генетическое улучшение дают одноклоновые плантации, но возникает риск гибели растений от болезней и вредителей, потери генетического разнообразия [21, 38].

Как уже сказано, клоновое лесоводство ели европейской практикуется в Германии, Швеции, Финляндии и других странах Европы. В силу биологических особенностей ели хорошо укореняются только черенки, взятые с молодых деревьев. В целом от одного донорского растения можно получить 50–100 укорененных черенков. Поэтому система коммерческого размножения в питомнике требует постоянного введения новых молодых донорских растений для поддержания генетического разнообразия клоновых насаждений на приемлемом уровне. Тем не менее снижение уровня генетического варьирования по некоторым ДНК-маркерам было отмечено на клоновой плантации ели по сравнению с естественными насаждениями в Финляндии [5].

С развитием исследований по соматическому эмбриогенезу, который позволяет получать почти неограниченное число растений (генетических копий) от эмбриогенных клеточных линий, из собственно клонового лесоводства ели выделилось так называемое семейное лесоводство с вегетативным размножением [34]. В этом случае семена для соматического эмбриогенеза получают от

контролируемых скрещиваний плюсовых деревьев, т. е. от сибсовых семей. Данный подход реализуется в настоящее время для ели ситхинской (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) в Ирландии [46] и ели европейской в Швеции [35] и Финляндии [45]. В шведской селекционной программе принято, чтобы клоновые насаждения охватывали примерно 90 % генетического разнообразия, существующего в природных популяциях ели, что достигается при использовании 15–20 клонов, и с учетом непредвиденных обстоятельств предлагается использовать 25 клонов [38].

В ряде работ по эмбриогенезу хвойных у зародышей и проростков выявлены различного рода хромосомные нарушения – соматоклональная изменчивость, например у лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), но в процессе культивирования они элиминируются, и полученные зародыши идентичны исходным эксплантам [9]. В обзорной статье U. Egersdotter [13] показано, что есть риск таких нарушений, если культура тканей поддерживается длительное время в стадии пролиферации, но ни одно исследование не обнаружило отклонений в фенотипе и росте растений. Для снижения риска потери генетического разнообразия в Швеции площадь участка клоновой плантации (участка лесных культур, по отечественной терминологии) не должна превышать 20 га без ограничений по числу клонов; в Германии, Финляндии и Франции допускается использование смеси клонов, прошедших полевые испытания [26, 37].

Американский лесной генетик G. Namkoong [30] разработал систему селекции множественных популяций (multiple population breeding system – MPBS), которая позволяет объединить интенсивную долговременную селекцию и сохранение генофонда древесных пород. Согласно этой концепции, селекционная популяция состоит из более мелких субпопуляций. Напомним, селекционная популяция – это коллекция деревьев, которая будет передавать генетическое улучшение следующим поколениям [16]. Другими словами, это совокупность плюсовых деревьев, потомство которых (клоновое или семенное) используется для создания ЛСП, обеспечивающих семенами определенную территорию (регион или страну). Иногда ее называют метапопуляцией [25, 41].

Центры субпопуляций распределяются по климатическому градиенту, например, в Швеции и Финляндии расстояния между ними – 1–2° географической широты [20]. Каждая субпопуляция должна состоять как минимум из 50 деревьев, отобранных в пространственно удаленных насаждениях, что исключает родство между ними и снижает вероятность инбридинга на ЛСП. По мнению ряда исследователей, генетическое улучшение по скорости роста, получаемое от ЛСП 1-го порядка, частично объясняется скрещиваниями на ЛСП неродственных деревьев, что дает в результате эффект сродни гетерозису [27, 28].

В шведской селекционной программе по сосне обыкновенной выделено 24 субпопуляции (по 50–70 деревьев) и, таким образом, в целом селекционная популяция (метапопуляция) составляет примерно 1500 деревьев [41]. В финской селекционной программе по этой породе выделено 6 субпопуляций (60–160 деревьев) – селекционная популяция составляет примерно 1000 деревьев [19]. Подобная система используется в Литве [31], Норвегии [22] и других странах. Сообщается, что древесные породы с большими ареалами, включенные в интенсивные селекционные программы с использованием MPBS, не требуют других мер по сохранению генофонда [15].

Заключение

Таким образом, многочисленные исследования, проведенные в различных странах, показали, что реализация корректно спланированных селекционных программ древесных пород не приводит к значительному сужению генетического разнообразия. Напротив, лесная селекция множественных популяций способствует сохранению лучшего генофонда, охватывая генетическую изменчивость на участке, где она проводится, передавая ее при воспроизводстве лесов через улучшенные семена и клоны в искусственные насаждения. Кроме того, объекты лесного семеноводства: архивы клонов плюсовых деревьев, лесосеменные плантации и постоянные лесосеменные участки, испытательные культуры – содержат *ex situ* ценный генетический материал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алтухов Ю.П. Генетические процессы в популяциях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Академкнига, 2003. 431 с.
Altukhov Yu.P. *Genetic Processes in Populations*. Moscow, Akademkniga Publ., 2003. 431 p. (In Russ.).
2. Бондаренко А.С., Жигунов А.В., Левкоев Э.А. Влияние селекционных мероприятий на фенотипическое и генетическое разнообразие семенного потомства плюсовых деревьев ели европейской и сосны обыкновенной // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 216. С. 6–17.
Bondarenko A.S., Zhigunov A.V., Levkoev E.A. Impacts of Selection Activities on Phenotypic and Genetic Diversity of Norway Spruce and Scotch Pine Plus Tree Seed Progenies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii = News of the Saint Petersburg Forest Technical Academy*, 2016, iss. 216, pp. 6–17. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.21266/2079-4304.2016.216.6-17>
3. Иваницкая С.И. Оценка эффективности плантационного семеноводства по данным молекулярно-генетического анализа // Сохранение лесных генетических ресурсов Сибири: материалы 3-го Междунар. совещ., Красноярск, 23–29 авг. 2011 г. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2011. С. 56–57.
Ivanitskaya S.I. Assessment of Efficiency Seed Production of Plantations Based on Molecular and Genetic Analysis. *Conservation of Forest Genetic Resources in Siberia: Proceedings of the International Symposium, August 23–29, 2011*. Krasnoyarsk, V.V. Sukachev Institute of Forest Publ., 2011, pp. 56–57. (In Russ.).
4. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Использование микросателлитных локусов в изучении плюсового генофонда сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 6. С. 124–134.
Il'inov A.A., Raevskij B.V. Analysis of the *Pinus sylvestris* L. Plus Tree Gene Pool in Karelia Using Microsatellite Loci. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*, 2018, no. 6, pp. 124–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb840>
5. Левкоев Э.А. Изучение генетического разнообразия в популяциях ели европейской на Восточно-Европейской равнине: автореф. дис. ... канд. с-х. наук. СПб., 2018. 23 с.
Levkoev E.A. *Study of Genetic Diversity in Spruce Populations on East-European Plane: Kand. Agric. Sci. Diss. Abs.* Saint-Petersburg, 2018. 23 p. (In Russ.).
6. Милютин Л.И., Новикова Т.Н. Дискуссионные проблемы лесной генетики и селекции // Лесоведение. 2019. № 6. С. 585–589.

Milyutin L.I., Novikova T.N. The Discussion Problems of Forest Genetics and Tree Breeding. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 585–589. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819060068>

7. *Сурсо М.В.* Лесообразующие хвойные Европейского Севера России: репродуктивная биология, внутривидовая дифференциация, генетический полиморфизм. Екатеринбург: ИЭПС УрО РАН, 2007. 253 с.

Surso M.V. *Forest-Forming Coniferous Plants of the European North of Russia: Reproductive Biology, Intraspecific Differentiation, Genetic Polymorphism*. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007. 253 p. (In Russ.).

8. *Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А.* Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохоз. информ. 2021. № 1. С. 100–143.

Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tret'jakova R.A. Forest Tree Breeding in Russia: Achievements, Challenges, Priorities (Overview). *Lesohozjajstvennaja informacija* = Forestry Information, 2021, no. 1, pp. 100–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.09>

9. *Третьякова И.Н., Иванецкая А.С., Пак М.Э.* Продуктивность эмбрионных клеточных линий и их соматическая изменчивость у лиственницы сибирской *in vitro* // Лесоведение. 2015. № 1. С. 27–35.

Tretiakova I.N., Ivanitskaya A.S., Pak M.E. *In vitro* Productivity and Somaclonal Variability of Embryogenic Cell Lines of Siberian Larch. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 1, pp. 27–35. (In Russ.).

10. *Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В.* Генетика лесных древесных пород. М.: МГУЛ, 2010. 385 с.

Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Forest Genetics*. Moscow, MGUL Publ., 2010. 385 p. (In Russ.).

11. *Шигапов З.Х.* Сравнительный генетический анализ лесосеменных плантаций и природных популяций сосны обыкновенной // Лесоведение. 1995. № 3. С. 19–24.

Shigapov Z.Kh. Comparative Genetic Analysis of Seed Orchards and Natural Scots Pine Populations. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1995, no. 3, pp. 19–24. (In Russ.).

12. Chen Z.-Q., Hai H.N., Helmersson A., Liziniewicz M., Hallingbäck H.R., Fries A., Berlin M., Wu H. Advantage of Clonal Deployment in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst). *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, no. 1, 15 p. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-0920-1>

13. Egertsdotter U. Plant Physiological and Genetical Aspects of the Somatic Embryogenesis Process in Conifers. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 360–369. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1441433>

14. El-Kassaby Y.A., Ritland K. Impact of Selection and Breeding on the Genetic Diversity in Douglas-Fir. *Biodiversity Conservation*, 1996, no. 5, pp. 795–813. <https://doi.org/10.1007/BF00051787>

15. Eriksson G. *Pinus sylvestris*. *Recent Genetic Research*. Uppsala, SLU Publ., 2008. 111 p.

16. Eriksson G., Ekberg I., Clapham D. *Genetics Applied to Forestry. An Introduction*. 3rd ed. Uppsala, SLU Publ., 2013. 208 p.

17. Fedorkov A., Lindgren D., Davis A. Genetic Gain and Gene Diversity Following Thinning in a Half-sib Plantation. *Silvae Genetica*, 2005, vol. 54, no. 4–5, pp. 185–189. <https://doi.org/10.1515/sg-2005-0027>

18. Funda T., Wennström U., Almqvist C., Torimaru T., Andersson Gull B., Wang X.-R. Low Rates of Pollen Contamination in a Scots Pine Seed Orchard in Sweden: the Exception or the Norm? *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, vol. 30, no. 7, pp. 573–586. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2015.1036306>

19. Haapanen M., Mikola J. *Metsänjalostus 2050 – pitkän aikavälin metsänjalostusohjelma*. Helsinki, Metla, 2008. 50 p.

20. Haapanen M., Jansson G., Nielsen U.B., Steffenrem A., Stener L.-G. *The Status of Tree Breeding and its Potential for Improving Biomass Production – a Review of Breeding Activities and Genetic Gain in Scandinavia and Finland*. Uppsala, SkogForsk, 2015. 55 p.

21. Ingvarsson P., Dahlberg H. The Effects of Clonal Forestry on Genetic Diversity in Wild and Domesticated Stands of Forest Trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1469665>

22. Jansson G., Danusevičius D., Grotehusman H., Kowalczyk J., Krajmerova D., Skråppa T., Wolf H. Norway spruce (*Picea abies* (L.) H.Karst.). Forest Tree Breeding in Europe. *Managing Forest Ecosystems*, 2013, vol. 25, pp. 123–176. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9>

23. Kang K., Harju A., Lindgren D., Nikkanen T., Almqvist C., Suh G.U. Variation in Effective Number of Clones in Seed Orchards. *New Forests*, 2001, vol. 21, no. 1, pp. 7–33. <https://doi.org/10.1023/A:1010785222169>

24. Konnert M., Fady B., Gömöry D., A'Hara S., Wolter F., Ducci F., Koskela J., Bozzano M., Maaten T., Kowalczyk J. Use and Transfer of Forest Reproductive Material in Europe in the Context of Climate Change. European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), 2015, Rome, EUFORGEN Publ. 75 p.

25. Krakau U.-K., Liesebach M., Aronen T., Lelu-Walter M.-A., Schneck V. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). Forest Tree Breeding in Europe. *Managing Forest Ecosystems*, 2013, vol. 25, pp. 267–323. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9>

26. Lelu-Walter M.-A., Thompson D., Harvengt L., Sanchez L., Toribio M., Pâques L. Somatic Embryogenesis in Forestry with a Focus on Europe: State-of-the-Art, Benefits, Challenges and Future Direction. *Tree Genetics and Genomes*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 883–899. <https://doi.org/10.1007/s11295-013-0620-1>

27. Liesebach H., Liepe K., Bäucker C. Towards New Seed Orchard Designs in Germany – A Review. *Silvae Genetica*, 2021, vol. 70, pp. 84–98. <https://doi.org/10.2478/sg-2021-0007>

28. Lindgren D. The Role of Tree Breeding in Reforestation. *Reforesta*, 2016, no. 1, pp. 221–237. <https://doi.org/10.21750/REFOR.1.11.11>

29. Lindgren D., Prescher F. Clone Number for Seed Orchards with Tested Clones. *Silvae Genetica*, 2005, vol. 54, no. 2, pp. 80–92. <https://doi.org/10.1515/sg-2005-0013>

30. Namkoong G. A Control Concept of Gene Conservation. *Silvae Genetica*, 1984, vol. 33, no. 4–5, pp. 160–163.

31. Pliūra A., Eriksson G. Sustainable Gene Conservation of *Pinus sylvestris* in Lithuania. *Baltic Forestry*, 1997, no. 1, pp. 2–9.

32. *Pollen Contamination in Seed Orchards. Proceedings of the Meeting of the Nordic Group for Tree Breeding*. Umeå, SLU Publ., 1991. 119 p.

33. Pulkkinen P., Varis S., Pakkanen A., Koivuranta L., Vakkari P., Parantainen A. Southern Pollen Sired More Seeds than Northern Pollen in Southern Seed Orchards Established with Northern Clones of *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 8–14. <https://doi.org/10.1080/02827580802592467>

34. Rosvall O. Using Norway Spruce Clones in Swedish Forestry: General Overview and Concepts. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 336–341. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1614659>

35. Rosvall O. Using Norway Spruce Clones in Swedish Forestry: Swedish Forest Conditions, Tree Breeding Program and Experiences with Clones in Field Trials. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 342–351. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1562566>

36. Rosvall O., Almqvist C., Lindgren D. *Experience from the Seed Orchard Programme (Review of the Swedish Tree Breeding Programme)*. Uppsala, SkogForsk, 2011, pp. 51–54.

37. Rosvall O., Bradshaw R., Egertsdotter U., Ingvarsson P.K., Wu H. Using Norway Spruce Clones in Swedish Forestry: Introduction. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 333–335. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1562565>

38. Rosvall O., Bradshaw R., Egertsdotter U., Ingvarsson P.K., Mullin T., Wu H. Using Norway Spruce Clones in Swedish Forestry: Implications of Clones for Management. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 390–404. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1590631>
39. Rungis D., Luguza S., Baders E., Škipars V., Jansons A. Comparison of Genetic Diversity in Naturally Regenerated Norway Spruce Stands and Seed Orchard Progeny Trials. *Forests*, 2019, no. 10. 11 p. <https://doi.org/10.3390/f10100926>
40. Ruotsalainen S. Increased Forest Production through Forest Tree Breeding. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 333–344. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2014.926100>
41. Ruotsalainen S., Persson T. Scots Pine – *Pinus sylvestris* L. (Best Practice for Tree Breeding in Europe). Uppsala, SkogForsk Publ., 2013, pp. 49–64.
42. Rusanen M., Napola J., Nikkanen T., Haapanen M., Herrala T., Vakkari P. *Forest Genetic Resource Management in Finland*. Helsinki: METLA Publ., 2004. 20 p.
43. Sonesson J., Bradshaw R., Lindgren D. Ecological Evaluation of Clonal Forestry with Cutting-Propagated Norway Spruce. Uppsala: SkogForsk, 2001. 59 p.
44. Sønstebø J.H., Tollefsrud M.M., Myking T., Steffenrem A., Nilsen A.E., Edvardsen Ø.M., Johnskås O.R., El-Kassaby Y.A. Genetic Diversity of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Seed Orchard Crops: Effects of Number of Parents, Seed Year, and Pollen Contamination. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 411, pp. 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.009>
45. Tikkinen M., Varis S., Peltola H., Aronen T. Norway Spruce Emblings as Cutting Donors for Tree Breeding and Production. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 207–214. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1349925>
46. Thompson D. Development of Improved Sitka Spruce for Ireland. *Irish Forestry*, 2013, vol. 70, no. 1–2, pp. 104–118.
47. Tollefsrud M.M., Friis Proschowsky G., Gömöry D., Bordács S., Ivanković M., Frýdl J., Alizoti P. Breeding Effects on Basic Material Including Conservation Strategy. Genetic Aspects in Production and Use of Forest Reproductive Material: Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN), European Forest Institute Publ, 2021, pp. 77–84.
48. Torimaru T., Wang X.-R., Fries A., Andersson B., Lindgren D. Evaluation of Pollen Contamination in an Advanced Scots Pine Seed Orchard. *Silvae Genetica*, 2009, vol. 58, no. 5–6, pp. 262–269. <https://doi.org/10.1515/sg-2009-0033>
49. Torimaru T., Wennstrom U., Andersson B., Almqvist C., Wang X.-R. Reduction of Pollen Contamination in Scots Pine Seed Orchard Crop by Tent Isolation. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, no. 8, pp. 715–723. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.838298>
50. Wu H. Benefits and Risks of Using Clones in Forestry – a Review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 34, no. 5, pp. 352–359. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1487579>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*231:630*17:582.475.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-33-51

Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок

Д.А. Семенякин¹, канд. биол. наук, мл. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2102-0516>

И.В. Тихонова^{2✉}, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [V-3735-2017](https://orcid.org/0000-0001-6929-9491),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6929-9491>


¹Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; denis8880@inbox.ru

²Западно-Сибирское отделение Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», ул. Жуковского, д. 100/1, г. Новосибирск, Россия, 630082; selection@ksc.krasn.ru✉

Поступила в редакцию 14.10.21 / Одобрена после рецензирования 19.01.22 / Принята к печати 23.01.22

Аннотация. Проведены исследования количественных и качественных характеристик возобновления после 1-го приема экспериментальной выборочной рубки интенсивностью 20–50 % в сосняках северной части Красноярской лесостепи. Часть насаждений за 5–10 лет до рубки пройдена низовым пожаром. Цель работы – обобщенный анализ состояния возобновления с учетом типа леса, густоты древостоя и воздействия огня до рубки, нарушенности почвенного и состояния живого напочвенного покровов, микроклиматических условий на вырубках. Использованы метод главных компонент, а также корреляционный и дисперсионный анализ по отдельным признакам. Показаны преимущества многомерного анализа данных методом главных компонент для получения более полной информации по вкладу и совместному влиянию разных экологических факторов на возобновление сосны на вырубках. Доля объясняемой дисперсии учтенных показателей составляет 87 %. Наиболее значимыми для возобновления сосны были тип леса (вырубки) и воздействие огня, на 2-м месте по значению – густота древостоя до рубки и интенсивность рубки. Из опосредованных ими факторов важными оказались освещенность и влажность почвы. Исходя из характеристик 4 главных компонент, установлены 2 варианта сочетания основных факторов для лучшего возобновления насаждений: 1) большая первоначальная густота спелых древостоев, а также умеренное развитие мхов и злаков в живом напочвенном покрове позволяют выбрать любую интенсивность рубки (в исследуемых пределах), желательно в сочетании с предварительным выжиганием части подстилки (либо частичной минерализацией почвы) за 5 лет до рубки умеренно-высокой и высокой интенсивности; 2) при меньшей исходной густоте древостоев и значительном развитии живого напочвенного покрова необходимы предварительное выжигание части подстилки либо минерализация почвы и выбор меньшей интенсивности 1-го приема рубки (до 20 %). Анализ изменчивости линейных приростов высотно-возрастных групп подроста подтвердил выводы, сделанные по результатам анализа количества и качества возобновления, показал различия в реакции разных групп подроста на изменение микроклиматических условий на вырубках.

© Семенякин Д.А., Тихонова И.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Отмечено сходство северной лесостепи с южной тайгой по условиям возобновления сосны. Результаты исследования могут быть использованы для уточнения требований к рубкам и достижения лучшего возобновления сосняков.

Ключевые слова: экологическое лесоведение, возобновление сосняков, комплексный анализ возобновления сосняков, северная лесостепь, рубки ухода, рубки переформирования

Благодарности: Исследование выполнено в рамках бюджетного проекта ФГБНУ ИЛ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН № 0287-2022-0010. Авторы выражают благодарность сотрудникам института В.В. Иванову, Д.С. Собачкину, Р.С. Собачкину, Н.М. Ковалевой за помощь в работе.

Для цитирования: Семенякин Д.А., Тихонова И.В. Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 33–51. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-33-51>

Original article

The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling

*Denis A. Semenyakin*¹, Candidate of Biology, Junior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2102-0516>

*Irina V. Tikhonova*², Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [V-3735-2017](https://orcid.org/0000-0001-6929-9491), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6929-9491>

¹Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; denis8880@inbox.ru

²West-Siberian Branch of V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, ul. Zhukovskogo, 100/1, Novosibirsk, 630082, Russian Federation; selection@ksc.krasn.ru

Received on October 14, 2021 / Approved after reviewing on January 19, 2022 / Accepted on January 23, 2022

Abstract. A research of qualitative and quantitative characteristics of regeneration after the first selective felling with an intensity of 20 to 50 % in pine forests of the northern part of the Krasnoyarsk forest-steppe has been carried out. Some of the plantations were covered by a ground fire 5 to 10 years before the felling. The aim of this research is a generalized analysis of the regeneration state in view of the forest type, the density of forest stand and exposure to fire before felling, as well as the disturbance of soil cover, the state of forest live cover and the microclimatic conditions in the felling areas. The methods of principal component analysis as well as correlation analysis and variance analysis for individual characteristics have been used. The advantages of multivariate data analysis using the method of principal component analysis for obtaining more information on the contribution and combined effects of various environmental factors on pine regeneration in felling areas are shown. The share of explained variance of the considered factors has equaled 87 %. The most significant factors for pine regeneration have turned out to be the type of forest (felling area) and exposure to fire. The second place in terms of importance has been taken by the density of forest stand before felling and the intensity of felling. Of the factors mediated by them, illumination intensity and



soil moisture have turned out to be important. Based on the characteristics of the 4 main components, 2 options for combining the main factors for better regeneration of plantations have been established: 1) the large initial density of mature forest stands, as well as the moderate development of mosses and grasses in forest live cover make it possible to choose any felling intensity (within the studied limits), preferably in combination with preliminary burning of a part of the litter (or partial soil mineralization) 5 years before moderately-high or high intensity felling, 2) in case of lower initial density of the forest stand in forest types with significant development of forest live cover, preliminary burning of part of the litter or mineralization of the soil and the choice of a lower intensity of the the first felling (up to 20 %) are required. Analysis of the variability of linear increases in height-and-age groups of undergrowth confirmed the conclusions drawn from the analysis of the quantity and quality of regeneration, showed differences in the response of different groups of undergrowth to changes in microclimatic conditions in felling areas. The similarity of the northern forest-steppe with the southern taiga in terms of pine regeneration conditions has been noted. The results of the study can be used to clarify the requirements for felling and achieve better regeneration of pine forests.

Keywords: ecological forest science, pine forest regeneration, complex analysis of pine forest regeneration, northern forest-steppe, improvement felling, conversion felling

Acknowledgements: This research was carried out as part of a budget project of Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” no. 0287-2022-0010. The authors are grateful for the help in work to the following employees of the institute: V.V. Ivanov, D.S. Sobachkin, and N.M. Kovaleva.

For citation: Semenyakin D.A., Tikhonova I.V. The Use of Multivariate Data Analysis in Assessing the State of Advance and After-Regeneration of Pine Forests after Selective Felling. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 33–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-33-51>

Введение

Сосняки лесостепей подвержены значительной антропогенной нагрузке. Их доля в северной части Красноярской лесостепи невелика, преобладают вторичные березовые и сосново-березовые леса. Лесистость района – в среднем 30 %. Из-за рубок и пожаров большая часть лесов представлена одновозрастными насаждениями. В частности, в Погорельском бору сосняки занимают 68 % площади (29 % – березняки), в т. ч. одновозрастные 100–120-летние насаждения – 45 %. Такой возрастной состав, значительная доля березняков, рекреационная нагрузка на живой напочвенный покров (ЖНП), более короткий оборот рубки, свойственные пригородным лесам, ведут к увеличению рисков для полноценного возобновления сосняков и меньшей потенциальной устойчивости насаждений [5, 7, 19, 31]. Учитывая эти обстоятельства, а также средообразующее и хозяйственное значение сосновых лесов, особенно важно иметь полную объективную информацию о влиянии лесопользования на возобновление сосняков и на ее основе подбирать оптимальные способы рубки, обеспечивающие надежное и качественное возобновление хвойных лесов.

Действующими правилами в защитных лесах разрешены только рубки ухода (в их числе – рубки обновления и переформирования) [22]. В условиях лесостепей в настоящее время лесозаготовителям рекомендованы к использованию несплошные постепенные рубки, т. к. они позволяют сохранить часть семенных деревьев и лесной обстановки для возобновления основной породы [2, 3, 5, 8, 40, 43]. Однако применение выборочных рубок не всегда обеспечивает хорошее возобновление и устойчивость из-за недоучета местных лесорастительных

условий, наличия или отсутствия предварительного возобновления основной и сопутствующей породы, состояния ЖНП, урожайности семян деревьев накануне рубки и др. [2, 14, 30, 33, 42]. Даже в таежной зоне рубки нередко приводят к смене хвойных малоценными лиственными породами, затягиванию процессов лесовосстановления, большим пожарам, ветровалам, а в некоторых случаях – к эрозии почв, образованию пустырей, пересыханию мелких рек, заболачиванию [6, 18, 23, 31, 34, 37]. Справедливой критике подвергается практика постепенного сокращения возраста спелости древостоя и его отведения под рубку, недостаточного для полноценного воспроизводства поколений леса [31]. В решении этого вопроса ориентиром, на наш взгляд, мог бы служить период стабилизации роста естественных сосновых древостоев разных бонитетов – от 100–110 до 130–140 лет [12].

Несмотря на то, что для изучения процессов возобновления сосняков после рубок, в т. ч. в условиях лесостепей, сделано немало, остается ряд нерешенных вопросов. Одна из причин этого – большое разнообразие лесорастительных условий: определенные методические трудности при сравнении вариантов опыта возникают в связи с отсутствием 2 идентичных по характеристикам естественных насаждений, влиянием на возобновление основной породы не только варианта рубки, но и множества неучтенных естественно-исторических факторов.

Цель – комплексная оценка влияния 1-го приема 2-приемной выборочной рубки разной интенсивности, а также предваряющих рубку и последующих характеристик насаждений, микроклиматических условий, сформировавшихся на опытных участках сосняков после рубки в Погорельском бору Красноярской лесостепи.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в Погорельском бору, его площадь 1992 га, условия произрастания сосняков типичны для сосновых боров Красноярской лесостепи. Бор расположен в 40 км от г. Красноярска на водоразделе с небольшими уклонами (2–3°, абсолютная высота – 280 м над ур. м.), основа рельефа (от увалистого до микрозападного и выположенного) – покровное галечниковое плато, преобладают дерново-подзолистые почвы. Климат резко континентальный, умеренно холодный, умеренно засушливый: в годы исследования индекс континентальности изменялся от 80 до 89, среднегодовая температура – от $-0,6$ °C до $+2,3$ °C, среднегодовое количество осадков – от 410 до 595 мм (рис. 1).

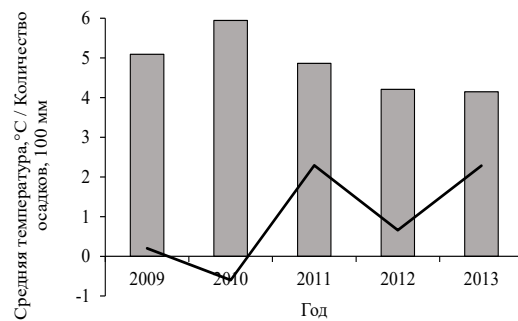


Рис. 1. Динамика среднегодовых температуры воздуха — и суммы осадков ■ в районе исследования в 2009–2013 гг. по данным метеостанции «Красноярск»

Fig. 1. Dynamics of average annual air temperature — and total precipitation ■ in 2009–2013 in the study area according to the «Krasnoyarsk» weather station

Объектами исследования были чистые по составу 100–120-летние разнотравно-зеленомошные и бруснично-разнотравно-зеленомошные высокополнотные сосняки послепожарного происхождения, растущие на дерново-подзолистых легкосуглинистых и супесчаных почвах, полнота – 1,0–1,2, средний диаметр ствола – 30–39 см, высота – 25–30 м, запас – 372–570 м³/га. Заложено 6 постоянных пробных площадей размером 0,5–0,8 га. Первый прием экспериментальной выборочной рубки интенсивностью 20, 30, 35 и 50 % по запасу был проведен зимой 2008–2009 гг. Рубка выполнена методом узких лент шириной 30–40 м, соответствующей 3/2 средней высоты древостоя (пасека), ширина волока – 5–7 м. Использованы бензодвигательные пилы Stihl-360 и Stihl-250 для валки деревьев и обрезки сучьев; трактора, колесный МТЗ-82 и гусеничный ТТ-4, для трелевки хлыстов.

На каждой пробной площади учитывали сохранность предварительного и последующего возобновления (%), встречаемость подроста (%), количество и жизненное состояние предварительной и последующей генераций естественного возобновления. Учет количества и качества возобновления проводили с 2009 по 2013 гг. 3 раза (в год рубки, через 3 и 5 лет после нее) на площадках 1 и 2 м² (42–80 площадок для каждой пробной площади), размещенных на волоках и пасеках перпендикулярно длинной стороне пробной площади. При анализе данных в дальнейшем рассматривали только здоровые и ослабленные растения по 5 высотным группам: всходы, самосев (до 0,1 м), подрост (мелкий – до 0,5 м, средний – 0,5–1,5 м, крупный – более 1,5 м) – согласно шкале оценки естественного возобновления главных пород [23]. Возраст мелкого подроста составил 5–12 лет, среднего – 8–17 лет, крупного – 13–21 год. Ввиду разного распределения высотно-возрастных групп возобновления сосны на участках для их сравнения рассчитывали также число условно крупного подроста с коэффициентами 0,5 и 0,75 для пересчета количества соответственно мелкого и среднего подроста в условно крупный подрост. У 330 моделей 3 групп подроста были измерены линейные приросты стволика за последние 5–10 лет. Для определения качества возобновления использовали метод оценки жизненного состояния в каждой представленной высотной группе подроста: здоровый – 1-я категория, ослабленный – 2-я, усыхающий – 3-я, сухой – 4-я.

Определяли степень захламленности поверхности почвы, нарушенности почвы и ЖНП, его численность, видовой состав, фитомассу и состояние. Степень захламленности поверхности почвы и ее нарушенности оценивали в год рубки соответственно по относительной площади, покрытой порубочными остатками, и доле площадок с поврежденным почвенным покровом от общего числа учетных площадок, выделяя 4 категории: от незахламленной/ненарушенной поверхности (до 20 %) и слабоминерализованной/слабозахламленной (30–40 %) до средне- и сильнозахламленной / средне- и сильноминерализованной (50–70 и 80–100 % соответственно). Видовой состав и фитомассу ЖНП на каждом участке определяли на 20 площадках по 1 м² (отдельно на пасеке и волоке по 10 шт.) через 1 год и через 5 лет после рубки.

Измерения освещенности проводили над вершинами подроста на высоте 1,5 м через 1–2 м в безоблачную погоду с 12:00 до 14:00 относительно открытого места. В течение 5 дней в сухую ясную погоду с 12:00 до 14:00 фиксировали температуру и влажность воздуха на высоте 10 см и 2 м, подстилки, порубочных

остатков и почвы на поверхности, в подстилке и на глубине почвы 0–10 см в 5-кратной повторности. Влажность воздуха определяли с помощью аспирационного психрометра Ассмана, почвы и подстилки – весовым методом и высушиванием образцов в сушильном шкафу в течение 6–12 ч при температуре 105 °С до абсолютно сухой массы.

Поскольку в районе исследования доминирующие вейники, осочки и мхи в сообществах с высокими проективным покрытием и фитомассой ЖНП нередко препятствуют появлению и сохранению всходов сосны после рубок и пожаров, а брусника, багульник, рододендрон, лишайники, кипрей и ряд других видов, относимых к мелкому разнотравью, наоборот, благоприятствуют сохранению возобновления [4, 14, 18, 21, 23, 25], была сделана качественная оценка состава растительности на вырубках. Типу леса на каждой пробной площади присваивали баллы: 1 – в ЖНП преобладают вейники, мхи и осочки; 2 – доля мхов, осоки и вейников не превышает 40–50 %; 3 – преобладают кустарнички (брусника, черника), разнотравье (мелкое разнотравье и кипрей), мхов – до 40 %. Оценки для каждого участка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика сосняков на исследованных экспериментальных участках до и после рубки
Characteristics of pine forests in the experimental study areas before and after felling

Уча- сток	Тип леса / вырубки	Состав древостоя	Густота, шт./га	Полнота	Интен- сивность рубки	Встречаемость подроста (до/после рубки)
			(до/после рубки)			
P1	P-з ² / p-в-з ²	10С	390/290	1,1/0,8	35	48/55
P2*	Ч-б-р-з ³ / б-в-з-р ³	10С	310/220	1,0/0,7	35	67/85
P3*	Б-р-з ³ / б-в-р ³	10С	400/230	1,0/0,5	50	73/81
P4*	Б-р-з ³ / в-р-б ³	10С	430/300	1,0/0,7	35	76/88
P5	P-з ² / p-в-з ¹	10СедБ	420/310	1,1/0,8	30	57/62
P7*	Б-р-з ³ / б-з-р ³	10С	650/530	1,2/1,0	20	75/90
К	P-з ²	10С	440	1,2	–	65

Примечание: К – контроль; р – разнотравный, з – зеленомошный, в – вейниковый, ч – черничный, б – брусничный; ¹⁻³ – качественная оценка типа леса (вырубки). * За 5 и 10 лет до рубки участок пройден низовым пожаром.

Летом 3 раза в самый жаркий месяц года измеряли температуру и влажность в верхнем слое почвы 5–10 см, на поверхности почвы, в подстилке и на высоте 2 м, а также относительную (к открытому месту) освещенность с помощью люксметра в 10-кратной повторности. Использовали метеорологические данные метеостанции «Красноярск». Статистическую обработку данных проводили в программах Excel и Statistica, применяя корреляционный, дисперсионный и многофакторный анализ (метод главных компонент) [10]. Метод главных компонент позволяет, наряду с множеством других возможностей, установить характер и степень влияния внешних и внутренних факторов на количество и качество объектов, их распределение в пространстве, динамику, а также отобрать наиболее значимые из них [10]. Он, как и другие методы многомерного анализа, применяется также для решения лесоводственных задач [38, 41].

Результаты исследования и их обсуждение

Условия для естественного возобновления сосны в Погорельском бору. Как показали результаты обследования участков до рубки, численность жизнеспособного (без усыхающих и сухих экземпляров) подроста составляла 4,3–10,2 тыс. шт./га. Соответственно, значительная часть обследованных древостоев с преобладающим возрастом деревьев 110–120 лет, несмотря на высокую полноту, потенциально готова к появлению возобновления с периодичностью 3–5 лет, постепенно отмирающего в условиях недостаточного освещения. Высокие количественные показатели возобновления естественных спелых сосняков приводятся для многих таежных лесорастительных районов Сибири, в т. ч. для Красноярской лесостепи [4, 6, 11, 15, 23, 25, 30]. Недостаточное возобновление отмечается в спелых насаждениях ленточных лесостепных боров Западной Сибири [2, 14, 27].

Пробные площади до рубки различались по густоте, полноте и запасу древостоев, обилию и состоянию предварительного возобновления (табл. 1, рис. 2). После рубки относительная полнота древостоев уменьшилась до 0,5–1,0, густота – до 220–530 дер./га, запас – до 177–408 м³/га.

Рис. 2. Численность возобновления на участках в Погорельском бору: возобновление (1), в т. ч. подрост (2), до рубки; возобновление (3), в т. ч. подрост (4) и условно крупный подрост (5), после рубки

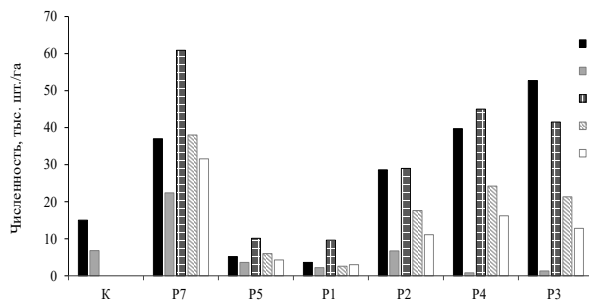


Fig. 2. The number of regeneration in the areas of Pogorelsky pine forest: regeneration (1), including undergrowth (2), before felling; regeneration (3), including undergrowth (4) and conditionally large undergrowth (5) after felling

Известно, что наилучшее возобновление сосны наблюдается при сомкнутости материнского полога 0,6–0,7 [6, 23]. Оптимальное освещение для появления всходов и роста сеянцев и подроста сосны под пологом леса составляет 25–50 % по сравнению с открытым местом, влажность подстилки – 15–25 % [20, 25, 45]. Лучшее состояние подроста сосны в засушливых условиях лесостепи отмечено в экотопах с определенной разницей температур воздуха и почвы, что обеспечивается оптимальным затенением почвы кронами деревьев, подстилкой и травяной растительностью, после полного удаления которых сокращается численность и рост возобновления вследствие иссушения или вымораживания почвы [20, 27, 41].

На исследуемых участках после рубки относительная освещенность увеличилась с 23 до 40–62 % на пасаках и до 42–74 % на волоках, температура воздуха на высоте 2 м, в подстилке и почве в июле повысилась на 1–4 °C по сравнению с контролем, температура подстилки (порубочных остатков) была на 6–9, а почвы – на 8–11 °C ниже, чем температура воздуха на высоте крупного подроста (табл. 2). Влажность приземного слоя воздуха – 57–66 % на пасаках и 58–70 % на волоках – изменялась без определенной тенденции к росту или уменьшению на разных участ-

ках. Влажность подстилки на пасаках в среднем составляла 40–48 % (на волоках – 41–51 %), влажность почвы – 12–18 % на пасаках и 13–20 % на волоках. Исходя из приведенных характеристик оптимума, сложившиеся условия в целом можно считать достаточно благоприятными для возобновления сосны на дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах.

Состояние возобновления на экспериментальных участках. Так как рубки проводились зимой, сохранилась большая часть подроста (66–75 %), ЖНП и почвенного покрова (70–78 %), захламленность порубочными остатками на всех участках была невысокой (20–34 % средне- и сильнозахламленных площадок). В течение 3–5 лет после рубки фитомасса ЖНП быстро восстановилась. На пасаках исследуемых участков она варьировала от 130 до 210 г/м², на участке P2 составила 570 г/м², на волоках – от 122 до 153 (260 – для P2) г/м². На участках P1–P5 в травяном покрове увеличилась доля вейников (*Calamagrostis arundinacea* и *C. epigeios*) и разнотравья (с преобладанием кипрея).

Таблица 2

Температура и влажность в приземном слое воздуха на высоте 2 м, в подстилке/ порубочных остатках, в верхнем слое почвы на экспериментальных участках Погорельского бора в июле 2013 г.
Temperature and humidity in the bottom layer of air at a height of 2 m, in litter/ felling residues, in the top layer of soil in the experimental areas of the Pogorelskiy pine forest in July 2013

Уча- сток	Температура, °С			Влажность			Освещенность
	воздуха на высоте 2 м	под- стилки	почвы	воздуха на высоте 2 м	под- стилки	почвы	
%							
<i>Пасака</i>							
К	22,9	14,3	12,8	65	42	13	22,6
P1	23,8	18,0	13,0	66	44	13	41,8
P2	22,5	15,3	12,2	64	48	16	37,5
P3	24,0	18,1	15,7	64	41	18	62,4
P4	23,7	17,5	14,1	57	40	14	48,3
P5	25,6	18,6	15,8	66	42	13	58,0
P7	22,4	14,2	12,3	65	47	12	21,1
<i>Волок</i>							
P1	24,3	18,0	13,0	60	41	17	45,3
P2	23,2	15,7	12,1	63	44	15	41,7
P3	25,8	18,8	15,7	58	50	20	73,6
P4	23,9	15,4	13,2	59	51	13	56,2
P5	25,0	17,1	13,4	70	43	17	51,5
P7	–	–	–	–	–	–	–

В течение 5 лет после рубки на всех участках появилось возобновление. При этом на волоках было значительно меньше подроста, но в 3 раза больше всходов и самосева, чем на пасаках. На участке с высокой интенсивностью рубки (P3) в 1-е два года после рубки наблюдалось достоверно большее сокращение числа подроста предварительной генерации по сравнению с остальными участками ($p < 0,038$), а лучшие сохранность и состояние подроста отмечены после

рубков меньшей интенсивности ($r = -0,64$ и $-0,57$). Через 5 лет после рубки пробные площади достоверно различались по числу всходов и самосева ($p < 0,050$), по числу условно крупного подроста ($p < 0,0003$). Следует отметить, что на участках P2–P4, P7 соответственно за 5 и 10 лет до рубки прошел низовой пожар, уничтоживший подрост и вызвавший появление большого числа всходов и самосева, чем во многом объясняются различия между указанными участками в возрастном составе возобновления. К моменту рубки численность жизнеспособного возобновления сосны на этих участках достигла 24–52 тыс. шт./га, а после рубки увеличилась до 29–61 тыс. шт./га. На участках P1 и P5 на стволах деревьев также были видны следы нагара от старого низового пожара, прошедшего, предположительно, 25–30 лет назад, после рубки численность возобновления сосны на них увеличилась с 3,6 до 9,4 тыс. шт./га и с 5,2 до 10,1 тыс. шт./га соответственно (рис. 2). Встречаемость подроста после рубки составила 55–90 % (табл. 1): на 4 участках из 6 подрост относительно равномерно распределен по площади.

Корреляционный анализ данных подтвердил достоверное сокращение суммарной численности возобновления через 5 лет после рубки с увеличением доли вейников ($r = -0,43$) и рост численности мелкого подроста с повышением доли брусники и кипрея ($r = 0,51$ и $0,48$) в составе ЖНП, что согласуется с результатами многих исследований, проведенных в разных природно-климатических условиях [1, 6, 14, 16, 21, 23, 25, 29, 40].

Многофакторный анализ данных. Как видно из рис. 2, низовой пожар оказал сильное стимулирующее воздействие на возобновление сосны до рубки. При помощи стандартных методов статистического анализа данных сложно отделить от такого мощного фактора другие и оценить их влияние, т. к. только 1–2 из них можно управлять для закладки опыта с повторностями и проведения, например, 4-факторного дисперсионного анализа, чтобы определить долю воздействия каждого фактора. Трудно также ответить на вопрос, что стало причиной лучших показателей возобновления на участке P7 – низкая интенсивность рубки или большая продолжительность послепожарного периода до рубки.

Для установления взаимосвязей между всеми показателями (зависимыми и независимыми переменными) был использован метод главных компонент (множественных факторов). Выделено 4 главных компоненты, объясняющих 87 % изменчивости данных (табл. 3). Согласно коэффициентам при 1-й главной компоненте с наибольшим весом (37 %), увеличение интенсивности рубки в сочетании с предварительным огневым воздействием в лучших типах леса и вырубке (по качественным характеристикам состава ЖНП) не оказывает угнетающего воздействия на возобновление в древостоях большей густоты до рубки – наблюдается увеличение числа жизнеспособного возобновления сосны всех возрастных групп в периоды до и через 5 лет после рубки.

Вторая главная компонента (28 %) выявила следующую зависимость: в более редких древостоях, не пройденных низовым пожаром, увеличение интенсивности рубки ведет к росту освещенности и массы ЖНП, температуры и влажности подстилки и почвы, но при этом численность возобновления (особенно подроста) сокращается до и после рубки.

Третья главная компонента (13 %) показала, что предварительное воздействие огня на напочвенный покров и проведение рубки меньшей интенсивности в более редких древостоях, даже с преобладанием в составе растительности мхов и злаков, сопровождается увеличением численности возобновления до и после рубки, а также большей равномерностью его распределения на площади.

Таблица 3

**Характеристика главных компонент при оценке возобновления сосняков
Погорельского бора**
**Characteristics of the main components in assessing the regeneration of pines
in the Pogorelskiy pine forest**

Показатель	Компонента			
	1	2	3	4
Тип леса*	0,754	0,071	-0,471	0,016
Тип вырубki**	0,858	-0,123	-0,610	-0,204
Густота древостоя*	0,398	-0,758	-0,628	0,167
Интенсивность рубки	0,451	0,723	-0,365	0,506
Воздействие огня*	0,906	-0,446	0,523	-0,032
Освещенность**	0,299	0,735	0,440	0,423
Фитомасса ЖНП**	-0,127	0,519	0,205	-0,427
Температура подстилки/порубочных остатков**	-0,522	0,470	-0,429	0,317
Температура почвы**	0,043	0,609	-0,317	0,240
Влажность подстилки/порубочных остатков**	0,382	0,614	-0,530	0,338
Влажность почвы**	0,467	0,785	-0,018	0,219
Подрост*	0,260	-0,887	0,431	-0,154
Самосев*	0,893	0,281	0,586	-0,085
Подрост**	0,702	-0,572	0,511	-0,457
Самосев**	0,815	-0,390	0,378	0,580
Встречаемость подростa*	0,724	-0,212	0,489	0,023
Встречаемость подростa**	0,566	-0,348	0,332	-0,541
Общая дисперсия	6,33	4,81	2,11	1,43
Доля общей дисперсии, %	37,2	28,3	13,0	8,4

*, ** До и после рубки соответственно.

Четвертая главная компонента (9 %) дополнила 1-ю и установила связи между увеличением интенсивности рубки с одной стороны и повышением освещенности, температуры почвы, уменьшением массы ЖНП и количества подростa, но увеличением числа всходов и самосева после рубки с другой. Очевидно, это также относится к волокaм, которые были включены в анализ наряду с пaсеками. Появление большого числа самосева на волокaх отмечали исследователи [6, 25, 26].

Проведенный анализ позволил отобрать наиболее значимые факторы для качества возобновления сосны на вырубках в Погорельском бору, установить эффекты их совместного влияния, а также оценить относительный вклад и достоверность влияния каждого из них. В целом результаты подтвердили наибольшее (определяющее) значение низового пожара, а также типа леса (и типа вырубki) для возобновления сосны на исследуемых участках Погорельского бора (1-я компонента). Следующими по значимости являются исходная густота древостоя и интенсивность рубки (2-я компонента). Фактор «интенсивность рубки» включается в характеристики 1–4-й главных компонент. Как видно из табл. 3, влияние относительного показателя интенсивности рубки неотделимо от воздействия исходной густоты древостоя (в 1–3-й главных компонентах), вместе они форми-

руют условия освещения и степень развития ЖНП, что согласуется с выводами ряда авторов [17, 22, 24, 41]. Вовлечение в анализ других показателей – освещенности, влажности почвы – тоже существенно, однако самостоятельного значения для района исследований они не имеют и опосредованы изменением основных характеристик. Наиболее значимые факторы вместе объясняют около 67 % изменчивости численности возобновления на вырубках, в т. ч. примерно 24 % обусловлено влиянием пожара, 21 % – типом леса и вырубке, 13 % – густотой древостоя, 9 % – интенсивностью рубки.

Следует также отметить, что в результате этого исследования был сделан вывод о том, что сохранность предварительного возобновления обратно коррелирована с численностью последующего возобновления: с увеличением интенсивности рубки больше повреждается подрост, но складываются условия, благоприятные для появления и роста всходов и самосева. Это естественно и обнаруживается при сравнении наиболее подходящих условий для 1-х стадий развития молодого поколения сосны [25]. Однако установление такой связи, недостоверной по результатам корреляционного анализа, с помощью метода главных компонент свидетельствует о возможности использования данного метода в разделении реакции лесных экосистем в ответ на влияние множества факторов.

Корреляции годовых линейных приростов возобновления с погодными условиями Красноярской лесостепи. Количественные и качественные показатели возобновления, линейный рост подроста – это разные проявления реакции лесных фитоценозов на изменение условий среды. Анализ динамики развития подроста и связи этого явления с погодными условиями позволил сравнить особенности изменения условий роста на участках в течение всего периода исследований в отличие от данных по микроклиматическим наблюдениям только за июль. Результаты корреляционного анализа подтвердили разные требования возрастных групп подроста к условиям произрастания. На участках, пройденных выборочными рубками, прирост подроста был тесно связан со среднегодовой температурой воздуха ($r = 0,74-0,90$, $p < 0,001$), со средними температурами января, февраля, мая–сентября ($r = 0,63-0,85$, $p < 0,001$), с годовым индексом сухости ($r = 0,81-0,98$, $p < 0,001$). При этом коэффициенты корреляции линейных приростов с климатическими характеристиками у разных возрастных групп подроста различались по знаку. Например, достоверно отрицательно с годовой суммой осадков коррелировали приросты мелкого подроста ($r = -0,67...-0,95$, $p < 0,001$) и, частично, среднего ($r = -0,93-0,91$, $p < 0,38-0,001$). Наоборот, приросты крупного подроста положительно связаны с суммами осадков месяцев вегетации ($r = 0,50-0,92$, $p < 0,05-0,001$) и за год ($r = 0,71-0,99$, $p < 0,001$). Для мелкого подроста коэффициент корреляции приростов со среднегодовой температурой составил $r = 0,78$ ($p < 0,001$), он имел отрицательные значения при сравнении с температурой первых месяцев вегетации – апреля, мая, когда рост и транспирация растений с неглубокой корневой системой начинаются при замерзшей почве ($r = -0,71...-0,82$, $p < 0,001$). Средний подрост, менее чувствительный к высоким температурам вегетационного периода, отличался положительной связью со среднегодовой температурой воздуха ($r = 0,74$, $p < 0,001$) и средними температурами всех месяцев вегетационного сезона на экспериментальных участках ($r = 0,60-0,89$,

$p < 0,05-0,001$). У крупного подроста корреляции с температурами тех же месяцев изменялись от $-0,72$ до $0,51$ ($p < 0,85-0,001$) и отличались большей индивидуальной изменчивостью, что, по-видимому, связано с его вступлением в период интенсивного роста и большим участием в совместном развитии групп подроста.

Возрастные группы подроста различались также по тесноте корреляции между линейными приростами и условиями вегетационного сезона на разных участках. Например, у мелкого подроста на участках P1 и P5, не пройденных пожаром, линейный прирост увеличивался с повышением температуры в апреле и мае ($r = 0,59-0,82$), а на участках P3 и P4 – с повышением температуры в июне и августе ($r = 0,69-0,75$). На наш взгляд, это связано с разницей между участками по времени схода снежного покрова и оттаивания почвы, более ранних на P1 и P5, вследствие множества возможных причин (от неодинакового механического состава почвы до состава и массы ЖНП и густоты/сомкнутости крон древостоя). Кроме того, приросты мелкого подроста более тесно коррелируют с суммами осадков месяцев вегетации на всех пробных площадях, а среднего и крупного – только на 3. Интересно, что для крупного подроста наиболее тесная связь прироста с температурами вегетационного сезона установлена на участке P3, это подтверждает более мягкое влияние климата на подрост в малонарушенных лесах по сравнению с действием на подрост вырубок большей интенсивности.

У лесоводов сложилось двойственное отношение к пожарам и их роли в возобновлении сосняков: на юге они нередко приводят к иссушению почвы и образованию остепненных пустошей [14, 34], а в таежной зоне, особенно на вечной мерзлоте, наоборот, лучшее возобновление отмечается при более сильном прогревании почвы и удалении (выгорании) подстилки [1, 11, 16, 26, 28, 30], поэтому рубку там рекомендуют проводить летом, чтобы обеспечить большую минерализацию поверхности почвы [8, 14]. Частичную минерализацию поверхности почвы используют в качестве аналога контролируемому выжиганию как методу содействия естественному возобновлению [6, 8, 14, 25, 26, 36], но для лучшего результата минерализацию надо проводить в годы с наивысшим урожаем семян и в сроки перед опадением семян [9], при этом оставлять достаточное число семенных деревьев [4, 6, 14, 21]. Учитывая эколого-географические условия местности, можно приблизительно рассчитать процентное соотношение выжигания либо минерализации и прочих дополнительных условий стимулирования возобновления. В связи с этим одной из задач данного исследования было уточнить положение Погорельского бора в экологическом ряду условий возобновления сосняков.

Красноярская лесостепь расположена на широте, соответствующей зоне южной тайги, окружена ею и занимает промежуточное положение между двумя крайними характеристиками возобновления хвойных лесов по соотношению тепло- и влагообеспеченности. Результаты проведенной работы показали сильное стимулирующее влияние огня невысокой интенсивности на возобновление сосны в условиях северной лесостепи, что отмечали исследователи [1, 16, 25], в т. ч. проводившие экспериментальные выжигания [11, 15, 46]. При этом более равномерным распределением по площади и лучшим состоянием отличались появившиеся в большом числе до рубки всходы и самосев в сосняках бруснично-разнотравных, на всех 4 участках, пройденных низовым пожаром 5–10-летней давности. Анализ изменчивости линейных приростов подроста также подтвердил недостаток тепла и избыток влаги для мелкого подроста.

То есть данные свидетельствуют о большей близости условий произрастания в Погорельском бору к условиям южной тайги, чем к южной лесостепи.

Выборочные рубки в Погорельском бору активизируют процессы возобновления сосняков, хотя их вклад из 4 основных факторов оказался наименьшим. По мнению некоторых исследователей, в условиях лесостепи разреживание само по себе не приводит к появлению достаточного возобновления сосны [2, 14, 30], это подтверждают также результаты нашей работы, здесь требуется дополнительная минерализация почвы.

Таким образом, используя методы многомерного анализа данных, можно уточнить алгоритм планирования лесохозяйственных мероприятий для разных сочетаний исходных параметров лесных фитоценозов, уменьшить связанные с рубками экологические риски, повысить качество возобновления, особенно когда исследование проводится с участием множества нерегулируемых факторов.

Чтобы выбрать лучший вариант решения проблемы повышения устойчивости разновозрастных насаждений Погорельского бора, на наш взгляд, целесообразно проведение дополнительного исследования возобновления с использованием следующих вариантов рубки обновления и реформирования спелых разновозрастных древостоев: 1) 2-приемная рубка через 15–20 лет методом сплошных узких 30-метровых лент на пасаках шириной 100–150 м (чересполосно-постепенная или групповая выборка), более удобная для осуществления лесоводственных мероприятий по сравнению с равномерно-выборочной; 2) равномерно-выборочная в 2 приема с интервалом 5 лет на пасаках шириной 30 м, но с перерывом 20 лет между разными участками для формирования группово-разновозрастных древостоев (в разных масштабах площади для 2 предлагаемых вариантов). Учитывая, что возобновление на волоках в несколько раз выше, чем на пасаках, для его сохранения целесообразно во 2-й прием рубки новые волокна размещать посередине пасаек, а прежние оставлять нетронутыми. Это позволит в 1-м варианте ограничиться одним приемом рубки для конкретных площадей, т. к. каждый из последующих приемов равномерно-выборочной рубки неизбежно приведет к сокращению численности возобновления и сведет на нет все усилия предыдущего этапа по стимулированию возобновления, потребует новых затрат, растянет период восстановления, сократит генетическое разнообразие нового поколения леса [29]. Во 2-м варианте период между рубками уменьшен по той же причине – чтобы снизить потери крупного подроста, который хуже приспосабливается к резкой смене условий. Достаточно обоснованно для целей устойчивого лесоводства предложение некоторых лесоводов использовать дифференцированный подход в определении пространственного размещения и периодичности рубки, исходя из структуры и режима естественных повреждений в малонарушенных лесах, особенно к тем участкам бореальных лесов, где пожары благоприятствуют развитию разновозрастных насаждений [9, 13, 16, 19, 25, 32, 35, 37, 39, 44].

Заключение

Использование одного из вариантов многофакторного анализа – метода главных компонент – для оценки совместного влияния разных факторов на возобновление сосны в сосняках Красноярской лесостепи позволило выявить несколько комплексных, не коррелированных между собой главных компонент и подобрать их лучшие сочетания для достижения полноценного возобновления

сосны на вырубках при разных исходных параметрах насаждений. В частности, установлено, что низовой пожар за 5–10 лет до рубки оказывает в 2,5 раза большее стимулирующее воздействие на возобновление сосны, чем рубка, вместе с типом леса они объясняют превосходящую часть изменчивости численности возобновления на участках. Различия по численности и встречаемости возобновления между участками, пройденными пожаром за 5–10 и 25–30 лет до рубки, свидетельствуют о быстром ослабевании со временем стимулирующего действия огня и усыхании преобладающей части послепожарного возобновления, если не происходит увеличения освещенности. Так как мелкий подрост лучше адаптируется к изменениям условий после рубки, оптимальный период проведения работ по содействию естественному возобновлению – 3–5 лет до рубки, а промежутков между приемами равномерно-выборочной рубки – 5 лет.

Интенсивность рубки тесно связана с исходной густотой древостоя, и последнюю необходимо учитывать в прогнозах последствий выборочных рубок для возобновления насаждений и при определении интенсивности рубки. В более редких спелых (возможно, ранее прореженных рубками ухода) древостоях со значительным развитием живого напочвенного покрова (видов, препятствующих возобновлению) необходимо использовать приемы стимулирования возобновления. Здесь требуется приложение определенных усилий по обеспечению оптимальной для возобновления сосны доли сохраненной подстилки и живого напочвенного покрова.

Совокупную реакцию возобновления сосны на изменение внешних факторов можно применять в качестве биоиндикатора, который свидетельствует, что в экологическом ряду условий возобновления сосняков северная Красноярская лесостепь имеет сходство с южной тайгой и существенно отличается от южной лесостепи. Поэтому для данных условий лучше подходят приемы содействия естественному возобновлению, используемые в южной тайге, но с учетом принадлежности к защитной категории пригородных лесов и большой доли березняков в составе насаждений. Отмечено, что климатические условия Красноярской лесостепи достаточно благоприятны для возобновления сосны, но недостаток тепла наряду с избытком влаги в почве ограничивает развитие мелкого подростка.

Для лучшего возобновления сосняков в Красноярской лесостепи, сокращения периода лесовосстановления на конкретных участках, уменьшения затрат и негативных последствий рубок (переуплотнение почвы, неоднократные повреждения подростка), удобства проведения лесоводственных мероприятий и формирования группово-разновозрастной структуры древостоев предлагается провести исследования с использованием других вариантов рубок обновления и переформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алесенков Ю.М. Особенности лесовозобновительного процесса после рубок леса в Северном Зауралье // Аграр. вестн. Урала. 2008. № 12(54). С. 77–81.
Alesenkov Yu. M. Particularities of Wood Renewing Process after Chopping Wood in North Zauralie. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2008, no. 12(54), pp. 77–81. (In Russ.).

2. Башегуров К.А., Залесова Е.С., Толстиков А.Ю., Усов М.В. Последствия группово-выборочных рубок в сосняках ленточных боров Алтая // Успехи соврем. естествознания. 2019. № 9. С. 13–18.

Bashegurov K.A., Zalesova E.S., Tolstikov A.Yu., Usov M.V. Consequence of Group-Selective Felling in Stripe Pine Forests of Altay. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances of Modern Natural Science, 2019, no. 9, pp. 13–18. (In Russ.).

3. Бобров Р.В. Несплошные рубки в лесах РСФСР // Лесн. хоз-во. 1977. № 2. С. 34–37.

Bobrov R.V. Partial Cuttings in the Forests of the RSFUR. *Lesnoe khozyaistvo* = Russian Forestry, 1977, no. 2, pp. 34–37. (In Russ.).

4. Бугаева К.С., Оскорбин П.А. Послепожарная динамика лесных насаждений в Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2008. № 4. С. 28–33.

Bugaeva K.S., Oskorbin P.A. The Postfire Dynamics of Forest Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Russian Forest Sciences*, 2008, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.).

5. Бузыкин А.И., Иванов В.В. Экологически безопасное лесопользование в бассейне озера Байкал // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2007. № 17. С. 106–109.

Buzykin A.I., Ivanov V.V. Environmentally Safe Forest Management in the Lake Baikal Basin. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* = Current Problems of the Forestry Complex, 2007, no. 17, pp. 106–109. (In Russ.).

6. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Возобновление и рост хвойных на вырубках южно-таежных лесов Среднего Приангарья // География и природ. ресурсы. 1997. № 3. С. 124–133.

Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Renewal and Growth of Conifers in Clearings of Southern Taiga Forests of the Middle Angara Region. *Geography and Natural Resources*, 1997, no. 3, pp. 124–133. (In Russ.).

7. Верхунов П.М. Генезис и возрастное строение современных сосновых лесов Сибири // Лесоводственные исследования в лесах Сибири: сб. ст. / отв. ред. канд. с.-х. наук Н.П. Поликарпов; АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева. Красноярск, 1970. Вып. 2. С. 7–58.

Verkhunov P.M. Genesis and Age Structure of Modern Pine Forests of Siberia. *Lesovodstvennye issledovaniya v lesakh Sibiri* = Silvicultural Research in the Forests of Siberia. 1970, iss. 2, pp. 7–58. (In Russ.).

8. Видякин А.И. Естественное возобновление сосны при проведении постепенных рубок в подзоне хвойно-широколиственных лесов Вятско-Камского междуречья // Аграр. вестн. Урала. 2012. № 11-1(103). С. 56–57.

Vidyakin A.I. Natural Regeneration of Pine at Carrying out Gradual Felling in Subzone of Mixed Coniferous Broad Leafed Forests in the Vyatka-Kama Interfluve. *Agrarnyy vestnik Urala*, 2012, no. 11-1(103), pp. 56–57. (In Russ.).

9. Денисов А.К. Естественному возобновлению – глубокий анализ и содействие // Лесн. хоз-во. 1984. № 11. С. 21–23.

Denisov A.K. Natural Regeneration – In-Depth Analysis and Assistance. *Lesnoe khozyaistvo* = Russian forestry, 1984, no. 11, pp. 21–23. (In Russ.).

10. Ефимов В.М., Ковалева В.Ю. Многомерный анализ биологических данных. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2007. 75 с.

Efimov V.M., Kovaleva V.Yu. Multivariate Analysis of Biological Data. Gorno-Altaiisk, RIO GAGU, 2007. 75 p. (In Russ.).

11. Жила С.В., Иванова Г.А., Иванов В.А., Цветков П.А. Лесовозобновление после пожаров разной интенсивности в сосняках Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2019. № 6. С. 53–62.

Zhila S.V., Ivanova G.A., Ivanov V.A., Tsvetkov P.A. Reforestation after Fires of Different Intensity in Pine Forests of Central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 53–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190606>

12. Загреев В.В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.

Zagreev V.V. Geographical Patterns of Growth and Productivity of Forest Stands. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 240 p. (In Russ.).

13. Иванов В.В., Кузьмичев В.В., Оскорбин П.А. Изменение структуры темнохвойных древостоев при выборочных рубках // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 2. С. 39–44. (In Russ.).

Ivanov V.V., Kuz'michev V.V., Oskorbin P.A. Changes in the Structure of Dark Coniferous Stands during Selective Felling. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo* = Forest Taxation and Forest Management, 2005, no. 2, pp. 39–44. (In Russ.).

14. Ишутин Я.Н., Ключников М.В., Бушков Н.Т., Ильичев Ю.Н., Тараканов В.В., Маскаев В.Н. Применение генетически улучшенного посадочного материала при облесении вырубок в горельниках Приобских боров // Хвойные бореал. зоны. 2007. Т. 24, № 2-3. С. 187–192.

Ishutin Ya.N., Klyuchnikov M.V., Bushkov N.T., Il'ichev Yu.N., Tarakanov V.V., Maskaev V.N. The Use of Genetically Improved Planting Material for Afforestation of Clearings in the Burnt Forests of the Ob Forests. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Zone, 2007, vol. 24, no. 2-3, pp. 187–192. (In Russ.).

15. Ковалева Н.М., Собачкин Р.С., Екимова Е.Ю. Динамика нижних ярусов растительности после экспериментальных пожаров в сосновых древостоях // Сиб. лесн. журн. 2018. № 2. С. 61–70.

Kovaleva N.M., Sobachkin R.S., Ekimova E.Yu. Dynamics of Ground Layers after Experimental Fires in Pine Forests. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2018, no. 2, pp. 61–70. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/SJFS20180206>

16. Колесников Б.П., Санникова Н.С., Санников С.Н. Влияние низового пожара на структуру древостоя и возобновление древесных пород в сосняках черничном и бруснично-черничном // Горение и пожары в лесу: материалы координац. совещ., Красноярск, 18–22 мая 1971 г. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1973. С. 301–321.

Kolesnikov B.P., Sannikova N.S., Sannikov S.N. The Influence of Ground Fire on the Structure of the Forest Stand and the Regeneration of Tree Species in Blueberry and Lingonberry-Blueberry Pine Forests. *Gorenie i pozhary v lesu* = Burning and Fires in the Forest. Krasnoyarsk, Izd-vo IFW SB AS USSR, 1973, pp. 301–321. (In Russ.).

17. Маслаков Е.Л. Эколого-ценотические факторы возобновления и формирования (организации) насаждений сосны: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Свердловск, 1981. 50 с.

Maslakov E.L. *Ecological and Cenotic Factors of Renewal and Formation (Organization) of Pine Plantations*: Doct. Biol. Sci. Dis. Abs. Sverdlovsk, 1981. 50 p. (In Russ.).

18. Мелехов И.С. Лесоводство 3-е изд., испр. и доп. М.: МГУЛ, 2005. 324 с.

Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, MGUF, 2005. 324 p. (In Russ.).

19. Морозов Г.Ф. О лесоводственных устоях (копия статьи Морозов Г.Ф. О лесоводственных устоях. М.: Гослесбуиздат, 1962. 28 с.) // Лесоводственные устои / сост. Ю.П. Дорошин и др. М., 2006. С. 64–88.

Morozov G.F. About Silvicultural Foundations (copy of the article by Morozov G.F. About Silvicultural Foundations. Moscow: Goslesbumizdat, 1962. 28 p.). *Silvicultural Foundations* / compiled by Yu.P. Doroshin et al., 2006, pp. 64–88. (In Russ.).

20. Мякушко В.К., Вольвач Ф.В., Плюта П.Г. Экология сосновых лесов. Киев: Урожай, 1989. 248 с.
- Myakushko V.K., Vol'vach F.V., Plyuta P.G. *Ecology of Pine Forests*. Kiev, Urozhai Publ., 1989. 248 p. (In Russ.).
21. Обыдёнников В.И., Волков С.Н., Коротков С.А. Эколого-географические аспекты лесоводственных систем // Лесн. вестн. 2016. № 2. С. 6–16.
- Obydennikov V.I., Volkov S.N., Korotkov S.A. Ecological and Geographical Aspects of the Silvicultural Systems. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, no. 2, pp. 6–16. (In Russ.).
22. Онучин А.А., Иванов В.В., Евдокименко М.Д., Борисов А.Н., Петренко А.Е. Практические рекомендации по применению рубок обновления и переформирования в лесах бассейна озера Байкал Республики Бурятия. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2016. 25 с.
- Onuchin A.A., Ivanov V.V., Evdokimenko M.D., Borisov A.N., Petrenko A.E. *Practical Recommendations for the Use of Renewal and Reformation Fellings in the Forests of the Lake Baikal Basin of the Republic of Buryatia*. Krasnoyarsk: V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, 2016. 25 p. (In Russ.).
23. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов: метод. указ. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т леса и древесины. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1966. 64 с.
- Pobedinskii A.V. *Study of Reforestation Processes: Guidelines*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 64 p. (In Russ.).
24. Рогозин М.В., Разин Г.С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы. Пермь: ПГНИУ, 2015. 249 с. Режим доступа: <https://elis.psu.ru/node/299089> (дата обращения: 14.12.23).
- Rogozin M.V., Razin G.S. *Development of Forest Stands. Models, Laws, Hypotheses*. Perm', PGNIU Publ., 2015. 249 p. (In Russ.).
25. Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. Естественное лесовозобновление в Западной Сибири. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 199 с.
- Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V. *Natural Reforestation in Western Siberia*. Ekaterinburg, UrB RAS, 2004. 199 p. (In Russ.).
26. Седых В.Н. Лесообразовательный процесс. Новосибирск: Наука, 2009. 164 с.
- Sedykh V.N. *Forest Forming Process*. Ed. by E.S. Petrenko. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 164 p. (In Russ.).
27. Смирнов В.Е. Полувековой опыт лесовосстановления в ленточных борах Казахстана и Алтая / под ред. Л.Н. Грибанова. Алма-Ата: Кайнар, 1966. 131 с. (Тр. Казах. науч.-исслед. ин-та лесн. хоз-ва / М-во сел. хоз-ва Казах. ССР; Т. 5, вып. 3).
- Smirnov V.E. *Half a Century of Experience in Reforestation in Belt Forests of Kazakhstan and Altai*. Ed. by L.N. Gribanova. Alma-Ata, Kainar, 1966. 131 p. (In Russ.).
28. Софронов М.А. Лесообразовательный процесс в лесах на холодных почвах и его связь с пожарами // Эколого-географические проблемы сохранения и восстановления лесов Севера: тез. докл. Всесоюз. науч. конф., Архангельск, 26–28 нояб. 1991 г. Архангельск, 1991. С. 169–171.
- Sofronov M.A. Forest Formation Process in Forests on Cold Soils and its Connection with Fires. *Ecological and Geographical Problems of Conservation and Restoration of Forests of the North: Abstracts. dokl. All-Union scientific conference*. Arkhangel'sk, 1991, pp. 169–171. (In Russ.).
29. Тихонова И.В., Экарт А.К., Кравченко А.Н., Тихонова Н.А., Семенякин Д.А. Влияние рубок разной интенсивности на генетическое разнообразие подроста сосны в северной лесостепи Средней Сибири // Лесоведение. 2021. № 4. С. 379–392.

Tikhonova I.V., Ekart A.K., Kravchenko A.N., Tikhonova N.A., Semenyakin D.A. Impact of Different Intensity Fellings on the Genetic Diversity of Pine Undergrowth in the Northern Forest-Steppes of Central Siberia. *Russian Forest Sciences*, 2021, no. 4, pp. 379–392. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821040094>

30. Чижов Б.Е., Харлов И.Ю., Козинец В.А., Агафонов Е.Ю. Зонально-типологические особенности естественного возобновления сосняков Западной Сибири // Лесн. вестн. 2011. № 3. С. 25–29.

Chizhov B.E., Kharlov I.Y., Kozinets V.A., Agafonov E.Y. Zonal-Typological Particularities of Natural Renewal of West Siberia Pine Forests. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin. 2011, no. 3, pp. 25–29. (In Russ.).

31. Шутов И.В. Деградация лесного хозяйства России. СПб.: СПбНИИЛХ, 2006. 97 с.

Shutov I.V. *Degradation of Russian Forestry*. Sankt-Peterburg, SPbSRIF Publ., 2006. 97 p.

32. Bergeron Y., Leduc A., Harvey B., Gauthier S. Natural Fire Regime: a Guide for Sustainable Forest Management of the Canadian Boreal Forest. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, pp. 81–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.14214/sf.553>

33. Bose A.K., Harvey B.D., Brais S., Beaudet M., Leduc A. Constraints to Partial Cutting in the Boreal Forest of Canada in the Context of Natural Disturbance-Based Management: A Review. *Forestry*, 2014, vol. 87, pp. 11–28. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt047>

34. Danilin I.M., Tselitan I.A. Dynamics of Forest Ecosystems Regenerated on Burned and Harvested Areas in Mountain Regions of Siberia: Characteristics of Biological Diversity, Structure and Productivity. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 6, pp. 60–72. <https://doi.org/10.15372/SJFS20160606>

35. Drever C.R., Peterson G., Messier C., Bergeron Y., Flannigan M. Can Forest Management Based on Natural Disturbances Maintain Ecological Resilience? *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, pp. 2285–2299. <https://doi.org/10.1139/x06-132>

36. Drössler L., Fahlvik N., Wysocka N.K., Hjelm K., Kuehne C. Natural Regeneration in a Multi-Layered *Pinus sylvestris* – *Picea abies* Forest after Target Diameter Harvest and Soil Scarification. *Forests*, 2017, vol. 8, 35 p. <https://doi.org/10.3390/f8020035>

37. Franklin J.F., Forman T.T. Creating Landscape Patterns by Forest Cutting: Ecological Consequences and Principles. *Landscape Ecology*, 1987, vol. 1, pp. 5–18. <https://doi.org/10.1007/BF02275261>

38. Kooch Y., Jalilvand H., Bahmanyar M.A., Pormajidian M.R. The Use of Principal Component Analysis in Studying Physical, Chemical and Biological Soil Properties in Southern Caspian Forests (North of Iran). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2008, vol. 11, pp. 366–372. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.366.372>

39. Kuuluvainen T. Forest Management and Biodiversity Conservation Based on Natural Ecosystem Dynamics in Northern Europe: The Complexity Challenge, AMBIO. *A Journal of the Human Environment*, 2009, vol. 38, no. 6, pp. 309–315. <https://doi.org/10.1579/08-A-490.1>

40. Maleki K., Allogo F.N., Lafleur B. Natural Regeneration Following Partial and Clear-Cut Harvesting in Mature Aspen-Jack Pine Stands in Eastern Canada. *Forests*, 2020, vol. 11, 741 p. <https://doi.org/10.3390/f11070741>

41. Moreno-Fernández D., Cañellas I., Barbeito I., Sánchez-González M., Ledo A. Alternative Approaches to Assessing the Natural Regeneration of Scots Pine in a Mediterranean Forest. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, pp. 569–583. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0479-4>

42. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? *Current Forestry Reports*, 2020, vol. 6, pp. 115–126. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>

43. Sukhbaatar G., Nachin B., Purevragchaа B., Ganbaatar B., Mookhor Kh., Tseveen B., Gradel A. Which Selective Logging Intensity is Most Suitable for the Maintenance of Soil Properties and the Promotion of Natural Regeneration in Highly Continental Scots Pine Forests? Results 19 Years after Harvest Operations in Mongolia. *Forests*, 2019, vol. 141, no. 10. 22 p. <https://doi.org/10.3390/f10020141>

44. Van Wagner C.E. Age-Class Distribution and the Forest Fire Cycle. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, vol. 8, pp. 220–227. <https://doi.org/10.1139/x78-034>

45. Wetzel S., Burgess D. Understorey Environment and Vegetation Response after Partial Cutting and Site Preparation in *Pinus strobus* L. Stands. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 151, pp. 43–59. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00695-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00695-2)

46. Wienk C.L., Sieg C.H., McPherson G.R. Evaluating the Role of Cutting Treatments, Fire and Soil Seed Banks in an Experimental Framework in Ponderosa Pine Forests of the Black Hills, South Dakota. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 192, pp. 375–393. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.004>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-52-64

Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России

А.С. Ильинцев^{1,2}✉, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [N-6286-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

*Е.М. Романов*¹, науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8225-1991>

*В.В. Воронин*¹, науч. сотр.; ResearcherID: [ABH-6958-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1733-0762>

А.П. Богданов^{1,2}, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [A-8611-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; a.ilintsev@narfu.ru✉, romanove.m@yandex.ru, sanles29@sevniilh-arh.ru, aleksandr_bogd@mail.ru


²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.22 / Одобрена после рецензирования 19.04.22 / Принята к печати 24.04.22

Аннотация. Приводится анализ технологий и приемов создания лесных культур, применяемых в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми, по материалам проектов лесовосстановления за 2020 г. Рассмотренные территории относятся к 6 лесным районам: Северо-таежному, Двинско-Вычегодскому таежному, Южно-таежному, хвойно-широколиственным (смешанным) лесов, Западно-Уральскому таежному и району притундровых лесов и редкостойной тайги. Созданная на основе данных проектов лесовосстановления база данных включает в себя 13 показателей: категории площадей лесовосстановления, лесорастительные условия (рельеф, тип почв, влажность почвы, группа типов лесов, степень задернения почвы), а также способы обработки почв, механизмы и агрегаты, применяемые для обработки почвы и посадки семян и саженцев, вид посадочного материала. Установлено, что в изученных регионах лесовосстановление чаще проводится на свежих (1–2-летних) вырубках из-под еловых насаждений черничного типа леса, с подзолистыми дренированными и слабодренированными почвами. При обработке почвы под лесные культуры широко используются экскаваторы (44 %), заменяющие традиционные трактора с плугами (чаще ПЛ-1). На большинстве площадей обработку почвы выполняют бороздами (52 %), но распространены также полосная обработка, микроповышениями и площадками (40 %). Больше стали использовать посадочный материал ели и сосны с закрытой корневой системой (> 50 % площадей), при этом саженцы встречаются крайне редко (7 % в Кировской области). Полученные данные позволяют оценить реальную картину применения технологий для лесовосстановления в таежной зоне на примере 3 субъектов Российской Федерации, что поможет при принятии управленческих решений для осуществления субъектами РФ своих полномочий в сфере лесовосстановления.

Ключевые слова: искусственное лесовосстановление, планирование лесовосстановительных мероприятий, лесорастительные условия, агротехника, механизация лесного хозяйства, обработка почвы, посадочный материал

© Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Рослесхоза в ФБУ «СевНИИЛХ» (№ 122020100319-9). Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Для цитирования: Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П. Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 52–64. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-52-64>

Original article

Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia

Aleksey S. Ilintsev^{1,2}✉, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

*Evgeniy M. Romanov*¹, Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8225-1991>

*Vasiliy V. Voronin*¹, Researcher Scientist; ResearcherID: [ABH-6958-2020](https://orcid.org/0000-0003-1733-0762),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1733-0762>

Aleksandr P. Bogdanov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [A-8611-2019](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; a.ilintsev@narfu.ru✉, romanove.m@yandex.ru, sanles29@sevniilh-arh.ru, aleksandr_bogd@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

Received on January 22, 2022 / Approved after reviewing on April 19, 2022 / Accepted on April 24, 2022

Abstract. The article presents an analysis of technologies and techniques for creating forest plantations used in the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, based on the materials of reforestation projects for 2020. The territories under consideration belong to 6 forest areas: the Northern taiga, the Dvina-Vycheгда taiga, the Southern taiga, the coniferous-broad-leaved (mixed) forests, the Western Ural taiga and the area of tundra forests and sparse taiga. The database created on the basis of the data from reforestation projects includes 13 indicators: categories of reforestation areas, forest vegetation conditions (terrain, soil type, soil moisture, group of forest types, degree of turfing), as well as tillage methods, mechanisms and aggregates used for tillage and planting seedlings and saplings and planting stock type. It has been established that in the studied regions, reforestation is more often carried out in fresh (1–2-year-old) felling areas in place of spruce plantations of blueberry forests, with podzolic drained and poorly drained soils. When cultivating soil for forest plantations, excavators are widely used (44 %), replacing traditional tractors with ploughs (usually PL-1). In most areas, furrow tillage is prevalent (52 %), but strips, mounds and patch scarification are also common (40 %). Containerized spruce and pine planting stocks have become more widely used (more than 50 % of the area), though seedlings are extremely rare (7 % in the Kirov Region). The data obtained allow us to assess the real picture of the use of reforestation technologies in the taiga zone on the example of three subjects of the Russian Federation, which will help the subjects of the Russian Federation in making management decisions for exercising their powers in the reforestation field.

Keywords: artificial reforestation, planning reforestation measures, forest vegetation conditions, agricultural engineering, forestry mechanization, tillage, planting stock

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of Rosleshoz in the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” no. 122020100319-9. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this article.

For citation: Pimtsev A.S., Romanov E.M., Voronin V.V., Bogdanov A.P. Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 52–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-52-64>

Введение

Необходимость лесовосстановления резко возросла с повышением интенсивности рубок, при этом серийное производство машин и механизмов для проведения лесовосстановительных работ также увеличилось (конец 50-х – начало 60-х гг. XX в.). В этот период стали больше объем и качество производимых работ, особенно в европейской части нашей страны [8]. В современном лесном хозяйстве проблема сохранения и увеличения площади хвойных лесов остается важной, и с каждым годом объемы лесовосстановления в России растут. По данным Рослесхоза, в Российской Федерации площадь, на которой проведены лесовосстановительные мероприятия, в 2020 г. составила более 1,1 млн га, в 2021 г. – свыше 1,2 млн га, а в 2022 г. – более 1,3 млн га, что сопоставимо с плановыми показателями (<https://lesprominform.ru/news.html?id=19094>).

На Европейском Севере России технологии искусственного лесовосстановления всегда были в поле зрения ученых. Проводились глубокие исследования по изучению адаптации способов создания лесных культур, по использованию различных методов обработки почвы и их влияния на рост сеянцев [3, 10, 18]. Особое внимание уделялось лесорастительным условиям вырубок Севера [6], что позволяло регулировать подбор технологий и прежде всего способов обработки почвы на территориях с различной увлажненностью. В связи с переходом на крупные питомнические комплексы рассматривался посадочный материал с возможностью обеспечения выхода сеянцев с закрытыми корнями (ЗКС). В частности, сравнению особенностей роста сеянцев с ЗКС и открытыми корнями (ОКС), их устойчивости на лесокультурной площади и продуктивности при различных методах обработки почвы на сплошных вырубках посвящены работы [4, 12, 16, 17]. Результаты исследований искусственного лесовосстановления на Севере нашли отражение в справочно-рекомендательной литературе [13, 15] и используются производством для проектного менеджмента по лесовосстановлению.

В соответствии с Правилами лесовосстановления (приказ Минприроды России от 04.12.2020 № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений»), для участков, планируемых под проведение работ, составляется проект лесных культур по общепринятой форме. Зарубежные ученые считают подобные планы, позволяющие учесть лесорастительные условия и определить соответствующие им технологии, правильно подобрать выращиваемые породы, тенденцией будущего [22, 26]. Доскональное изучение ситуации по всем участкам, отводимым для лесовосстановления,

будет способствовать принятию правильных управленческих решений и подготовке необходимых кадров, что особенно важно при развитии арендных отношений в сфере лесопользования [2].

В проекты лесовосстановления, разрабатываемые в России, входят 3 основных параметра: лесорастительные условия, техника и технологии, посадочный материал. Их оценка даст возможность найти пути совершенствования проектного менеджмента, выявить направления доработки требований по составлению и корректировке планирования. В то же время данные, приведенные в проектах лесовосстановления, позволят охарактеризовать состояние этого процесса в таежном регионе, условия размещения лесокультурного фонда, отводимого для лесовозобновления, технологии и посадочный/посевной материал, применяемые при создании лесных культур. В результате будет достигнута регламентированность подходов к лесокультурному производству региона, заготовке семян и выращиванию посадочного материала, определены приоритеты исследований и подготовки кадров на местах.

Цель исследования – анализ современного лесокультурного опыта в таежной зоне России на примере Архангельской, Кировской областей и Республики Коми для оценки состояния проектного менеджмента и разработки научно обоснованных предложений для практики лесокультурного дела.

Объекты и методы исследования

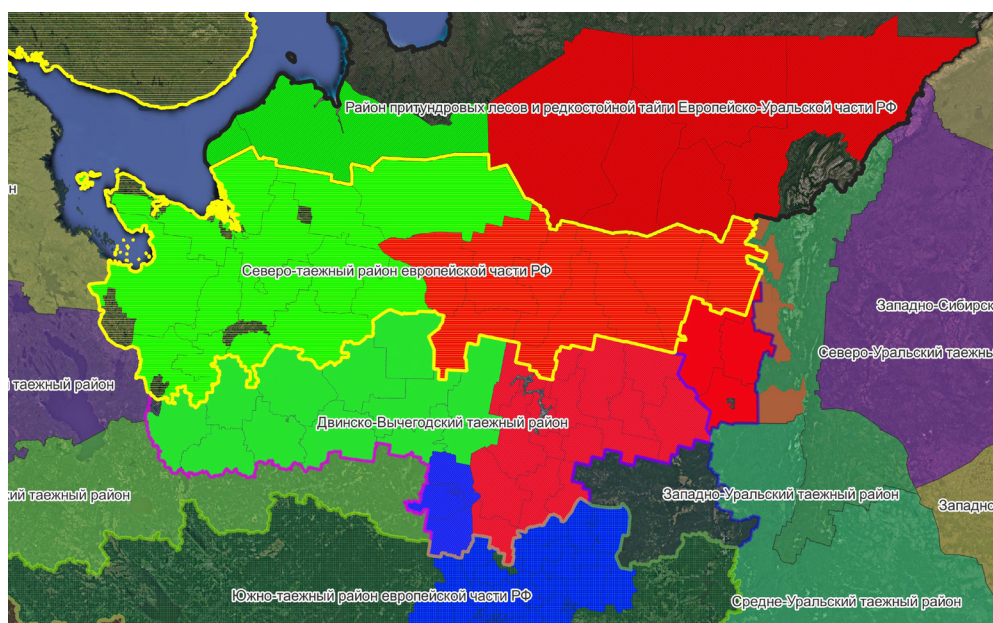
Объектами исследования являются материалы проектов лесовосстановления за 2020 г., составленные для вырубок различных лет и других категорий лесных земель по 3 субъектам Российской Федерации. В рамках данной работы рассмотрены планы лесовосстановления по 6 лесным районам таежной зоны (см. таблицу) – от редкостойной тайги и притундровых лесов (Архангельская область) до смешанных лесов (Кировская область), что позволяет получить общую картину применяемых в таежной зоне лесовосстановительных технологий. Проанализированы 1276 проектов искусственного лесовосстановления за 2020 г.: 382 по лесничествам Архангельской области (29,9 %), 659 – Кировской (51,6 %) и 235 – Республики Коми (18,4 %). Среди всех проектов 58,3 % относились к Двинско-Вычегодскому таежному району, 17,7 % – Южно-таежному, 15,8 % – Северо-таежному, 7,3 % – району хвойно-широколиственных (смешанных) лесов, 0,1 % – району притундровых лесов и редкостойной тайги и 0,8 % – Западно-Уральскому таежному району (рис. 1). Общая площадь по рассмотренным проектам лесовосстановления составила 9745,43 га.

По материалам рассмотренных проектов лесовосстановления создана база данных, в которую включены 13 показателей: категория площади лесовосстановления, лесорастительные условия (рельеф, тип почвы, увлажненность почвы, группа типов леса, степень задернения почвы), период проведения обработки почвы, механизмы и агрегаты, применяемые для обработки почвы и посадки семян, тип размещения и вид посадочного материала. Учтено неполное соответствие материалов проектов лесовосстановления действительности (от 1,8 % – по способам обработки до 49,8 % – по характеристике почвенных условий). Большие пропуски материалов относятся к описанию условий место-произрастания.

Распределение площадей лесовосстановления за 2020 г. в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми по лесным районам
Distribution of reforestation areas for 2020 in the Arkhangelska and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, by forest areas

Регион	Лесной район					
	Двинско-Вычегодский таежный	Северо-таежный	Западно-Уральский таежный	Хвойно-широколиственных (смешанных) лесов	Южно-таежный	Притундровых лесов и редкостойной тайги
Архангельская область	$\frac{255}{2681,20}$	$\frac{126}{1444,51}$	–	–	–	$\frac{1}{5,50}$
Кировская область	$\frac{33}{257,70}$	–	–	$\frac{197}{709,61}$	$\frac{429}{1720,20}$	–
Республика Коми	$\frac{217}{2745,88}$	$\frac{8}{100,13}$	$\frac{10}{80,70}$	–	–	–
<i>Всего</i>	$\frac{505}{5684,78}$	$\frac{134}{1544,64}$	$\frac{10}{80,70}$	$\frac{197}{709,61}$	$\frac{429}{1720,20}$	$\frac{1}{5,50}$

Примечание: В числителе – количество проектов, шт.; в знаменателе – площадь, га.



Условные обозначения:

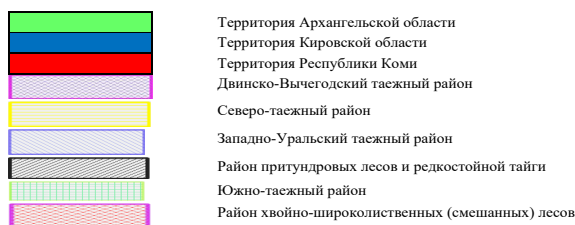


Рис. 1. Расположение лесных районов на территориях Архангельской, Кировской областей и Республики Коми

Fig. 1. Location of forest areas in the territories of the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic

Обработка базы данных дала общую картину состояния проектного менеджмента и применяемых технологий в таежной зоне. Для установления степени соответствия принятых решений и работ на лесокультурных площадях проведена выборочная натурная проверка на 5 % планируемых и созданных объектов в Архангельской области (26 пробных площадей) и Республике Коми (34 пробные площади). Выявлено соответствие проектов лесовосстановления и проводимых мероприятий, что подтверждается результатами проверок лесничеств и актами технической приемки лесных культур согласно действующему законодательству. Также установлена возможность использования материалов проектов лесовосстановления для оценки современного состояния лесокультурного дела в регионах исследования в отношении применяемых технологий и техники, соответствия их категориям и условиям лесокультурного фонда.

Результаты исследования и их обсуждение

Проекты лесовосстановления предусматривают мероприятия на свободных от древостоя площадях: вырубках прошлых лет, бывших сельскохозяйственных угодьях, гарях или пустырях. Преимущественно лесовосстановление проводится на рубках 1–2-летней давности (33,4 и 42,5 % соответственно). В лесокультурный фонд попадают и рубки более старшего возраста: 3-летние – 11,7 %, 4-летние – 3,8 % и 5-летние – 3,7 %. На другие категории земель приходится не более 1 % лесокультурных площадей. Подобное распределение характерно для каждого изученного региона, что позволяет рекомендовать и использовать при составлении проектов лесовосстановления общепринятые лесохозяйственные рекомендации [3, 4, 10, 15].

Применению данных рекомендаций не противоречит и распределение лесокультурных площадей по рельефу, большинство которых представлено равнинными/относительно равнинными участками (85,8 %), не требующими корректировки технологий в связи с перепадами рельефа (низины, склоны и др.). Доля участков с перепадами рельефа, понижениями или возвышенностями, для которых нужно внесение изменений в технологию, составляет около 14,2 %.

Следует отметить, что при разработке проектов искусственного лесовосстановления слабое внимание уделяется почвам, на которых создаются лесные культуры. Так, в 49,8 % случаев в проектах лесовосстановления не указан тип почв, в 34,9 % не отмечена категория их увлажненности, в 13,4 % не упоминается о типе лесорастительных условий. В то же время мировой опыт показывает важность учета почвенных свойств [29], например, при обработке почвы проводятся запланированные нарушения почвенного покрова [20], которые повлияют на его свойства и продуктивность [28] и будут определять успешность лесных культур [9, 12].

По сведениям проектов установлено, что наиболее типичными на лесокультурных площадях являются бедные подзолистые, с разной степенью выраженности процесса оподзоливания (41,8 %) почвы. Более плодородные дерново-подзолистые (2,4 %) и серые лесные почвы (Кировская область, 0,2 %) встречаются небольшими участками. Еще реже отмечаются дерново-глеевые, дерново-карбонатные (менее 1 %), тогда как на торфяные почвы приходится 486,2 га (5,0 % площади). Торфяные почвы связаны с избыточным увлажнением, в таких

условиях для успешности лесных культур необходимо предусматривать обработку почвы, позволяющую отвести лишнюю влагу [11, 17]. И хотя, по данным проектов лесовосстановления, на участках лесокультурного фонда преобладают почвы с оптимальными параметрами (38,3 % свежих), доля влажных (23,1 %) и с избытком влаги (сырые – 1,0 %, периодически переувлажненные – 0,4 %, мокрые – 0,2 %) достаточно велика и требует учета при планировании и разработке рекомендаций производству. Количество площадей с недостатком влаги, отмеченное в проектах (сухие – 1,6 %, периодически сухие – 0,4 %), незначительно.

Тип почвы и ее увлажненность в определенной мере связаны с типом леса, произраставшим до рубки. Чуть больше 1/2 территории, на которой проводились лесовосстановительные работы (рис. 2), до рубки было представлено ельниками (53,6 %), в т. ч. черничными (34,6 %), долгомошными (8,0 %) и кисличными (8,4 %). На сосняки приходилось 29,7 %: 12,0, 5,8 и 4,5 % – соответственно черничные, кисличные и брусничные типы леса. Площади березняков (2,5 %), липняков (0,8 %) и осинников (0,1 %) незначительны.

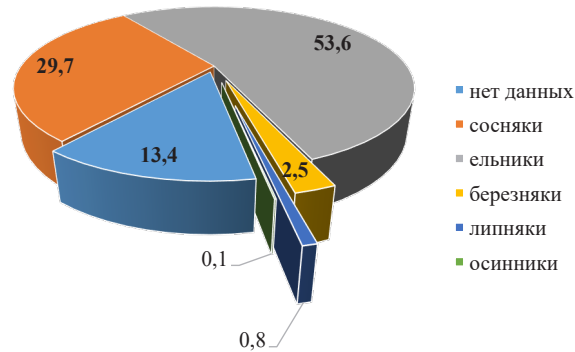


Рис. 2. Распределение площадей лесовосстановления за 2020 г. в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми по преобладающей породе до рубки леса, %

Fig. 2. Distribution of reforestation areas for 2020 in the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, by predominant species before felling, %

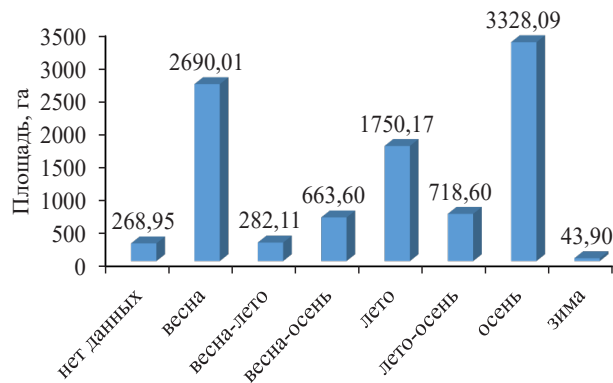
Немаловажным аспектом для процесса лесовосстановления является степень задернения участков, отводимых под создание лесных культур, т. к. высокая трава с густой дерниной будет угнетать сеянцы. На большинстве проектируемых участков преобладает средняя (57,0 % площадей) и слабая степень задернения или отсутствие дернины (36,1 % площадей), что связано с возрастными вырубками. Сильная и умеренная степени задернения отмечены примерно на 3,0 % площадей. Однако при составлении проектов лесовосстановления не всегда (1,2 % проектов) удается правильно отразить степень задернения и ее распространение по лесокультурной площади.

Обработка почвы под лесные культуры проводится в разное время, что связано как с зональностью лесных районов, представленных в исследованиях, так и с готовностью к проведению работ в различных лесорастительных условиях лесокультурных площадей (рис. 3). Чаще работы выполняют весной (27,6 %) и осенью (34,2 %), реже летом (18 %) и зимой (0,5 %).

Традиционной техникой для обработки почвы [13] перед проведением посадочных работ являются трактора с различными плугами (39,4 % площадей). Используются также бульдозеры (7,1 %) и форвардеры (3,5 %). Встречается ручная обработка почвы (0,6 %).

Рис. 3. Распределение площадей лесовосстановления за 2020 г. в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми по периодам проведения обработки почв

Fig. 3. Distribution of reforestation areas for 2020 in the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, by periods of tillage



В последнее время в изучаемых регионах большую популярность приобрело использование для обработки почвы экскаваторов (44,2 %), что является актуальным [1] и позволяет готовить как полосы, борозды, площадки, так и микроповышения. Экскаваторы для обработки почвы, расчистки площадей от порубочных остатков и корчевки пней широко применяют в странах Европы, Северной Америки и др. [19, 23]. При использовании экскаватора для обработки почвы путем создания микроповышений ковшом и посадки семян с ЗКС по микроповышениям отмечается высокая приживаемость (до 95 %). В этом случае максимально сохраняется подрост предварительной генерации [11]. Экскаваторы, учитывая разработку лесосек комплексом современной лесозаготовительной техники, применяют на вырубках большей площади (средняя площадь участка составила 14,1 га), чем при использовании традиционных орудий/плугов в комплексе с тракторами (5,2 га). В современных условиях, когда на местах отсутствует новая специализированная лесная техника для создания лесных культур, внедрение данного метода позволит обеспечить механизацию лесовосстановительных процессов, которая становится все более затрудненной при использовании традиционной лесокультурной техники (плугов и дисковых культиваторов) из-за оставляемых на делянках больших объемов непригодной для продажи неликвидной древесины и порубочных остатков [12]. Кроме того, экскаваторы, в отличие от плугов, позволяют проводить обработку почвы с учетом ландшафтной структуры лесокультурных площадей [14].

К сожалению, в большинстве проектов (46,3 %) нет информации о комплектации используемых агрегатов, применяемых при обработке почвы под лесные культуры. Собранные данные показывают, что чаще всего (36,7 % площадей) с тракторами и бульдозерами используют различные плуги (ПЛ 1 – 23,0 %, ПКЛ 70 – 8,8 %, ПЛМЛ-001Ф – 2,2 %, ПЛ 2 – 0,3 %, ПЛП 135 – 1,3 % и прочие модификации – 1,2 %) и клиновидные толкатели (5 % площадей). Из агрегатов, применяемых на экскаваторах, встречается ковш (8,0 % площадей), на форвардерах – лесные культиваторы разных модификаций (2,8 %). Среди редко используемых агрегатов (менее 2 %) можно назвать отвал, бульдозерную навеску, покровосдиратель, посадочную головку, фрезу без указания конкретной модели.

Применение при обработке почвы перечисленных орудий позволяет варьировать типы посадочных мест (рис. 4). Более 1/2 площадей обработаны под посадку бороздами (52,3 %). На 1/4 (24,8 %) подготовка почвы проведена микроповыше-

ниями, в виде перевернутых пластов, на 13,3 – полосами, на 2,1 % – площадками. Представлена также сплошная (5,7 % площадей) обработка. Следует отметить возможное непонимание лесокультурных терминов, применяемых составителями проектов лесовосстановления, или нечеткое изложение в рекомендациях, что привело к использованию категорий «равномерная», «неравномерная», «в одном направлении», «рядами» и др.

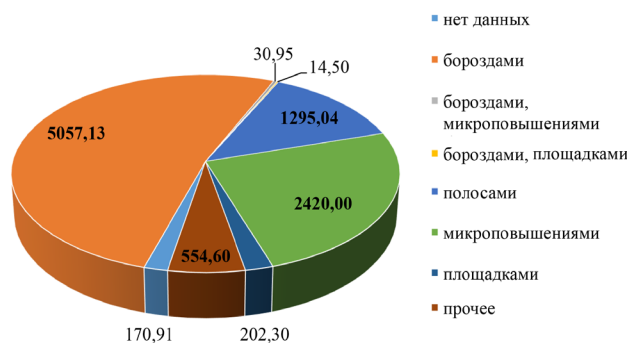


Рис. 4. Распределение площадей лесовосстановления за 2020 г. в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми по типам посадочных мест, га

Fig. 4. Distribution of reforestation areas for 2020 in the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, by types of planting spots, ha

Использование посадочного материала в регионе исследования (рис. 5) регламентируется его выращиванием в лесных питомниках (постоянных и временных) и тепличных комплексах, а также возможностью обеспечения исполнителей работ. На большей части площадей лесовосстановления (55,9 %) предусмотрена посадка семян с ЗКС. Доля площадей с посадкой семян с ОКС составляет 13,9 %. Иногда одновременно применяются семена ЗКС и ОКС (1,2 % площадей) или вид посадочного материала не указан (18,9 % площадей). Посев семян встречается редко (1,4 % площади). В Архангельской и Кировской областях предусмотрен ручной посев, в т. ч. в рядовой, в 2 случаях – строчно-луночный. Кроме того, в Кировской области на 705,2 га для закладки лесокультурной площади использованы саженцы (7,2 % площади), выращенные в собственных питомниках. В рамках внедрения интенсивной модели использования и воспроизводства лесов планируется увеличение доли посадочного материала с ЗКС [7], что обусловлено как рядом преимуществ данного вида посадочного материала, его лучшим ростом в 1-е годы [24], так и принятыми в 2018–2019 гг. нормами по увеличению доли ЗКС при искусственном лесовосстановлении вырубок [5].

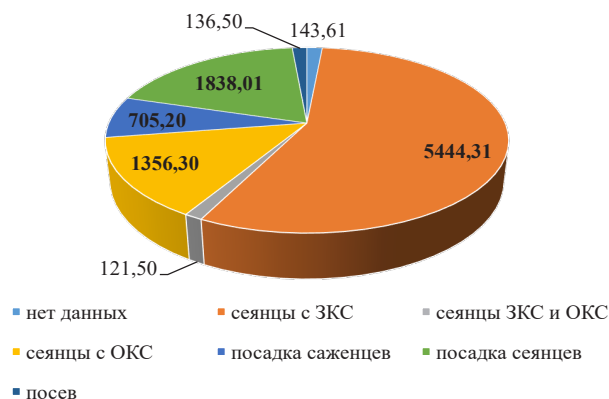


Рис. 5. Распределение площадей лесовосстановления за 2020 г. в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми по способам создания лесных культур и характеристике посадочного материала, га

Fig. 5. Distribution of reforestation areas for 2020 in the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, by the methods of creating forest plantations and characteristics of planting stock, ha

Посадка сеянцев с ЗКС проводится лесопосадочной трубой Pottiputki (42,3 % площадей), сеянцев с ОКС – традиционным российским способом – вручную под меч Колесова (42,2 %), который используют на небольших по площади вырубках. Иногда (0,7 %) планируют применение экскаватора с посадочной головкой. В современных условиях механизированная посадка сеянцев посадочными устройствами (Bracke Planter, M-Planter), установленными на кране гусеничных экскаваторов, требует более высоких капитальных затрат по сравнению с плужной обработкой почвы и ручной посадкой сеянцев. Считается [21], что сеянцы с ЗКС, посаженные механически с помощью современных посадочных устройств, демонстрируют более высокие показатели приживаемости, чем посаженные вручную (посадочными трубами) и более подверженные морозному пучению на мелкозернистых почвах. Также исследования по восстановлению лесов на юге Швеции выявили, что обработка почвы с помощью экскаваторов способствует более интенсивному росту сеянцев [27, 29], особенно сосны на влажных почвах. Тем не менее, чтобы механизированная посадка сеянцев стала конкурентоспособной, машины должны быть достаточно производительными и экономичными [25].

Особое значение при искусственном лесовосстановлении имеет и выращиваемая порода. Чаще в регионах создают 1-породные лесные культуры, преимущественно из ели (50,6 %) и сосны (48,1 %), редко – лиственницы (0,1 % в Кировской области). Совместная посадка ели и сосны предусматривалась на 0,9 % площадей (рис. 6). Соотношение породного состава лесных культур соответствует вырубкеемым типам леса.

Рис. 6. Распределение площадей лесовосстановления за 2020 г. в Архангельской, Кировской областях и Республике Коми по породному составу посадочного/посевного материала, га

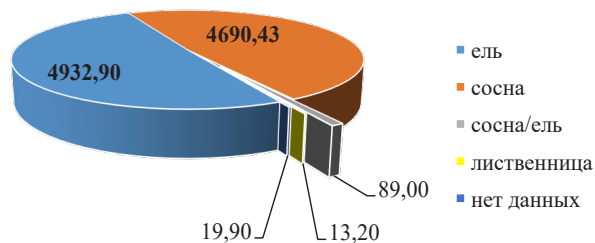


Fig. 6. Distribution of reforestation areas for 2020 in the Arkhangelsk and Kirov Regions, as well as the Komi Republic, by species composition of planting stock/seed grain, ha

Заключение

Приведенные материалы по состоянию лесовосстановления на основе анализа проектного менеджмента позволяют оценить применяемые технологии создания лесных культур в таежной зоне – от поступающих в рубку насаждений с их типологическим разнообразием до используемых технологий обработки почвы и способов создания лесных культур, вида посадочного материала. Анализ проектов лесовосстановления выявил недостатки рассмотренных технологий, т. е. требуется корректировка применяемых рекомендаций, контроль за кадровым составом специалистов, проведение систематического обучения через систему специализированных курсов, дополнительного образования и повышения квалификации.

Особое внимание необходимо уделить используемым в проектах лесовосстановления шкалам и категориям оценки лесорастительных условий, в т. ч. пониманию и отражению в документации почвенных условий, условий увлажнения, задернения. Знание этих условий позволит правильно планировать способы обработки на лесокультурных площадях, подбирать технологию создания лесных культур, вид и породный состав посадочного материала и др.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку экономической эффективности и экологической целесообразности применяемых технологий обработки почвы, различных способов посадки семян, саженцев и посева лесных семян. Требуется шире изучать современные способы обработки почвы и использование современной техники и оборудования, в т. ч. экскаваторов, включить их в научно обоснованные методические рекомендации с доведением до производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алябьев А.Ф. Опыт создания культур ели при дискретной обработке почвы орудием ОДП-0,6 // Лесн. вестн. 2015. № 6. С. 28–33.

Alyab'ev A.F. Experience in Creating Spruce Plantations at the Mounding Machine ODP-0,6. *Lesnoy vestnik*, 2015, no. 6, pp. 28–33. (In Russ.).

2. Бабич Н.А., Корчагов С.А., Кonyushatov О.А., Стребков Н.Н., Лупанова И.Н. Актуальные проблемы лесовосстановления на Европейском Севере России в рамках перехода к интенсивной модели ведения лесного хозяйства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 74–83.

Babich N.A., Korchagov S.A., Konyushatov O.A., Strebkov N.N., Lupanova I.N. Topical Issues of Reforestation in the European North of Russia in the Context of Switching to the Intensive Model of Forest Management. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 2, pp. 74–83. (In Russ.).

3. Бабич Н.А., Сунгуров Р.В., Сунгурова Н.Р. Лесные культуры в северной подзоне тайги: моногр. Архангельск: Соломбал. тип., 2006. 144 с.

Babich N.A., Sungurov R.V., Sungurova N.R. *Forest Crops in the Northern Taiga Subzone: Monograph*. Arkhangelsk, Solombala Printing House, 2006. 144 p. (In Russ.).

4. Беляев В.В. Восстановление лесов Европейского Севера России: Эколого-лесоводственные аспекты / ПГУ им. М.В. Ломоносова. Архангельск: Помор. ун-т, 2011. 325 с.

Belyaev V.V. *Restoration of Forests of the European North of Russia: Ecological and Forestry Aspects*. Arkhangelsk, Pomor State University, 2011. 325 p. (In Russ.).

5. Бобушкина С.В. Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 45–54.

Bobushkina S.V. Efficiency Production Methods of Conifers Ball-Rooted Planting Stock in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-45-54>

6. Варфоломеев Л.А., Сунгуров Р.В. Почвенная экология лесных культур на Севере. Архангельск: СевНИИЛХ, 2007. 292 с.

Varfolomeev L.A., Sungurov R.V. *Soil Ecology of Forest Crops in the North*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry, 2007. 292 p. (In Russ.).

7. Дебков Н.М. Опыт создания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 192–200.

Debkov N.M. Experience in the Creation of Forest Plantations Using Container Seedlings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 5, pp. 192–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-192-200>

8. Калиниченко Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А. Лесовосстановление на вырубках. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Экология, 1991. 384 с.

Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A. *Reforestation in Cuttings*. 2nd edition, revised and expanded. Moscow, Ecology Publ., 1991. 384 p. (In Russ.).

9. Кикеева А.В., Новичонок Е.В., Харитонов В.А., Крышень А.М. Особенности развития корневой системы у саженцев *Picea abies* (L.) Н. Karst. при посадке под пологом древостоя в разных вариантах обработки почвы в ельнике черничном влажном // Тр. КарНЦ РАН. 2022. № 3. С. 28–41.

Kikeeva A.V., Novichonok E.V., Kharitonov V.A., Kryshen' A.M. Features of the Root System Development in *Picea abies* (L.) H. Karst. Seedlings Planted under Shelterwood in a Moist Bilberry Spruce Forest Depending on Soil Preparation Methods. *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*, 2022, no. 3, pp. 28–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eeco1491>

10. Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Теория и практика выращивания сосны и ели в культурах. Архангельск: АГТУ, 2002. 220 с.

Merzlenko M.D., Babich N.A. *Theory and Practice of Growing Pine and Spruce in Crops*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 220 p. (In Russ.).

11. Морозов А.Е., Батулин С.В. Эффективность различных способов лесовосстановления на вырубках Бисерского лесничества Пермского края после применения комплексов многооперационных лесозаготовительных машин // Молодой ученый. 2020. № 24(314). С. 73–76.

Morozov A.E., Baturin S.V. The Effectiveness of Various Methods of Reforestation in the Cuttings of the Bisersky Forestry of the Perm Region after the Use of Complexes of Multi-operational Logging Machines. *Young Scientist*, 2020, no. 24(314), pp. 73–76. (In Russ.).

12. Мочалов В.А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из семян с закрытыми корнями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 4. С. 9–18.

Mochalov V.A. Soil Cultivation and Selection Planting Site Attached to Pine Artificial Stands Creation from Containerized Seedlings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 4, pp. 9–18. (In Russ.).

13. Словарь-справочник таежного лесокulturника / под общ. ред. д-ра с.-х. наук, чл.-корр. РАЕН, проф. Н.А. Бабича. Архангельск, 2001. 264 с.

Dictionary-Reference Book of the Taiga Forest Crop Manager. ed. by Doctor of Agriculture, corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences N.A. Babicha. Arkhangelsk: 2001. 264 p. (In Russ.).

14. Соколов А.И., Харитонов В.А., Кривенко Т.И. Механизация обработки почвы на нераскорчеванных вырубках в условиях Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 100 с.

Sokolov A.I., Haritonov V.A., Krivenko T.I. *Mechanization of Tillage in Non-Uprooted Clearings in the Conditions of Karelia*. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2008. 100 p. (In Russ.).

15. Сунгуров Р.В., Гаевский Н.П., Сунгурова Н.Р. Руководство по проведению лесовосстановительных работ на сплошных вырубках и гарях Северо-таежного и Средне-таежного районов европейской части Российской Федерации в границах Архангельской области. Архангельск: Соломбал. тип., 2016. 36 с.

Sungurov R.V., Gaevskij N.P., Sungurova N.R. *Guidelines for Carrying out Reforestation Works on Continuous Felling and Burning of the North Taiga and Middle Taiga Regions of the European Part of the Russian Federation within the Boundaries of the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, Solombala Printing House, 2016. 36 p.

16. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В. Культуры ели на луговиковой вырубке в северной подзоне тайги // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 11. С. 123–128.
Sungurova N.R., Sungurov R.V. Fir Tree Cultures on Meadow Cutting down Place in the Taiga Northern Subzone. *Bulletin of KrasSAU*, 2012, no. 11, pp. 123–128.
17. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В. Анализ состояния и роста культур сосны и ели в Северо-Тажном районе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 2. С. 70–79.
Sungurova N.R., Sungurov R.V. The Analysis of the Condition and Growth of Pine and Spruce Crops in the North-Taiga District. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 2, pp. 70–79. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.2.70>
18. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В., Гаевский Н.П. Анализ эффективности искусственного лесовосстановления и предложения по его улучшению // Уч. зап. ПетрГУ. 2014. № 8-1(145). С. 71–76.
Sungurova N.R., Sungurov R.V., Gaevskij N.P. Analysis of Artificial Reforestation Efficiency and Suggestions on its Improvement. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2014, no. 8, vol. 1, pp. 71–76.
19. Archuleta J.G., Baxter E.S. Subsoiling Promotes Native Plant Establishment on Compacted Forest Sites. *Native Plants Journal*, 2008, vol. 9(2), pp. 117–122. <https://doi.org/10.2979/NPJ.2008.9.2.117>
20. Cardoso J.C., Burton P.J., Elkin C.M. A Disturbance Ecology Perspective on Silvicultural Site Preparation. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 12, pp. 1–12. <https://doi.org/10.3390/f11121278>
21. Chantal de M., Rita H., Bergsten U., Löfvenius M.O., Grip H. Frost Heaving of *Picea abies* Seedlings as Influenced by Soil Preparation, Planting Technique, and Location along Gap-Shelterwood Gradients. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43(1), pp. 39–50.
22. Duan J., Abduwali D. Basic Theory and Methods of Afforestation. *Silviculture. IntechOpen*, 2021. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.96164>
23. Hall P. Mechanical Site Preparation using Excavators. *N.Z. FORESTRY*, 1995, pp. 31–35.
24. Jäärats A., Tullus A. The Effect of Planting Stock and Soil Scarification on Forest Regeneration. *Forestry Studies*, 2018, vol. 69, iss. 1, pp. 75–85. <https://doi.org/10.2478/fsmu-2018-0013>
25. Laine T., Rantala J. Mechanized Tree Planting with an Excavator Mounted M-Planter Planting Device. *International Journal of Forest Engineering*, 2013, vol. 24, no. 3, pp. 183–193. <https://doi.org/10.1080/14942119.2013.844884>
26. Mc Carthy R., Rytter L., Hjelm K. Effects of Soil Preparation Methods and Plant Types on the Establishment of Poplars on Forest Land. *Annals of Forest Science* 2017, vol. 74, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0647-9>
27. Örlander G., Gemmel P., Wilhelmsson C. Effects of Scarification, Planting Depth and Planting Spot on Seedling Establishment in a Low Humidity Area in Southern Sweden. Report 33. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skogsskötsel, 1991. 92 p.
28. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, 2013. 217 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4_2
29. Saksa T., Heiskanen J., Miina J., Tuomola J., Kolstrom T. Multilevel Modelling of Height Growth in Young Norway Spruce Plantations in Southern Finland. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 143–153. <https://doi.org/10.14214/sf.403>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 58.006:581.47:581.48:581.141

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-65-76

Репродуктивные показатели липы Нащокина (*Tilia nasczokinii* Stepanov)

М.И. Седаева[✉], канд. биол. наук; ResearcherID: [AAU-9766-2021](https://orcid.org/0000-0002-4089-1691),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-1691>

А.К. Экарт, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAU-9738-2021](https://orcid.org/0000-0002-8106-596X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8106-596X>

А.Н. Кравченко, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAU-9783-2021](https://orcid.org/0000-0002-4436-7942),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4436-7942>

Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; msedaeva@ksc.krasn.ru[✉], aekart@yandex.ru, kravchenko-anna.n@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.11.21 / Одобрена после рецензирования 25.02.22 / Принята к печати 27.02.22

Аннотация. *Tilia nasczokinii* Stepanov (липа Нащокина) – эндемик юга Красноярского края, имеет реликтовое происхождение. Известно о 2 ее популяциях в окрестностях г. Красноярска на левом и на правом берегах р. Енисей, где она входит в состав сосняков и смешанных сосново-лиственных разнотравных лесов. Общая численность вида составляет около 500 особей, из которых лишь 43 растения в настоящее время плодоносят. В работе определены размеры и качественные показатели плодов и семян этого вида. Плоды-орешки *T. nasczokinii* в целом для 2 популяций имели длину $5,7 \pm 0,026$ мм и ширину $5,0 \pm 0,017$ мм, семена – длину $3,6 \pm 0,019$ мм и ширину $2,9 \pm 0,015$ мм. Установлено, что орешки в левобережной популяции характеризуются вытянутой грушевидной формой, тогда как в правобережной орешки шаровидные, слегка заостренные сверху. По размерам орешков и семян *T. nasczokinii* статистически не отличалась от интродуцированной *T. cordata*, произрастающей в культуре в сходных экологических условиях. В левобережной популяции массы орешков ($18,3$ г/1000 шт.) и семян ($11,9$ – $12,7$ г/1000 шт.) оказались заметно меньше, чем в правобережной (орешки – $24,8$ – $29,9$ г/1000 шт., семена – $16,1$ – $18,0$ г/1000 шт.). В левобережной популяции до 60 % орешков были бессемянными и до 43 % семян – пустыми, жизнеспособность семян составляла 17–32 %. В правобережной популяции большая часть орешков содержала семена (до 91 %), доля пустых орешков была небольшой (до 18 %), жизнеспособность – 66–83 %. Грунтовая всхожесть семян составила 9,2 % (у отдельных деревьев – до 10,5 %) в левобережной и 12,2 % (до 21,1 %) в правобережной популяции. Несмотря на невысокую грунтовую всхожесть семян в обеих популяциях, существует возможность получения семенного посадочного материала для создания искусственных насаждений *T. nasczokinii* с целью сохранения и восстановления численности этого редкого реликтового вида юга Средней Сибири.

Ключевые слова: *Tilia nasczokinii*, морфометрия плодов, морфометрия семян, жизнеспособность семян, грунтовая всхожесть, Красноярский край

Благодарности: Работа выполнена в рамках базового проекта Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН № 0287-2021-0009, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта

№ 19-44-240006 р_а. Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Сибирского федерального университета Н.В. Степанову, научным сотрудникам национального парка «Красноярские Столбы» А.А. Кнорре и Д.Ю. Полянковой, а также научным сотрудникам Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН М.Е. Коноваловой и Л.В. Кривобокову за предоставление информации о местонахождении популяций липы и помощь при геоботаническом описании пробных площадей.

Для цитирования: Седаева М.И., Экарт А.К., Кравченко А.Н. Репродуктивные показатели липы Нащокина (*Tilia nasczokinii* Stepanov) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 65–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-65-76>

Original article

Reproductive Indicators of Nasczokin's Lime (*Tilia nasczokinii* Stepanov)

Mariya I. Sedaeva[✉], Candidate of Biology; ResearcherID: [AAU-9766-2021](https://orcid.org/0000-0002-4089-1691),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-1691>

Aleksandr K. Ekart, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAU-9738-2021](https://orcid.org/0000-0002-8106-596X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8106-596X>

Anna N. Kravchenko, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAU-9783-2021](https://orcid.org/0000-0002-4436-7942),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4436-7942>

Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; msedaeva@ksc.krasn.ru[✉], aekart@yandex.ru, kravchenko-anna.n@yandex.ru

Received on November 21, 2021 / Approved after reviewing on February 25, 2022 / Accepted on February 27, 2022

Abstract. *Tilia nasczokinii* Stepanov (Nasczokin's lime) is endemic to the south of the Krasnoyarsk Territory and is of relict origin. Two of its populations grow in the vicinity of Krasnoyarsk on the left and right banks of the Yenisey River, being a part of pine forests and mixed pine-deciduous herb forests. The total number of the species is about 500 plant units, of which only 43 plants are currently bearing fruit. This research has determined the sizes and qualitative characteristics of *T. nasczokinii* fruits and seeds. The lime-capsules of *T. nasczokinii*, for 2 populations in general, have had the length of 5.7 ± 0.026 mm and the width of 5.0 ± 0.017 mm. The seeds have had the length of 3.6 ± 0.019 mm and the width of 2.9 ± 0.015 mm. It has been established that the lime-capsules in the left bank population are characterized by an elongated pear-shaped form, while in the right bank population the lime-capsules are spherical and slightly pointed at the top. In terms of the size of lime-capsules and seeds, *T. nasczokinii* did not differ statistically from the introduced *T. cordata*, which grows in the plantation under similar environmental conditions. In the left bank population, the masses of lime-capsules (18.3 g/1000 pcs.) and seeds (11.9–12.7 g/1000 pcs.) have turned out to be noticeably less than in the right bank population (lime-capsules – 24.8–29.9 g/1000 pcs., seeds – 16.1–18.0 g/1000 pcs.). In the left bank population, up to 60 % of the lime-capsules have been seedless and up to 43 % of the seeds have been empty. Seed viability has been equal to 17–32 %. In the right bank population, most of the lime-capsules have contained seeds (up to 91 %), and the proportion of empty lime-capsules has been small (up to 18 %). Seed viability has been equal to 66–83 %. Field germination of the seeds has been equal to 9.2 % (for some trees – up to 10.5 %) in the left bank population and 12.2 % (up to 21.1 %) in the right bank population. Despite the low field germination of the seeds in both populations, it is possible to obtain seed planting stock for creating artificial plantings of *T. nasczokinii* in order to preserve and restore the population of this rare relict species in the south of Central Siberia.



Keywords: *Tilia nasczokinii*, fruit morphometry, seed morphometry, seed viability, field germination, the Krasnoyarsk Territory

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the basic project of the Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” no. 0287-2021-0009 and with the financial support from the Government of the Krasnoyarsk Territory and the Krasnoyarsk Regional Fund of Science and Technology Support within the framework of the research project no. 19-44-240006 p_a. The authors express their sincere gratitude to N.V. Stepanov – professor of the Siberian Federal University, A.A. Knorre and D.Yu. Polyanskaya – research scientists of the Krasnoyarsk Stolby National Park, as well as to M.E. Konovalova and L.V. Krivobokov – research scientists of Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS for providing information on the location of lime populations and assistance in the geobotanical description of sample plots.

For citation: Sedaeva M.I., Ekart A.K., Kravchenko A.N. Reproductive Indicators of Nasczokin’s Lime (*Tilia nasczokinii* Stepanov). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-65-76>

Введение

Для Средней Сибири характерно отсутствие зоны широколиственных лесов. В доледниковый третичный период широколиственные древесные породы распространялись непрерывным поясом от Урала до Забайкалья и Приморского края [3, 22, 25]. В настоящее время из широколиственных видов в Сибири встречается только липа, сплошной ареал которой доходит до р. Иртыш [5]. Далее она произрастает изолированными участками в Новосибирской, Кемеровской и Томской областях, а также в Алтайском и Красноярском краях [1, 6, 19]. Эти участки, являясь остатками некогда обширного ареала, имеют реликтовую природу [12, 27].

Таксономический статус изолированных популяций *Tilia* в Сибири не общепризнан [30]. Ряд авторов считает их отдельным видом – *T. sibirica* Bayer [23]. Другие авторы объединяют сибирскую липу с *T. cordata* Mill. [5] либо относят все восточные популяции липы к подвиду *T. cordata subsp. sibirica* (Fischer ex Bayer) Pigott [28]. Красноярские популяции липы описаны как самостоятельный вид *T. nasczokinii* Stepanov [18]. Исследование изменчивости хлоропластной ДНК показало сохранение липы в нескольких рефугиумах на востоке ареала *Tilia cordata* s. l. во время последних ледниковых периодов [17, 29]. Значительная генетическая дифференциация красноярских популяций как от *T. sibirica*, так и от *T. cordata* позволяет рассматривать *T. nasczokinii* как отдельный таксон [17, 24].

В Красноярском крае известно 2 места произрастания липы – на правом и левом берегах р. Енисей в окрестностях г. Красноярска [2, 13]. Отмечалось, что липа под Красноярском представляла собой нецветущую вегетативную поросль. Позже здесь были обнаружены цветущие и плодоносящие экземпляры [2]. Однако данные о морфометрических и качественных показателях плодов и семян красноярских лип до сих пор отсутствуют в литературе. Ранее установлено, что общая численность обеих популяций *T. nasczokinii* невелика – на левом берегу Енисея произрастают 305 особей, 21 из которых находится в генеративном состоянии, и на правом берегу – 196 особей, из них 22 экземпляра – генеративные [15]. Предварительное изучение этих популяций показало наличие жизнеспособных семян [14].

Поскольку для поддержания генетического разнообразия малочисленных популяций важно наличие семенного потомства, актуальной является цель настоящего исследования – оценка морфометрических и качественных показателей плодов и семян *T. naszokinii* в 2 реликтовых популяциях в окрестностях Красноярска.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали 2 малочисленные изолированные популяции *T. naszokinii* в окрестностях Красноярска. Первая популяция находится на правом берегу Енисея около пос. Базаиха на территории охранной зоны национального парка «Красноярские Столбы» (55°57'26" с. ш. 92°46'41" в. д.). Деревья липы произрастают близко друг к другу на площади около 1,5 га. Липа Нащокина входит в состав сосняка осочково-крупнотравного сомкнутостью 0,65, высотой 12–17 м [15]. Кроме *Pinus sylvestris* L. и *T. naszokinii* встречаются *Betula pendula* Roth, *Populus tremula* L. Подлесок разреженный, представлен *Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt, *T. naszokinii*, *Caragana arborescens* Lam., *Spiraea chamaedryfolia* L., *Crataegus sanguinea* Pall., *Rosa acicularis* Lindl., *Rubus idaeus* L. Травяно-кустарничковый ярус имеет проективное покрытие 50 %. Его фон создают *Carex macroura* Meinsh., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn и *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv., присутствуют также *Rubus saxatilis* L., *Lathyrus frolovii* Rupr. и *Iris ruthenica* Ker Gawl.

Вторая популяция находится на левом берегу Енисея на территории микрозаказника «Манское займище». Липа здесь произрастает на склоне хребта между ручьем Боровой и р. Минжоль (левые притоки Енисея) и на прилегающей надпойменной террасе – Манском займище (от 55°57'34" с. ш. 92°28'07" в. д. до 55°57'51" с. ш. 92°30'10" в. д.). Деревья расположены отдельными группами по 1–11 взрослых особей. Расстояние между группами достигает 500 м. Липа Нащокина произрастает в сосняке осочково-мелкотравном и сосново-березовом осочково-разнотравном лесу [15]. Древостой высотой 14–24 м имеет сомкнутость 0,5–0,6, состоит из *P. sylvestris*, *B. pendula*, *Larix sibirica* Ledeb., *P. tremula* и *T. naszokinii*. Подлесок разреженный, в него входят *Sorbus sibirica* Hedl., *T. naszokinii*, *R. acicularis*, *C. melanocarpus*, *Spiraea media* Franz Schmidt, *S. chamaedryfolia* и *Padus avium* Mill. Травяной ярус включает *C. macroura*, *I. ruthenica*, *Pyrola rotundifolia* L., *Equisetum pratense* Ehrh., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Viola uniflora* L., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv., проективное покрытие – 35–45 %.

Для сравнения использовались деревья *T. cordata*, интродуцированные в сходные условия дендрария Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в окрестностях Красноярска (38 км к северу от города). Эти деревья возрастом 55 лет выращены из семян, полученных из Москвы (Главный ботанический сад).

В обеих популяциях в период полного созревания в сентябре 2019 и 2020 гг. были собраны образцы плодов-орешков *T. naszokinii*. Сбор производился вручную со всех деревьев, крона которых расположена достаточно низко или наклонена (у высоких прямостоячих деревьев сбор плодов был технически невозможен

без причинения вреда дереву). В левобережной популяции с 6 деревьев в 2019 г. собрано 712 орешков, из которых получено 338 семян; с этих же деревьев в 2020 г. собрано 747 орешков (416 семян). В правобережной популяции с 5 деревьев в 2019 г. – 339 орешков (338 семян), с 4 деревьев в 2020 г. – 463 орешка (454 семени). С 5 деревьев *T. cordata* в 2020 г. – 500 орешков (434 семени).

Длина и ширина орешков и семян определялись с помощью бинокля «Микромед МС-1» (Китай) с программным обеспечением Scope Photo. Изменчивость признаков оценивалась по эмпирической шкале, основанной на значении коэффициента вариации [9]. Коэффициент вариации менее 8 % соответствовал очень низкому уровню варьирования признака, от 8 до 13 % – низкому, от 13 до 20 % – среднему. Достоверность различий средних значений определялась при помощи t-теста ($t_{\text{табл}} \leq 1,96$, при $p = 0,05$) путем сравнения фактического значения t с табличным.

Для каждого дерева и для насаждения в целом была установлена масса собранных образцов орешков и семян на лабораторных весах Adventurer (Ohaus, США), полученные значения пересчитывались на 1000 шт. Отмечалось число бессемянных, а также 1-семянных и 2-семянных орешков. Пустые семена выявлялись методом взрезывания. Для этого семена замачивались в воде на сутки при комнатной температуре, затем удалялась семенная оболочка. Жизнеспособность семян определялась методом окрашивания освобожденных от оболочек и эндосперма зародышей в 0,25%-м растворе МТТ (тиазолил синий тетразолия бромид) в течение 1 ч. Этот метод основан на взаимодействии тетразолиевого красителя с живыми клетками зародыша, в результате чего они приобретают пурпурный цвет. С мертвыми клетками реакции не происходит, и зародыши остаются неокрашенными [10].

Для оценки грунтовой всхожести сразу после сбора, когда околоплодник еще зеленоватого цвета, а палисадный слой семенной кожуры не уплотнен и водопроницаем, был произведен посев орешков. При этих условиях всходы липы появляются на следующую весну [11, 16]. С каждого дерева в сентябре 2020 г. было посеяно по 100 орешков; если собранных образцов было меньше 100 шт., то высевались все орешки (от 16 до 52 шт.). Подсчет всходов проводился в июне 2021 г. В дальнейшем с учетом доли бессемянных и 2-семянных орешков для каждого дерева устанавливалось число посеянных семян, от которого и определялась грунтовая всхожесть.

Результаты исследования и обсуждение

Морфометрический анализ показал, что в среднем и в 2019, и в 2020 гг. длина и ширина орешков и семян в обеих популяциях были довольно близки (табл. 1). Данные признаки варьировали на низком и среднем уровнях – коэффициенты вариации не превышали 20 %. Значение отношения средней длины к средней ширине у орешков и семян в оба года наблюдений оказалось больше в левобережной популяции, чем в правобережной. Однако у *T. cordata* в дендрарии Института леса это отношение превышало отношение для *T. nasczokii* в обеих популяциях.

Таблица 1

Морфометрические показатели орешков и семян *T. nasczokinii* (берега Енисея) и *T. cordata* (дендрарий)
Morphometric parameters of *T. nasczokinii* (the Yenisey River bank) and *T. cordata* (the arboretum) lime-capsules and seeds

Место произрастания	Орешки			Семена		
	длина, мм	ширина, мм	О	длина, мм	ширина, мм	О
<i>2019 г.</i>						
Левый берег Енисея	5,89±0,03	4,97±0,02	1,19	3,74±0,03	2,77±0,03	1,35
	4,00–8,00	4,00–7,50		2,00–5,00	1,50–4,00	
	15,6	10,7		12,8	15,8	
Правый берег Енисея	5,32±0,03	4,96±0,04	1,07	3,52±0,02	2,96±0,01	1,19
	4,00–7,00	3,50–7,50		2,50–4,00	1,50–4,00	
	10,2	12,8		12,3	8,7	
<i>2020 г.</i>						
Левый берег Енисея	6,08±0,04	4,99±0,03	1,22	3,98±0,03	3,12±0,02	1,28
	3,00–9,00	2,50–8,00		2,50–5,00	1,90–4,00	
	19,4	14,7		12,5	13,8	
Правый берег Енисея	6,02±0,04	5,22±0,03	1,15	3,91±0,02	3,25±0,02	1,21
	4,00–8,50	3,50–7,50		2,40–5,00	1,60–4,20	
	13,4	13,0		10,1	12,2	
Дендрарий	5,68±0,06	4,37±0,04	1,30	3,98±0,01	2,98±0,03	1,34
	4,50–7,00	3,50–5,50		3,50–4,00	2,50–3,50	
	9,6	9,3		2,3	5,4	

Примечание: В верхней части строки приведены средние значения и их ошибки, в средней – крайние значения, в нижней – коэффициент вариации; показатель точности опыта во всех случаях не превышает 5 %; О – отношение длины к ширине.

В 2019 г. средняя длина орешков в левобережной популяции была достоверно больше, чем в правобережной ($t = 12,6$), ширина отличалась несущественно ($t = 0,1$). В 2020 г. средняя ширина орешков на правом берегу Енисея достоверно превышала показатель для левого ($t = 5,6$), длина отличалась незначительно ($t = 0,9$). В оба года исследования длина семян в левобережной популяции достоверно больше ($t = 6,0$ в 2019 г. и $t = 2,3$ в 2020 г.), а ширина достоверно меньше по сравнению с правобережной ($t = 6,8$ в 2019 г. и $t = 4,5$ в 2020 г.). Эти данные свидетельствуют о более вытянутой форме орешков и семян *T. nasczokinii* в левобережной популяции, чем в правобережной.

Следует также отметить, что орешки у отдельных деревьев липы на левом берегу Енисея имеют хорошо заметный остроконечный выступ в верхней части, тогда как орешки на правом берегу либо шаровидные, либо слегка заострены сверху (рис. 1). Ранее указывалось [2], что у красноярской липы форма орешков шаровидная, несколько приплюснутая, это, по мнению авторов, отличает ее от *T. sibirica* и *T. cordata*, для которых характерна грушевидная форма орешков.

Наши наблюдения показывают, что шаровидная форма орешков свойственна только для правобережной популяции липы. В левобережной популяции форма орешков близка к грушевидной. В связи с этим данный признак нельзя считать диагностическим для *T. nasczokinii*.

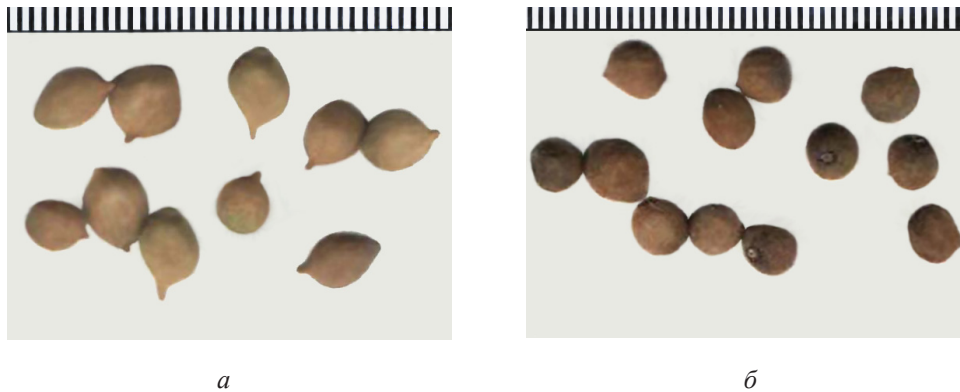


Рис. 1. Орешки *T. nasczokinii* в левобережной (а) и правобережной популяциях (б)
Fig. 1. *T. nasczokinii* lime-capsules in the left bank (a) and the right bank (b) populations

Размеры орешков и семян у *T. cordata* и *T. nasczokinii* близки. Так, в лесостепных районах Западной Сибири размеры орешков *T. cordata* составляют 5–7 мм в длину и 4–4,5 мм в ширину, а семян – 5 мм в длину и 4 мм в ширину [20]. Также близки к ним размеры орешков и семян *T. cordata*, произрастающей в дендрарии Института леса (табл. 1), они варьировали на очень низком уровне и не имели достоверных отличий от семян *T. nasczokinii*.

Масса орешков в пересчете на 1000 шт. в правобережной популяции составляла в целом для насаждения 29,9 и 24,8 г в 2019 и 2020 гг. соответственно. Масса 1000 семян в данной популяции была 18,0 и 16,1 г в 2019 и 2020 гг. соответственно. В левобережной популяции эти показатели заметно меньше – 18,3 и 18,3 г в 2019 и 2020 г. для орешков соответственно; 12,7 и 11,9 г в 2019 и 2020 г. для семян соответственно. Однако в обеих популяциях встречаются деревья с близкими значениями массы орешков и семян (рис. 2). В Западной Сибири в лесостепных районах для липы приводится масса 1000 орешков 25,9 г и 1000 семян 17,1 г [20]. По этому показателю к западносибирской липе близка правобережная популяция окрестностей Красноярска.

Различия по массе связаны с количеством семян в 1 орешке. В левобережной популяции бессемянных орешков было намного больше, чем в правобережной (табл. 2). В популяциях *T. nasczokinii* кроме 1-семянных образуются 2-семянные орешки, большее количество семян в 1 орешке не отмечалось. На правом берегу количество 2-семянных орешков немного превышало их количество на левом. Преобладание 1-семянных орешков характерно и для других видов *Tilia*. Так, в Западной Сибири плоды *T. cordata* содержат 1–2 и редко 3 семени [20]. В искусственных насаждениях *T. sibirica* в г. Новосибирске образуются в основном 1-семянные орешки, доля многосемянных составляет лишь от 0,9 до 1,3 % [7].

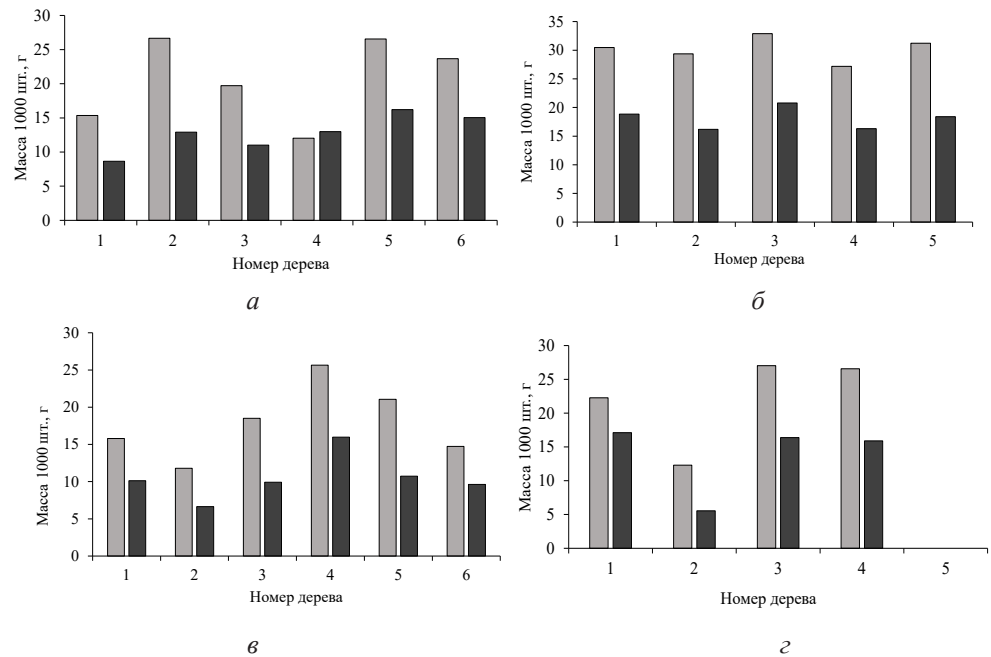


Рис. 2. Масса 1000 орешков (серые столбцы) и 1000 семян (черные столбцы) *T. nasczokinii* на левом (а, в) и правом (б, з) берегах Енисея в 2019 (а, б) и 2020 (в, з) гг.

Fig. 2. Mass of 1000 *T. nasczokinii* lime-capsules (grey columns) and 1000 seeds (black columns) on the left (а, в) and right (б, з) Yenisey River banks in 2019 (а, б) and in 2020 (в, з)

Таблица 2

Распределение орешков *T. nasczokinii*, произрастающей на берегу Енисея, по количеству семян
Distribution of the lime-capsules of *T. nasczokinii* growing on the Yenisey River bank by the number of seeds

Берег Енисея	Доля орешков, %		
	1-семянных	2-семянных	бессемянных
<i>2019 г.</i>			
Левый	39	1	60
Правый	83	8	9
<i>2020 г.</i>			
Левый	46	5	49
Правый	63	8	29

В левобережной популяции зафиксирована довольно большая доля пустых семян – 31 % в 2019 г. и 43 % в 2020 г. В правобережной популяции пустых семян было значительно меньше – 1 % в 2019 г. и 18 % в 2020 г. Жизнеспособность семян в левобережной популяции в целом оказалась невелика и составляла 17 % в 2019 г. и 32 % в 2020 г. В правобережной популяции этот показатель высокий – 83 % в 2019 г. и 66 % в 2020 г. В условиях культуры в Новосибирске и пос. Краснообск для *T. sibirica* характерна высокая жизнеспособность семян – 65,3 и 90,4 % соответственно [7]. По-видимому, условия произрастания липы в

правобережной популяции более благоприятны для репродуктивной сферы, чем в левобережной. Также возможной причиной повышенной доли бессемянных орешков и сниженной жизнеспособности семян является недоопыление цветков в левобережной популяции, поскольку генеративные особи находятся на достаточно большом расстоянии. Внутри групп, где есть от 3 до 7 плодоносящих деревьев, отмечены особи с жизнеспособностью семян до 54 % (рис. 3).

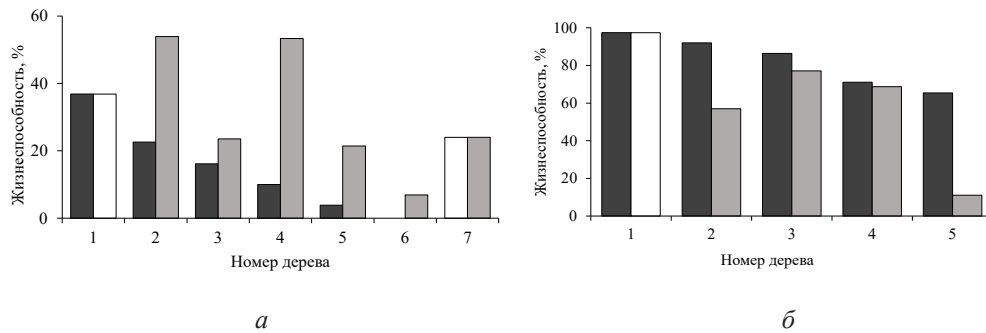


Рис. 3. Жизнеспособность семян *T. nasczokinii* в 2019 (черные столбцы) и 2020 (серые столбцы) гг. на левом (а) и правом (б) берегах Енисея. Для неокрашенных столбцов данные отсутствуют

Fig. 3. Viability of *T. nasczokinii* seeds in 2019 (black columns) and in 2020 (grey columns) on the left (a) and right (b) Yenisey River banks. The data are not available for white columns

Известно, что для липы мелколистной характерно относительно низкое качество семян. Так, в отдельные годы в разных частях ареала от 30 до 100 % ее плодов были бессемянными, почти 2/3 семян оказывались пустыми, а грунтовая всхожесть не превышала 30–40 % [21, 26]. С низким качеством семян у липы сибирской, скорее всего, связано то, что в Кемеровской области в естественных насаждениях крайне мало всходов либо они отсутствуют [4, 8]. Грунтовая всхожесть семян липы Нащокина также была невелика. В целом в левобережной популяции она составила 9,2 % (у отдельных деревьев – от 0 до 10,5 %), а в правобережной – 12,2 % (от 0 до 21,2 %).

Заключение

Исследование плодов и семян *Tilia nasczokinii* в 2 реликтовых популяциях на левом и на правом берегах Енисея в окрестностях г. Красноярска показало, что в левобережной популяции ее орешки и семена более вытянутые, чем в правобережной. Форма орешков в левобережной популяции близка к грушевидной, тогда как в правобережной орешки шаровидные, слегка заостренные сверху. По размерам орешков и семян *T. nasczokinii* статистически не отличалась от *T. cordata*, произрастающей в сходных условиях. Левобережная популяция характеризовалась большей долей бессемянных орешков и низким качеством семян. Условия в правобережной популяции более благоприятны для репродуктивной сферы – большая часть орешков содержала жизнеспособные семена. Несмотря на то, что грунтовая всхожесть семян в обеих популяциях оказалась небольшой, существует возможность получения семенного посадочного материала для создания искусственных насаждений *T. nasczokinii* с целью сохранения и восстановления численности этого редкого реликтового вида юга Средней Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Амелин И.И., Бляхарчук Т.А. Распространение липы сибирской (*Tilia sibirica* Bayer) в Кемеровской области // Вестн. ТГУ. Сер.: Биология. 2016. № 2(34). С. 30–52.
Amelin I.I., Blyakharchuk T.A. Distribution of Siberian Linden (*Tilia sibirica* Bayer) in Kemerovo Oblast. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologia* = Tomsk State University Journal of Biology, 2016, no. 2(34), pp. 30–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/34/3>
2. Буторина Т.Н., Нащокин В.Д. Липа сибирская в заповеднике «Столбы» // Тр. государственного заповедника «Столбы». Вып. II. Красноярск, 1958. С. 152–167.
Butorina T.N., Nasczokin V.D. Siberian Lime in the “Stolby” State Reserve. *Trudy Gosudarstvennogo zapovednika “Stolby”* = Transactions of the “Stolby” State Reserve, 1958, iss. II, pp. 152–167. (In Russ.).
3. Гитерман Р.Е., Голубева Л.В., Заклинская Е.Д., Корнеева Е.В., Матвеева О.В., Скиба Л.А. Основные этапы развития растительности Северной Азии в антропогене. М.: Наука, 1968. 271 с. (Труды АН СССР. Геол. ин-т; вып. 177).
Giterman R.E., Golubeva L.V., Zaklinskaya E.D., Koreneva E.V., Matveeva O.V., Skiba L.A. The Main Development Stages of the Vegetation of North Asia in Antropogen. *Trudy Geologicheskogo Instituta AN SSSR* = Transactions of Geological Institute AS USSR, 1968, iss. 177. 271 p. (In Russ.).
4. Егоров В.Н. Экологические условия возобновления липы сибирской в Горной Шории: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Кемерово, 2007. 18 с.
Yegorov V.N. *Ecological Conditions of Siberian Lime Regeneration in Gornaya Shoria*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Kemerovo, 2007. 18 p. (In Russ.).
5. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: СО РАН, Фил. «Гео», 2012. 706 с.
Koropachinsky I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of the Asian Part of Russia*. Novosibirsk, SB RAS Publ., “Geo” Branch, 2012. 706 p. (In Russ.).
6. Красная книга Алтайского края. Т. 1. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / науч. ред.: А.И. Шмаков, М.М. Силантьева. Барнаул: Алтайск. ун-т, 2016. 290 с.
The Red Book of the Altai Territory. Vol. 1. Rare and Endangered Species of Plants and Fungi. Barnaul, Altai State University Publ., 2016. 290 p. (In Russ.).
7. Кузьмина Т.В., Тараканов В.В. Жизнеспособность семян липы мелколистной в искусственных насаждениях юга Западной Сибири // Гео-Сибирь. 2011. Т. 3, № 2. С. 224–226.
Kuzmina T.V., Tarakanov V.V. Small-Leaved Lime Seeds Vitality in Artificial Plantations of the South of West Siberia. *Geo-Sibir* = Geo-Siberia, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 224–226. (In Russ.).
8. Куприянов А.Н., Куприянов О.А., Романова Н.Г. Условия появления всходов липы сибирской (*Tilia sibirica* Bayer) в естественных насаждениях // Проблемы регион. экологии. 2015. № 1. С. 24–27.
Kupriyanov A.N., Kupriyanov O.A., Romanova N.G. The Conditions for the Emergence of *Tilia sibirica* Bayer in Natural Stands. *Problemy regionalnoy ekologii* = Regional Environmental Issues, 2015, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.).
9. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
Mamaev S.A. *Intraspecific Variability Forms of Woody Plants (by the Example of the Family Pinaceae)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p. (In Russ.).
10. Некрасов В.И. Основы семеноведения древесных растений при интродукции. М.: Наука, 1973. 279 с.
Nekrasov V.I. *The Essentials of Woody Plants Seed Science at Introduction*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 279 p. (In Russ.).

11. Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. 348 с.

Nikolaeva M.G., Rasumova M.V., Gladkova V.N. *Reference Book on Dormant Seed Germination*. Leningrad, Nauka Publ., Leningrad Branch, 1985, 348 p. (In Russ.).

12. Положий А.В., Крапивкина Э.Д. Реликты третичных широколиственных лесов во флоре Сибири. Томск: Томск. ун-т, 1985. 155 с.

Polozhii A.V., Kravivkina E.D. *Relicts of Tertiary Broad-Leaved Forests in the Siberian Flora*. Tomsk, Tomsk University Publ., 1985. 155 p. (In Russ.).

13. Полянская Д.Ю., Андреева Е.Б., Гончарова Н.В. Мониторинг *Tilia nasczokinii* Степанов в заповеднике Столбы // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. Вып. 6. Новосибирск: СО РАН, 2016. С. 46–49.

Polyanskaya D.Yu., Andreyeva Ye.B., Goncharova N.V. Monitoring of *Tilia nasczokinii* Stepanov in Stolby National Park. *Nauchnye issledovaniya v zapovednikakh i natsional'nykh parkakh yuzhnoy Sibiri* = Scientific Research in Reserves and National Parks of South Siberia. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2016, iss. 6, pp. 46–49. (In Russ.).

14. Седяева М.И., Экарт А.К., Кравченко А.Н. Характеристика семян *Tilia* в естественных популяциях в окрестностях города Красноярска // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений: материалы XXIII Междунар. науч. конф., Красноярск, 23 апр. 2020 г. / СибГУ им. М.Ф. Решетнёва. Красноярск, 2020. С. 113–116.

Sedaeva M.I., Ekart A.K., Kravchenko A.N. *Tilia* Seeds Characteristic in Nature Populations near Krasnoyarsk. *Gardening, Seed Growing, Introduction of Woody Plants: Materials of the XXIII Intern. Scient. Conf.*, Krasnoyarsk, Reshetnev University Publ., 2020, pp. 113–116. (In Russ.).

15. Седяева М.И., Экарт А.К., Степанов Н.В., Кривобоков Л.В., Кравченко А.Н. Состояние реликтовых популяций *Tilia nasczokinii* Степанов (Tiliaceae) // Флора и растительность Сибири и Дальнего Востока: материалы VII Всерос. конф. с междунар. участием, Красноярск, 25–26 нояб. 2021 г. Красноярск: Краснояр. гос. пед. ун-т, 2022. С. 136–140.

Sedaeva M.I., Ekart A.K., Krivobokov L.V., Stepanov N.V., Kravchenko A.N. Characteristic of *Tilia nasczokinii* Stepanov (Tiliaceae) Relict Populations near Krasnoyarsk. *Flora and Vegetation of Siberia and Far East. Readings in Memory of L.M. Cherepnin: Materials of VI Russian Conference with International participation*. Krasnoyarsk, KSPU Publ., 2022, pp. 136–140. (In Russ.).

16. Селищева О.А., Гвоздев В.К. Исследование посевных качеств и эффективности способов подготовки семян липы к посеву // Тр. БГТУ. 2015. № 1. С. 166–169.

Selishcheva O.A., Gvozdev V.K. Investigation of Progeny and Method Effectiveness in the Process of Preparing Linden Seeds for Dropping. *Trudy Belorusskogo Gosudarstvennogo Tehnologicheskogo Universiteta* = Transactions of Belorussian State Technological University, 2015, no. 1, pp. 166–169. (In Russ.).

17. Семерикова С.А., Экарт А.К. Анализ изменчивости хлоропластной ДНК подтверждает существование нескольких плейстоценовых рефугиумов липы на юге Сибири // Генетика. 2022. Т. 58, № 4. С. 398–409.

Semicova S.A., Ekart A.K. Analysis of Chloroplast DNA Variability Confirms the Existence of Several Pleistocene Lime Refugia in Southern Siberia. *Genetika* = Genetics, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 398–409. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016675822030122>

18. Степанов Н.В. *Tilia nasczokinii* (Tiliaceae) – новый вид из окрестностей Красноярска // Ботан. журн. 1993. Т. 78, № 3. С. 137–145.

Stepanov N.V. *Tilia nasczokinii* (Tiliaceae), a New Species from the Neighbourhood of Krasnoyarsk. *Botanicheskii Zhurnal* = Botanicheskii Zhurnal, 1993, vol. 78, no. 3, pp. 137–145. (In Russ.).

19. Степанов Н.В. Сосудистые растения Приенисейских Саян. Красноярск: СФУ, 2016. 252 с.

Stepanov N.V. *Vascular Plants of the Trans-Yenisey Sayan Mountains*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2016. 252 p. (In Russ.).

20. Хлонов Ю.П. Липы и липняки Западной Сибири: (Распространение, лесоводственные свойства, типы лесов, искусственные посадки) / АН СССР. Сиб. отд-ние. Биол. ин-т. Новосибирск, 1965. 155 с.

Khlonov Yu.P. *Limes and Lime-Tree Forests of the West Siberia*. Novosibirsk, SB AS USSR Publ., 1965. 155 p. (In Russ.).

21. Хлонов Ю.П. Липа сердцевидная – *Tilia cordata* Mill. // Ботан. исследования Сибири и Казахстана. 2006. Вып. 12. С. 39–53.

Khlonov Yu.P. Lime Tree – *Tilia cordata* Mill. *Botanicheskiye issledovaniya Sibiri i Kazakhstana* = Botanical Investigations of Siberia and Kazakhstan, 2006, iss. 12, pp. 39–53. (In Russ.).

22. Bolikhovskaya N.S., Shunkov M.V. Pleistocene Environments of Northwestern Altai: Vegetation and Climate. *Archaeol. Ethnol. Anthropol. Eurasia*, 2014, iss. 42, no. 2, pp. 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.aecae.2015.01.001>

23. Czerepanov S.K. *Vascular Plants of Russia and Adjacent States (the Former USSR)*. New-York, Cambridge University Press, 1995. 491 p.

24. Ekart A.K., Larionova A.Ya., Kravchenko A.N., Semerikova S.A., Sedaeva M.I. Genetic Structure and Differentiation of Relicts Lime Populations Based on the Analysis of Variability of Nuclear Microsatellite Loci. *Russian Journal of Genetics*, 2021, vol. 57, no. 8, pp. 920–927. <https://doi.org/10.31857/S0016675821070079>

25. Hairs M., Komprdova K., Ermakov N., Chytry M. Modelling the Last Glacial Maximum Environments for a Refugium of Pleistocene Biota in the Russian Altai Mountains, Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, vol. 438, no. 15, pp. 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.07.037>

26. Jaegere T. de, Hein S., Claessens H. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*T. cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate. *Forests*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 56–76. <https://doi.org/10.3390/f7030056>

27. Novak J., Trotsiuk V., Sykora O., Svoboda M., Chytry M. Ecology of *Tilia sibirica* in a Continental Hemiboreal Forest, Southern Siberia: An Analogue of a Glacial Refugium of Broad-Leaved Temperate Trees. *The Holocene*, 2014, vol. 24, no. 8, pp. 908–918. <https://doi.org/10.1177/0959683614534744>

28. Pigott C.D. *Lime-Trees and Basswoods: Biological Monograph of the Genus Tilia*. New-York, Cambr. Univ. Press, 2012. 395 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139033275>

29. Semerikova S.A., Isakov I.Yu., Semerikov V.L. Chloroplast DNA Variation Shed Light on the History of Lime Tree (*Tilia cordata* s. L.) in the Eastern Part of the Range. *Russ. J. Gen.*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1134/S1022795420020118>

30. *The Plant List*. A Working List of Plant Species. 2011–2020. Available at: www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2517498; www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2517793 (accessed 18.10.21).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 635.92

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-77-90

Адаптивный потенциал видов рода *Spiraea* L. в условиях Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича

Н.Р. Сунгурова, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

О.П. Лебедева[✉], ассистент; ResearcherID: [G-7967-2019](https://orcid.org/0000-0002-5282-4904),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

С.Р. Страздаускене, аспирант; ResearcherID: [HKM-7435-2023](https://orcid.org/0000-0001-5229-1004),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5229-1004>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.sungurova@narfu.ru, o.lebedeva@narfu.ru[✉], svsun@bk.ru

Поступила в редакцию 17.01.22 / Одобрена после рецензирования 19.04.22 / Принята к печати 21.04.22

Аннотация. Приведены результаты комплексного изучения декоративных красивоцветущих кустарников рода Спирея (*Spiraea* L.). Для анализа выбрано 7 видов спиреи из коллекции Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича на базе Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова: *S. × Bumalda* Burv., *S. ulmifolia* Scop (L.) Maxim., *S. chamaedryfolia* L., *S. salicifolia* L., *S. nipponica* var. *tosaensis*, *S. betulifolia* Pall., *S. sericea* Turcz. Установлено, что варьирование высоты куста находится в пределах от 0,8 м (у спирей Бумальда, березолистной и ниппонской) до 2,1 м (у спирей вязолистной и шелковистой). Наибольший размах кроны имеет спирея вязолистная – 2,4 × 2,7 м с максимальным количеством стволиков в кусте 42 шт. Компактная форма куста отмечена у спирей березолистной и Бумальда – 1,0 × 1,3 и 1,0 × 1,1 м соответственно. При проведении фенологических наблюдений зафиксировано, что первые листья у спирей шелковистой, иволистной, вязолистной, ниппонской (форма тосенсис) появляются в середине мая. С разницей 2 недели разворачиваются листовые пластинки у остальных изучаемых интродуцентов. Установлено, что все виды спиреи благополучно переносят суровый северный климат (баллы зимостойкости – I–II) и натурализовались, что подтверждается обилием плодоношения и посевным качеством семян. Согласно архивным данным, семена всех исследуемых видов спирей вызревают ежегодно. Наибольшая доля всхожих семян отмечается у спиреи березолистной – 92 %. Высокая энергия прорастания семян зафиксирована у шелковистой и березолистной спирей. Срок прорастания семян у всех спирей составил 15 дн., кроме спиреи Бумальда, которую оставляли на ложе до 20 сут., при этом всхожесть оказалась только 57 %, а 1/5 испытанных семян – пустые. Высокое качество семян собственной репродукции позволяет заключить, что спиреи шелковистая, ниппонская (форма тосенсис), березолистная, вязолистная и иволистные могут выращиваться из семенного фонда. Все изучаемые виды характеризуются полной степенью адаптации. Решающим фактором при этом является зимостойкость растений. Адаптивный потенциал интродуцированных видов определяет границы вторичного ареала распространения. Все изучаемые виды могут быть рекомендованы для озеленения северных городов.

Ключевые слова: спирея *Spiraea* L., интродукция, дендрологический сад, озеленение, урбанофлора, всхожесть семян, энергия прорастания семян, Архангельская область

Для цитирования: Сунгурова Н.Р., Лебедева О.П., Страздаускене С.Р. Адаптивный потенциал видов рода *Spiraea* L. в условиях Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 77–90. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-77-90>

Original article

Adaptive Capacity of Species of the Genus *Spiraea* L. in the Conditions of the Dendrological Garden Named after I.M. Stratonovich

Nataliya R. Sungurova, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Olga P. Lebedeva✉, Assistant; ResearcherID: [G-7967-2019](https://orcid.org/0000-0002-5282-4904),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

Svetlana R. Strazdauskene, Postgraduate Student; ResearcherID: [HKM-7435-2023](https://orcid.org/0000-0001-5229-1004),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5229-1004>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.sungurova@narfu.ru, o.lebedeva@narfu.ru✉, svsun@bk.ru

Received on January 17, 2022 / Approved after reviewing on April 19, 2022 / Accepted on April 21, 2022

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study of decorative flowering shrubs of the genus *Spiraea* (*Spiraea* L.). 7 species of *Spiraea* L. from the collection of the Dendrological Garden of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov have been selected for analysis: *Spiraea* × *Bumalda* Burv, *Spiraea ulmifolia* Scop (L.) Maxim, *Spiraea chamaedryfolia* L., *Spiraea salicifolia* L., *Spiraea nipponica* var. *tosaensis*, *Spiraea betulifolia* Pall and *Spiraea sericea* Turcz. It has been established that the shrub height varies from 0.8 m (for *Spiraea Bumalda* Burv, *Spiraea betulifolia* and *Spiraea nipponica* var. *tosaensis*) to 2.1 m (for *Spiraea ulmifolia* Scop (L.) Maxim and *Spiraea sericea* Turcz.). *Spiraea ulmifolia* Scop (L.) Maxim has the largest crown span (2.4 × 2.7 m) with a maximum number of 42 stems for a shrub. The compact shape of the shrub has been noted in *Spiraea betulifolia* Pall and *Spiraea Bumalda* Burv (1.0 × 1.3 and 1.0 × 1.1 m, respectively). While conducting phenological observations, it has been recorded that the first leaves of *Spiraea sericea* Turcz, *Spiraea salicifolia* L., *Spiraea ulmifolia* Scop (L.) Maxim and *Spiraea nipponica* var. *tosaensis* Maxim begin to appear in mid-May. The leaf blades of the remaining introduced species under study unfold with a difference of two weeks from the previously listed ones. It has been established that all the species of *Spiraea* L. under study successfully tolerate the harsh northern climate (winter hardiness score I–II) and have become naturalized, which has been confirmed by the abundance of fruiting and the sowing quality of the seeds. According to archival data, the seeds of all the species of *Spiraea* L. under study ripen annually. The largest proportion of germinable seeds has been observed in *Spiraea betulifolia* Pall (92 %). High seed germination energy has been noted in *Spiraea sericea* Turcz and *Spiraea betulifolia* Pall. The period of seed germination for all *Spiraea* has been 15 days, except for *Spiraea Bumalda* Burv., which has been left on the bed for up to 20 days, however, the germination rate has been only 57 %, and a fifth of the tested seeds have been empty. The high quality of self-reproducing seeds leads to the conclusion that *Spiraea sericea* Turcz., *Spiraea nipponica* var. *tosaensis*, *Spiraea betulifolia*, *Spiraea ulmifolia* Scop (L.) Maxim and *Spiraea salicifolia* L. can be grown from seed stock. All the species under study



are characterized by the full extent of adaptability. The decisive factor influencing the degree of adaptability of *Spiraea* is high winter hardiness of these plants. The adaptive capacity of introduced species determines the boundaries of the secondary distribution area. All the species under study can be recommended for northern city landscaping.

Keywords: *Spiraea* L., introduction, dendrological garden, landscaping, urban flora, seed germination, seed germination energy, the Arkhangelsk Region

For citation: Sungurova N.R., Lebedeva O.P., Strazdauskene S.R. Adaptive Capacity of Species of the Genus *Spiraea* L. in the Conditions of the Dendrological Garden Named after I.M. Stratonovich. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 77–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-77-90>

Введение

В Дендрологическом саду им. И.М. Стратоновича многие годы проводятся работы по изучению интродукции растений. Основное внимание уделяется оценке их адаптивного потенциала: росту и развитию в условиях пункта интродукции, устойчивости к биотическим и абиотическим факторам, семенной продуктивности, сохранению декоративности. Главным лимитирующим фактором приживаемости растений в условиях архангельской агломерации являются климатические характеристики. Интродукция древесно-кустарниковых растений в регионе с суровыми природно-климатическими показателями может решить проблему повышения комфортности жизни в сложных экологических условиях, оказывать благоприятное психологическое воздействие на человека [2, 20].

Среди интродуцированных растений широкое применение в практике зеленого строительства имеют декоративные красивоцветущие кустарники рода Спирея (*Spiraea* L.): дубравколистная (*S. chamaedryfolia* L.), иволистная (*S. salicifolia* L.), сортовые виды японской (*S. japonica* L. f.) и др. Древесные растения, произрастающие в условиях азиатского ареала, выдерживают большие амплитуды температур воздуха, достаточно зимостойки и нетребовательны к плодородию почв [6]. В связи с этим некоторые виды были введены в культуру в Европе раньше, чем описаны (*S. mollifolia* Rehd., *S. nipponica* Maxim., *S. veitchii* Hemsl., *S. Wilsonii* Duthie, *S. media* Schmidt.) [25]. По старой систематике в литературе к роду Спирея часто относят часть экзотов спиреи японской под названием спирея Бумальда (*S. bumalda* Burvénich), она представляет собой сорт спиреи японской неизвестного родительского и географического происхождений [24].

Слово «спирея» с греческого переводится как «изгибающаяся», что свойственно побегам спиреи практически всех видов [15]. Спиреи – густоветвистые листопадные кустарники, обладающие высокой декоративностью, продолжительным цветением, хорошей приживаемостью, невысокой требовательностью к условиям произрастания, устойчивостью к патогенам и условиям городской среды [8–10, 22]. По срокам цветения различают весеннецветущие и летнецветущие виды рода *Spiraea* L. Первые характеризуются непродолжительным цветением на побегах прошлого года, цветками белой окраски в щитковидных соцветиях. У вторых цветение более растянуто, цветки преимущественно розовых и красных оттенков разной насыщенности, собраны в щитковидные или метельчатые соцветия на побегах текущего года [1, 12–14].

В мире насчитывается более 80 видов спиреи [27], а по другим данным – более 90 [3]. Разнообразные формы и виды спиреи дают возможность создавать художественно-выразительные композиции в одиночных посадках или груп-

пах. Спирея также применима для укрепления откосов и склонов. Низкорослые виды используются для создания скальных садиков (альпинариев) и бордюров [16, 17, 21]. Семена, листья и соцветия содержат фенольные соединения и обладают антиоксидантными свойствами [26, 28].

Цель данной работы – оценка адаптивного потенциала видов рода *Spiraea* L. в условиях Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича. Задачей исследования является изучение приспособительных реакций интродуцентов. Введение в новые условия произрастания сказывается на габитусе и на сезонном развитии растений [5, 7].

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в Дендрологическом саду им. И.М. Стратоновича при Северном (Арктическом) федеральном университете им. М.В. Ломоносова. Природные условия местности характеризуются коротким прохладным летом, продолжительной многоснежной зимой, высота снежного покрова на открытом месте – 0,38 м, наибольшая за зиму – 0,70 м. Средняя температура января составляет –12,5 °С, июля – +15,6 °С, годовое количество осадков – 494 мм, средняя продолжительность вегетационного периода – 110 дн. Объектами изучения выбраны интродуценты рода *Spiraea* L., преимущественно восточноазиатского ареала, выращенные из семенного материала, краткая характеристика которого представлена в табл. 1. География происхождения семян очень обширна – от г. Владивостока (спирея иволистная) до г. Кировска (спирея дубравколистная). Спирея шелковистая выращена из семян Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова. По многолетним наблюдениям отмечено, что растение постоянно обмерзало и поражалось грибными болезнями. Последними были получены семена спиреи березолистной из Дендрологического сада им. В.Н. Нилова в 2004 г. Все исследуемые экземпляры начали цветение и плодоношение с 5-летнего возраста, в суровые зимы в первые годы акклиматизации у всех видов установлено обмерзание 1-летних побегов.

Ввиду того, что спирея сильно гибридизирует, а в большинстве ботанических садов также наблюдается свободное переопыление, выявить полное соответствие видовым характеристикам у изученных экземпляров спирей Бумальда, березолистной и ниппонской нам не удалось. Спирея дубравколистная и вязолистная, на наш взгляд, полностью идентичны, в международной практике вторую часто рассматривают как разновидность дубравколистной [25] или синоним этого вида. Спирея вязолистная в 1986 г. была введена в коллекцию сада как самостоятельный вид.

Проводили дендрологическую оценку растений и фенологические наблюдения за ними. Дендрологическая оценка включает в себя фиксацию видового названия, диаметров и числа стволиков, средней высоты растений, диаметра проекции крон в двух перпендикулярных направлениях. В ежегодном цикле развития древесной растительности различали следующие фенофазы: зимний покой, набухание почек, распускание почек, развертывание листьев, полное облиствление, рост побегов, цветение, созревание плодов и семян, осеннее расцвечивание листьев, листопад. Начало фазы отмечали, когда в нее вступило не менее 10 % растений; в случае представленности вида лишь 2–3 экземплярами началом явления считали возникновение признаков у одного из растений. Согласно методике, наблюдения проводились во 2-й половине дня, в мае–июне – ежедневно, с июля – раз в неделю. Одновременно с регистрацией фенологических фаз определяли обилие плодоношения и морозостойкость исследуемых видов в баллах [10, 11].

Таблица 1

Спирей в коллекции Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича
Spiraea L. species in the collection of the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich

Вид спиреи	Количество экземпляров, шт.	Происхождение, год получения образца	Краткая характеристика*
Бумальда (<i>Spiraea</i> × <i>Bumalda</i> Burv.)	3	Липецк, 1977	Гибрид спиреи японской и белоцветковой (<i>S. japonica</i> × <i>S. albiflora</i>). Кустарник высотой до 75 см. Побеги ребристые, голые. Листья яйцевидно-ланцетные. Окраска цветков розовая. Цветение около 50 дн. В культуре с 1890 г.
Вязолистная (<i>S. ulmifolia</i> Scop (L.) Maxim)	2	Нижний Новгород (Горь- кий), 1986	Прямостоячий кустарник до 2 м высотой с длинными ребристыми побегами, с густой, красивой кроной округлой формы. Листья продолговато-яйцевидные, тонко-черешковые, до 4,5 см длиной, остроконечные, по краю дважды крупнозубчатые, сверху ярко-зеленые, снизу – с легким сизым налетом
Дубравколистная (<i>S. chamaedryfolia</i> L.)	3	Кировск, 1990	
Иволистная (<i>S. salicifolia</i> L.)	4	Владивос- ток, 1939	Кустарник до 2 м высотой с гладкими светло-коричневыми побегами. Листья 4–10 см длиной и 1–3 см шириной, продолговато-ланцетные или продолговато-эллиптические, острые, пильчатые. Соцветия – пирамидально- или овально-цилиндрическая метелка до 15 см длиной. Морозостойкая
Ниппонская (фор- ма тосенсис) (<i>S. nipponica</i> var. <i>tosaensis</i> Maxim.)	2	Новоси- бирск, 1975	Кустарник более компактный, чем спирея ниппонская, имеет округлую форму, до 0,9 м высотой и такой же ширины, с продолговатыми листьями и цветками немного меньшего размера
Березолистная (<i>S. betulifolia</i> Pall.)	2	Архан- гельск, 2004	Кустарник до 0,6 м высотой с голыми, реже опушенными коричневыми побегами. Листья эллиптические или яйцевидные, с клиновидным или округлым основанием, городчато-зубчатые. Соцветия щитковидные. Цветки белые или розовые
Шелковистая (<i>S. sericea</i> Turcz.)	6	Санкт- Петербург, 1940	Кустарник 0,7–1,8 м высотой с красновато-серыми ветвями, с сильно лупящейся корой. Листья плотные, с выдающимися жилками, длинно опушенные, овальные или эллиптические, с острой вершиной, цельнокрайние или с немногочисленными зубцами на вершине, короткочерешковые. Соцветия многоцветковые белые. Листовки пушистые

*По данным сайта <http://flower.onego.ru/kustar/spiraea.html>.

Посевные качества семян определяли в соответствии с ГОСТ 13056.6–97. Учет проросших семян производили в установленные сроки: 5, 7, 10, 15, 20-й дни.

Для оценки адаптивного потенциала исследуемых растений рассчитывали акклиматизационные числа по формуле Н.А. Кохно:

$$A = P B_1 + \Gamma_p B_2 + 3 B_3,$$

где P – рост, балл; Γ_p – генеративное развитие, балл; 3 – зимостойкость, балл; B_1, B_2, B_3 – коэффициенты весомости признаков ($B_1 = 2; B_2 = 5; B_3 = 13$).

Степень потенциальной адаптации растений оценивали по следующей шкале (%): 100–80 – полная; 79–60 – хорошая; 59–40 – удовлетворительная; 39–20 – слабая; меньше 20 – очень слабая. Присвоение баллов успешности адаптации осуществляли по 3 критериям: характер роста, генеративное развитие, зимостойкость – в сравнении с данными показателями в условиях естественного произрастания (табл. 2).

Таблица 2

Шкала оценки показателей успешности адаптации видов
The scale for evaluating the success rates of species adaptation

Балл	Показатель		
	рост	генеративное развитие	зимостойкость
5	Соответствует первичному ареалу произрастания	Размножение самосевом	Вполне зимостойкие
4	Менее интенсивный, но относительно хороший	Плодоношение регулярное, самосев отсутствует, самостоятельно размножается вегетативно	Обмерзает не более 50 % длины годовых побегов
3	Относительно умеренный	Семена не дают всходов, размножение вегетативное	Обмерзает 50–100 % длины годовых побегов
2	Слабый, растение может приобретать иную жизненную форму	Растение цветет, но не плодоносит	Кроме 1-летних побегов, повреждаются более старые части растений
1	Очень слабый, растение приобретает иную жизненную форму	Цветение и вегетативное размножение отсутствуют	Растения обмерзают до уровня снежного покрова, корневой шейки или погибают

Полученные результаты обрабатывались статистически с использованием пакета программ Microsoft Excel. Уровень надежности составлял 95 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что для исследуемых видов рода *Spiraea* L. характерно значительное варьирование размеров куста по высоте, количеству и диаметру стволиков, параметрам кроны (табл. 3).

Таблица 3

**Морфометрическая характеристика видов рода *Spiraea* L.
Morphometric characteristics of species of the genus *Spiraea* L.**

Вид спиреи	Высота, м	Диаметр кроны, м	Количество стволиков, шт.	Диаметр стволиков, мм	
				max	min
Бумальда	0,8±0,02	1,1	38	5,0±0,11	1,0±0,09
Вязолистная	2,1±0,06	2,7	42	14,4±0,46	5,0±0,27
Дубравко-листная	$\frac{1,8±0,05}{2,2}$	$\frac{2,1}{2,3}$	23	15,0±0,77	4,0±0,20
Иволистная	$\frac{1,8±0,03}{2,4 (1,7)}$	$\frac{2,3}{2,0 (1,2)}$	7	14,7±0,51	8,0±0,33
Ниппонская (форма тосенсис)	$\frac{1,1±0,03}{0,8}$	$\frac{2,5}{1,0}$	24	12,0±0,27	2,0±0,24
Березолистная	$\frac{0,8±0,01}{1,5 (0,8)}$	$\frac{1,3}{1,8 (1,0)}$	13	13,0±0,43	3,0±0,21
Шелковистая	$\frac{2,1±0,08}{2,7}$	$\frac{2,2}{2,7}$	12	17,0±0,19	4,7±0,18

Примечание: Здесь и в табл. 4 в числителе указаны наши данные; в знаменателе – Главного ботанического сада (Москва) [24]; в скобках – А.Н. Смирновой, К.С. Зайнуллиной (Республика Коми) [19, 20].

Согласно полученным данным, все растения превышают максимальную высоту снежного покрова 0,7 м и соответствуют морфометрическим характеристикам вида при произрастании в условиях первичного ареала. Наименьшая высота – 0,8 м – наблюдается у спирей Бумальда и березолистной. Согласно литературным данным [18], в условиях Республики Коми спирея березолистная в зависимости от места произрастания имеет высоту 0,8 м, а у спиреи иволистной высота соответствует нашим данным и составляет 1,7 м, диаметр кроны – до 1,2 м. Максимальная высота стволиков – 2,1 м – зафиксирована у спирей вязолистной и шелковистой. В Якутском ботаническом саду в рамках первичного ареала спирея шелковистая достигает высоты 2 м [4].

Проекция кроны для исследованных экземпляров равномерна в направлении всех сторон света и отличается высокой декоративностью. Наибольшая проекция кроны отмечена у спиреи вязолистной – 2,4 × 2,7 м, при максимальном количестве стволиков в кусте 42 шт. Эта спирея не подвергается стрижке, в целом один куст способен разрастаться и занимать значительную площадь. Если сравнивать габитусы спирей дубравколистной и вязолистной, то первая произрастает на свету в декоративной части сада и подвергается стрижке, а вторая находится в тени, побеги сильно вытянуты и их нижняя часть оголена. Компактная крона зафиксирована у спирей березолистной и Бумальда – 1,0 × 1,3 и 1,0 × 1,1 м соответственно. При этом у последней количество стволиков составляет 38 шт., большинство которых – это молодая поросль с диаметром 1–5 мм.

На основании проведенной дендрологической оценки можно заключить, что из всех исследуемых видов рода *Spiraea* L. в условиях дендросада к высоким можно отнести спиреи иволистную, дубравколистую, вязолистную, шелковистую. Компактный габитус имеют спиреи березолистная, Бумальда и ниппонская (форма тосенсис).

Продолжительность вегетации изучаемых интродуцентов от набухания почек до окончания листопада находится в пределах 140–163 дн. (табл. 4). Разница в вегетационном развитии экзотов в условиях дендросада и в ближайшем пункте интродукции в Республике Коми составляет от 30 до 70 дн., а с Москвой – от 10 до 50 дн. Спирея вязолистная, как и дубравколистая, дольше остальных видов вегетирует. Большое влияние на цикл оказывают климатические факторы.

Набухание почек происходит после таяния снега при температуре воздуха выше 5 °С, появление конуса листьев и разверзание почек начинаются при устойчивой средней температуре воздуха 4–8 °С, первые листья распускаются при 8–10 °С. Установлено, что почки начинают набухать у всех спирей в конце апреля с разницей 2–3 дн. У спиреи Бумальда это же явление бывает на неделю позже. Первые листья у спирей шелковистой, иволивной, вязоливной, ниппонской появляются в середине мая. С разницей в 2 недели разворачиваются листовые пластинки у остальных изучаемых интродуцентов. В дендрарии Республики Коми [18] у всех видов спирей начало распускания листьев приходится на конец 1-й – начало 2-й декады мая в зависимости от погодных условий, при этом сохраняется 2-недельная разница по наступлению фенофаз.

Цветение продолжается все летние месяцы, начинаясь в среднем в первых числах июня и заканчиваясь во 2-й декаде августа. На основе многолетних исследований, согласно архивным данным дендросада, последовательность и сроки цветения спирей постоянны и являются биологической особенностью вида. Коротким и дружным цветением отличается спирея шелковистая, аналогичные данные получены и в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина. Наиболее длительным цветением характеризуется спирея иволистная.

Изменчивость дат наступления фенофаз составляет около 7 дн. Самый вариативный этап – этап созревания плодов, он приходится у большинства видов на 3-ю декаду сентября и длится до конца октября. Листопад начинается с приходом заморозков.

Существенным показателем способности натурализации интродуцентов является их успешное регулярное полноценное плодоношение. Установлено, что наиболее обильное плодоношение (4 балла) имеют спиреи иволистная, березолистная и ниппонская (форма тосенсис). Несколько ниже обилие плодоношения – 3 балла – у спирей дубравколистой, вязоливной, Бумальда и шелковистой. Схожие данные получены и при изучении этих видов в Орловской области [13].

Исследуемые виды спирей благополучно переносят климат региона (табл. 5). Спиреи иволистная, дубравколистая, березолистная, вязоливная, ниппонская (форма тосенсис) не обмерзают, что отражает балл зимостойкости I. Многолетние исследования показали, что в последние годы лишь в отдельные очень суровые зимы (при –41 °С) наблюдается обмерзание 1-летних побегов у спирей Бумальда и шелковистой, поэтому им присвоены баллы зимостойкости I–II. Известно, что спирея Бумальда также страдает от суровых зимних условий Орловской области [13].

Таблица 4

Средние данные многолетних фенологических наблюдений за видами рода *Spiraea* L.
Average data of the long-term phenological observations of species of the genus *Spiraea* L.

Вид спиреи	Набухание почек	Появление		Цветение		Период, дн.	Массовое созревание плодов	Начало осенней окраски листьев	Листопад		Период вегетации, дн.
		конуса листьев	первых листьев	начало	конец				начало	конец	
		дата±дн.							дата±дн.		
Шелковистая	30.04±2	10.05±2	14.05±2	06.06±3	17.06±4	11	12.09±4	04.09±4	07.09±4	20.09±4	143
	23.04±8			23.05±6	05.07±8	13				23.09±9	153
Бумальда	08.05±4	16.05±5	25.05±2	15.07±3	16.08±4	32	16.10±6	01.09±3	15.09±5	30.09±4	145
	29.04±2	07.05±2	12.05±2	21.07±3	03.08±4	13	16.09±4	08.09±4	24.09±4	09.10±4	163
Дубравколистная	28.04±3	17.05±3	28.05±2	19.07±4	10.08±3	22	21.09±5	01.09±3	24.09±4	09.10±4	162
	22.04±7			26.05±6 (08.06±6)	15.07±5 (25.06±7)	20(18)	25.09±9			18.10±5 (22.09±4)	179 (135)
Иволистная	27.04±2	02.05±3	13.05±2	24.06±3	04.08±3	41	16.10±5	06.09±5	07.09±4	16.09±4	147
	22.04±7			20.06±10 (09.07±3)	14.07±11 (14.08±5)	24 (42)	19.09±29 (03.10)			27.09±12 (05.10±5)	158 (140)
Ниппонская (форма тосенсис)	30.04±2	10.05±2	15.05±2	15.06±3	13.07±4	28	22.09±5	28.08±3	30.08±4	17.09±3	140
	15.04					25				30.10	190
Березолистная	01.05±2	25.05±2	01.06±2	03.07±3	26.07±5	23	22.09±4	25.08±3	30.08±4	18.09±4	141
	20.04±7			10.06±62 (22.06±4)	06.07±4 (09.07±5)	26 (21)	06.10±10			20.09±5 (01.10±5)	152 (134)

Таблица 5

Зимостойкость и обилие плодоношения видов рода *Spiraea* L., баллы
Winter hardiness and abundance of fruiting of species
of the genus *Spiraea* L., in points

Вид спиреи	Зимостойкость	Обилие плодоношения
Иволистная	I	4
Дубравколистная	I	3
Березолистная	I	4
Вязолистная	I	3
Бумальда	I–II	3
Шелковистая	I–II	3
Ниппонская (форма тосенсис)	I	4

Посевные качества семян: всхожесть и энергия прорастания – приведены в табл. 6.

Таблица 6

Качество семян видов рода *Spiraea* L., %
The quality of seeds of species of the genus *Spiraea* L., %

Вид спиреи	Энергия прорастания семян	Всхожесть семян	
		техническая	абсолютная
Спирея шелковистая	74±3,4	81±3,7	97±0,7
Спирея ниппонская (форма тосенсис)	35±2,9	88±3,3	100±1,1
Спирея березолистная	68±3,0	92±3,4	100±0,8
Спирея дубравколистная	28±2,4	89±3,2	99±1,1
Спирея иволистная	53±3,9	78±4,0	91±1,0
Спирея Бумальда	3±0,9	57±2,1	80±1,8

Данные табл. 6 свидетельствуют о том, что наибольшая доля всхожих семян отмечается у спиреи березолистной – 92 %; согласно архивным данным, семена вызревают ежегодно. Энергия прорастания семян высокая у спирей шелковистой и березолистной. Срок проращивания семян у всех видов составляет 15 дн., кроме спиреи Бумальда, которую оставляли на ложе до 20 сут., при этом всхожесть оказалась только 57 %, а 1/5 испытанных семян были пустыми. Всхожесть семян спиреи иволистной равняется 78 %, что незначительно отличается от данных, полученных при проращивании дикорастущих спирей Прибайкалья, всхожесть семян которых составляет у иволистной – 79 % и у березолистной – 28 % [23]. Окультуривание спиреи березолистной способствует лучшей натурализации вида и его адаптации к изменениям климата. Высокое качество семян собственной репродукции позволяет заключить, что спиреи шелковистая, ниппонская

(форма тосенсис), березолистная, вязолистная и иволистная могут выращиваться из семенного фонда для получения посадочного материала. Результаты оценки адаптации интродуцентов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Оценка адаптации видов рода *Spiraea* L. к условиям Архангельской области
The assessment of adaptability of species of the genus *Spiraea* L.
to the conditions of the Arkhangelsk Region

Вид спиреи	Показатель, балл			Адаптация	
	рост	генеративное развитие	зимостойкость	оценка, %	степень
Иволистная	5	4	5	95	Полная
Дубравколистная					
Березолистная					
Вязолистная			4	82	
Бумальда					
Шелковистая					
Ниппонская (форма тосенсис)					

Данные табл. 7 показывают, что все изучаемые виды характеризуются полной степенью адаптации и могут успешно культивироваться и применяться в зеленом строительстве северных городов. Спиреи Бумальда и шелковистая получили оценку в нижней границе числа акклиматизации. Решающим фактором при адаптации растений является их зимостойкость. Адаптивный потенциал интродуцированных видов определяет границы вторичного ареала распространения.

Заключение

В процессе развития исследуемые виды спирей адаптировались к условиям климата архангельской агломерации благодаря короткому периоду роста и цветения, возможности вовремя завершать процессы одревеснения и своевременному вступлению в период покоя и выходу из него в определенные сроки. Спиреи восточноазиатской флоры переносят суровый северный климат (баллы зимостойкости – I–II) и активно натурализуются в условиях г. Архангельска. Все исследуемые виды характеризуются полной степенью адаптации и могут успешно культивироваться и применяться в зеленом строительстве северных городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аксенов Е.С., Аксенова Н.А. Декоративное садоводство для любителей и профессионалов. Деревья и кустарники. М.: АСТ-ПРЕСС, 2001. 560 с.
 Aksenov E.S., Aksenova N.A. *Landscape-Gardening for Amateurs and Professionals. Trees and Shrubs*. Moscow, AST-PRESS Publ., 2001. 560 p. (In Russ.).

2. Бабич Н.А., Залывская О.С., Травникова Г.И. Интродуценты в зеленом строительстве северных городов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 144 с.

Babich N.A., Zalyvskaya O.S., Travnikova G.I. *Introducents in the Green Construction of Northern Cities: Monograph*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2008. 144 p. (In Russ.).

3. Деревья и кустарники СССР: дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции: в 7 т. Т. 3: Покрытосеменные. Семейства Троходендроновые – Розоцветные / ред. С.Я. Соколов, Б.К. Шишкин. М.; Л.: АН СССР, 1954. 872 с.

Trees and Shrubs of the USSR: Wild, Cultivated and Promising for Introduction: in 7 volumes. Angiosperms. Family Trochodendraceae – Rosaceae. Ed. S.Ya. Sokolov, B.K. Shishkin. Moscow; Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1954, vol. 3. 872 p. (In Russ.).

4. Коробкова Т.С. Интродукция рода *Spiraea* L. в Центральной Якутии // Наука и образование. 2015. № 4. С. 124–128.

Korobkova T.S. The Introduction of Genus *Spiraea* L. in Central Yakutia. *Science and Education*, 2015, no. 4, pp. 124–128. (In Russ.).

5. Лапин П.И., Сиднева С.В. Определение перспективности растений для интродукции по данным фенологии // Бюл. ГБС. 1968. Вып. 69. С. 14–21.

Lapin P.I., Sidneva S.V. Determining the Prospects of Plants for Introduction According to the Data of Phenology. *Bulletin of the Main Botanical Garden*, 1968, iss. 69, pp. 14–21. (In Russ.).

6. Лоскутов Р.И. Интродукция декоративных древесных растений в южной части Средней Сибири. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1991. 189 с.

Loskutov R.I. *Introduction of Ornamental Woody Plants in the Southern Part of Central Siberia*. Krasnoyarsk: ILiD SO AN USSR, 1991. 189 p. (In Russ.).

7. Малаховец П.М. Лесные культуры. Архангельск: САФУ, 2012. 222 с.

Malakhovets P.M. *Forest Culture: A Practical Guide*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2012. 222 p. (In Russ.).

8. Малаховец П.М., Тисова В.А. Деревья и кустарники дендросада Архангельского государственного технического университета. Архангельск: АГТУ, 1999. 50 с.

Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Trees and Shrubs of the Arboretum of the Arkhangelsk State Technical University*. Arkhangelsk, Publishing House of ASTU, 1999. 50 p. (In Russ.).

9. Малаховец П.М., Тисова В.А. Фенологические наблюдения за сезонным развитием деревьев и кустарников. Архангельск: АГТУ, 1999. 48 с.

Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Phenological Observations of the Seasonal Development of Trees and Shrubs: an Educational and Methodical Manual*. Arkhangelsk, Publishing House of ASTU, 1999. 48 p. (In Russ.).

10. Малаховец П.М., Тисова В.А., Травникова Г.И., Цвиль В.С. Практическое пособие по озеленению городов и поселков Архангельской области. Архангельск, 1999. 71 с.

Malakhovets P.M., Tisova V.A., Travnikova G.I., Tsvil V.S. *Practical Guide to Landscaping of Cities and Towns of the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, Solombala Publishing House, 1999. 71 p. (In Russ.).

11. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР // Бюл. ГБС. 1979. Вып. 113. С. 3–8.

Methods of Phenological Observations in the Botanical Gardens of the USSR. *Bulletin of the Main Botanical Garden of the Academy of Sciences of the USSR*, 1979, iss. 113, pp. 3–8. (In Russ.).

12. Минович В.М., Бочарова Г.И., Кривошеев И.М. Растения рода спирея – *Spiraea* L. флоры Центральной Сибири (географическое распространение, морфология, микроскопия): метод. пособие. Иркутск: ИГМУ, 2014. 31 с.

Mirovich V.M., Bocharova G.I., Krivosheev I.M. *Plants of the Genus Spiraea – Spiraea L. in the Flora of Central Siberia (Geographical Distribution, Morphology, Microscopy): Study Guide*. Irkutsk, ISMU, 2014. 31 p. (In Russ.).

13. Павленкова Г.А. Оценка видов рода Спирея (*Spiraea* L.) генофонда дендрария ВНИИСПК // Современ. садоводство. 2015. № 4. С. 77–85. Режим доступа: <https://journal-vniispk.ru/pdf/2015/4/74.pdf> (дата обращения: 18.12.23).

Pavlenkova G.A. Estimation of *Spiraea* L. Species of VNIISPК Arboretum Gene Pool. *Sovremennoe Sadovodstvo* = Contemporary Horticulture, 2015, no. 4, pp. 77–85. (In Russ.).

14. Плотникова Л.С. Спиреи: практическое пособие по выбору сортов, выращиванию, размножению, защите от болезней и вредителей. М.: МСП, 2004. 48 с.

Plotnikova L.S. *Spiraea: Practical Guide for Species Selection, Cultivating, Breeding and Protection from Diseases and Pests*. Moscow, Publishing House of SMEs, 2004. 48 p. (In Russ.).

15. Плотникова Л.С. Спирея в природе и культуре // Лесохоз. информ. 2014. № 4. С. 54–58. Режим доступа: <http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru/lesnye-kultury-str-54-58> (дата обращения: 18.12.23).

Plotnikova L.S. *Spiraea in Nature and Culture. Lesochozyajstvennaya Informatsiya* = Forestry Information, 2014, no. 4, pp. 54–58. (In Russ.).

16. Попова В.Т., Дорофеева В.Д. Оценка интродукции некоторых видов рода *Spiraea* L. в дендрарии ВГЛТА и перспективы их использования в озеленении // Лесо-техн. журн. 2013. № 1(9). С. 59–68.

Popova V.T., Dorofeeva V.D. Assessment of the Introduction of Some Species of the Genus *Spiraea* L. in the Arboretum of VSFTA and Prospects for Their Use in Landscaping. *Forestry Journal*, 2013, no. 1(9), pp. 59–68. (In Russ.).

17. Русский лес / сост. Ф.К. Арнольд. 2-е изд. Т. II, ч. 1. СПб.: Изд. А.Ф. Маркса, 1898. 741 с.

Arnold F.K. *Russian Forest*. Second edition, St. Petersburg, A.F. Marx Publ., 1898, vol. 2, part 1. 741 p. (In Russ.).

18. Смирнова А.Н., Зайнуллина К.С. Биоморфологическая характеристика некоторых видов рода *Spiraea* L. в культуре на европейском северо-востоке (Республика Коми) // Изв. Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 1(29). С. 28–35.

Smirnova A.N., Zainullina K.S. Biomorphological Characteristics of Some Species of the Genus *Spiraea* L. in Culture in the European Northeast (Republic of Komi). *Proceedings of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 1(29), pp. 28–35. (In Russ.).

19. Смирнова А.Н., Зайнуллина К.С. Особенности вегетации, цветения и плодоношения видов рода *Spiraea* L. при культивировании на европейском Северо-Востоке (Республика Коми) // Самар. науч. вестн. 2018. Т. 7, № 2(23). С. 115–120.

Smirnova A.N., Zainullina K.S. Features of Vegetation, Flowering and Fruiting of the Genus *Spiraea* L. Species in the Cultivation in the European North-East (Republic of Komi). *Samara Journal of Science*, 2018, vol. 7, no. 2(23), pp. 115–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/snv201872123>

20. Соловьева О.С., Соколова Н.А., Бажин О.Н., Гусейнова А.Р. Зеленые насаждения как средство улучшения экологии города // Вестн. МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2010. № 1. С. 75–83.

Solovyova O.S., Sokolova N.A., Bazhin O.N., Gusseinova A.R. Green Planting as a Means of Improving the Ecology of the City. *Bulletin of the Mari State University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2010, no.1, pp. 75–83. (In Russ.).

21. Спиреи (*Spiraea*), сем. Розоцветные // Энциклопедия декоративных садовых растений. Режим доступа: http://flower.onego.ru/kustar/spirae_g.html (дата обращения: 18.12.23).

Spiraea, the Family Rosaceae: Encyclopedia of Ornamental Garden Plants. (In Russ.).

22. Чаховский А.А., Орленок Е.И. Таволги в декоративном садоводстве. Минск: Наука и техника, 1985. 72 с.
- Chakhovsky A.A., Orlyonok E.I. *Meadowsweets in Decorative Gardening*. Minsk, Science and Technology Publ., 1985. 72 p. (In Russ.).
23. Шильников М.А., Чернигова Е.Н., Шеметова И.С., Шеметов И.И. Эколого-биологическая оценка дикорастущих видов спиреи, перспективных для озеленения Предбайкалья // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 8. С. 65–71.
- Shilnikov M.A., Chernigova E.N., Shemetova I.S., Shemetov I.I. Ecological and Biological Assessment of Wild-Growing Types of the Spirea, Perspective for Gardening of Baikal Region. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2016, no. 8, pp. 65–71. (In Russ.).
24. Bean W.J. *Trees and Shrubs Hardy in the British Isles*. London, Murray Publisher, 1981, 8th ed., vol. 1–4 and supplement. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.20825>
25. Businsky R., Businska L. The genus *Spiraea* in Cultivation in Bohemia, Moravia and Slovakia. *Acta Pruhoniciana*, 2002, vol. 72, 165 p.
26. Mughal U.R., Mehmood R., Malik A., Ali B., Tareen R.B. Flavonoid Constituents from *Spiraea brahuica*. *Helvetica Chimica Acta*, 2012, vol. 95, pp. 100–105. <https://doi.org/10.1002/hlca.201100214>
27. Rehder A. *Manual of Cultivated Trees and Shrubs*. New York, The Macmillan company, 1949. 906 p.
28. Zasada J.C., Stickney P.F. *Spiraea L.: Spiraea. The Woody Plant Seed Manual: Agriculture Handbook*. U.S., Washington DC, Department of Agriculture, Forest Service, 2008, pp.1067–1070.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья
УДК 630*181(581.4)
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-91-100

Морфологическая изменчивость ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris* L. в пределах Тебердинского национального парка

М.З. Моллаева[✉], науч. соавт.; ResearcherID: [AAA-9762-2021](https://orcid.org/0000-0002-9089-3417),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9089-3417>

Ф.А. Темботова, чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, гл. науч. соавт.;

ResearcherID: [AAO-1493-2020](https://orcid.org/0000-0001-8068-7647), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8068-7647>

Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, ул. И. Арманд, д. 37 а,
г. Нальчик, Россия, 360051; monika.011@yandex.ru[✉], iemt@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.21 / Одобрена после рецензирования 19.03.22 / Принята к печати 23.03.22

Аннотация. Сосновые леса распространены в Карачаево-Черкесской республике, в Тебердинском национальном парке, в основном в его северной части. Вариабельность морфологических параметров сосны связана с эколого-географическими особенностями мест произрастания вида, что особенно актуально для гор Кавказа. Цель работы – изучение морфологической изменчивости сосны в горных условиях Карачаево-Черкесской республики на материале морфометрических показателей хвои и побега. Сбор хвои и побегов проводили стандартными методами. Согласно полученным данным, наиболее длинная хвоя сосны отмечается в ущелье р. Гоначхир (1671 м над ур. м.), наиболее короткая – в ущелье р. Даут (1900 м над ур. м.). Зафиксировано уменьшение длины хвои с высотой, изменения ширины не наблюдается, индекс охвоенности, напротив, с высотой увеличивается. Длина побега в выборках *Pinus sylvestris* колеблется в пределах от 22,00 (выборки Архыз и Даут-2) до 28,94 (Теберда, Даут-1) мм и коррелирует с высотой мест произрастания. Масса свежесобранной хвои сосны на исследуемой территории варьирует от 4,43 (Теберда) до 6,06 (Даут-1) г, при высушивании масса 100 пар хвои уменьшается во всех выборках в 2 раза и колеблется от 2,23 (Теберда) до 2,99 (Гоначхир) г, корреляции массы с высотой местности не обнаружено. Продолжительность жизни хвои сосны, произрастающей на разных высотах в Карачаево-Черкессии, в среднем составляет 2–3 года, в небольших количествах встречается хвоя 4 лет – выборки Теберда (1 %) и Джамагат (4 %). Результаты настоящей работы – первые для Западного Кавказа, в частности для Карачаево-Черкесской республики, данные о морфологической изменчивости хвои и побега *Pinus sylvestris* L., произрастающих на разной высоте. Полученные сведения об изменчивости ассимиляционного аппарата сосны на Западном Кавказе дополняют и подтверждают выводы других ученых об увеличении размеров и массы хвои, уменьшении продолжительности ее жизни при продвижении с севера на юг, они будут полезны при оценке фенотипической изменчивости хвойных лесов.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., длина хвои, масса хвои, длина и охвоенность побега, возраст хвои, разновысотные популяции, Западный Кавказ

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания № 075-00347-19-00 НИР ИЭГТ РАН.

Для цитирования: Моллаева М.З., Темботова Ф.А. Морфологическая изменчивость ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris* L. в пределах Тебердинского национального парка // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 91–100. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-91-100>

Original article

Morphological Variability of the Assimilation Apparatus of *Pinus sylvestris* L. within the Teberda National Biosphere Reserve

Malika Z. Mollaeva[✉], Research Scientist; ResearcherID: [AAA-9762-2021](https://orcid.org/0000-0002-9089-3417),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9089-3417>

Fatimat A. Tembotova, Corresponding Member of the RAS, Doctor of Biology,

Chief Research Scientist; ResearcherID: [AAO-1493-2020](https://orcid.org/0000-0001-8068-7647),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8068-7647>

Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories of Russian Academy of Sciences, ul. I. Armand, 37A, Nalchik, 360051, Russian Federation; monika.011@yandex.ru[✉], icmt@mail.ru

Received on December 22, 2021 / Approved after reviewing on March 19, 2022 / Accepted on March 23, 2022

Abstract. Pine forests are widespread in the Karachay-Cherkess Republic, in particular, in the Teberdinsky National Biosphere Reserve, mainly in its northern part. The variability of pine morphological parameters is associated with the ecological and geographical features of the species' habitat, which is especially important for the Caucasus Mountains. The purpose of this research has been to study the morphological variability of pine in the mountainous conditions of the Karachay-Cherkess Republic based on the morphometric parameters of needles and shoots. The collection of needles and shoots has been carried out using the standard methods. According to the data obtained, the longest pine needles are found in the gorge of the Gonachkhir River (1671 m above sea level), and the shortest – in the gorge of the Daut River (1900 m above sea level). A decrease in the length of the needles with altitude has been recorded. No change in the width has been observed. The needle packing index, on the contrary, increases with altitude. The length of the shoot in the samples of *Pinus sylvestris* ranges from 22.00 mm (Arkhyz and Daut-2 samples) to 28.94 mm (Teberda and Daut-1 samples) and correlates with the altitude of the habitats. The weight of the freshly collected pine needles in the study area has varied from 4.43 g (Teberda) to 6.06 g (Daut-1); when dried, the weight of 100 pairs of needles has decreased in all the samples by 2 times and has ranged from 2.23 g (Teberda) to 2.00 g (Gonachkhir). No correlation of the weight with the terrain altitude has been found. The lifespan of pine needles growing at different altitudes in the Karachay-Cherkess Republic is on average 2–3 years; 4-year-old needles have been found in small quantities in Teberda (1 %) and Dzhmagat (4 %). The results of this research are the first data on the morphological variability of the needles and shoots of *Pinus sylvestris* L., growing at different altitudes for the Western Caucasus, in particular for the Karachay-Cherkess Republic. The obtained data on the variability of the pine assimilation apparatus in the Western Caucasus complements and confirms the conclusions of other scientists about the increase in the size and weight of needles, as well as a decrease in their life expectancy when moving from north to south. They will be useful in assessing the phenotypic variability of coniferous forests.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., needle length, needle weight, length and needle packing of the shoot, needle age, populations from different altitude, the Western Caucasus

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the state assignment no. 075-00347-19-00 Research Institute IEMT RAS.

For citation: Mollaeva M.Z., Tembotova F.A. Morphological Variability of the Assimilation Apparatus of *Pinus sylvestris* L. within the Teberda National Biosphere Reserve. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 91–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-91-100>



Введение

Сосновые леса широко распространены в Карачаево-Черкесской республике на территории Тебердинского национального парка и в основном сосредоточены в его северной части, отличающейся сухостью и континентальностью климата. В составе сосновых лесов встречается *Acer trautvetteri* Medw., *Betula litwinowii* Doluch., *B. pendula* Roth., *Populus tremula* L., реже *Quercus robur* L., в подлеске к верхней границе леса часто отмечают *Juniperus communis* L., *J. sabina* L., *J. communis* var. *hemisphaerica* (J.Presl & C.Presl) Parl., ниже по склону – *Rhododendron luteum* Sweet., *R. caucasicum* Pall. [4, 5].

Вариация морфометрических показателей хвои *Pinus sylvestris*, согласно литературным источникам, имеет широкий размах в пределах ареала вида, что связано с экологическими, географическими и климатическими особенностями мест произрастания вида [1, 2, 6–8, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20].

Возраст хвои увеличивается по мере продвижения ареала на север. Так, продолжительность жизни хвои сосны Восточно-Европейской равнины составляет 4–5 лет, что уступает долговечности южносибирской сосновой хвои, которая сохраняется до 8 лет, что, по всей видимости, обусловлено суровыми климатическими условиями изучаемого региона [9, 12]. У видов рода *Pinus* в горах Северной Америки выявлено увеличение возраста хвои с повышением высотного градиента мест произрастания деревьев [17]. В горах Новой Зеландии, согласно данным А. Nordmeyer [19], обнаружено уменьшение массы хвои и надземной фитомассы деревьев при повышении высотного градиента местности. Исследований изменчивости линейных параметров и массы хвои, годичного прироста и густоты охвоения побега в разновысотных популяциях сосны на Западном Кавказе, в частности на территории Карачаево-Черкесии, практически нет, что свидетельствует об актуальности нашей работы.

Цель исследования – изучение изменчивости морфометрических параметров хвои и побега сосны на Западном Кавказе в пределах Тебердинского национального парка.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются естественные насаждения сосны обыкновенной, произрастающие на территории Карачаево-Черкесской республики в условиях Тебердинского национального парка (рис. 1). Пробные площади (ПП) заложены в обособленных ущельях: Архыз (1820 м над ур. м.), Теберда (1330 м над ур. м.), Гончакхир (1671 м над ур. м.), Джамагат (1820 м над ур. м.), Даут (ПП Даут-1 – 1876 м над ур. м.; Даут-2 – 1900 м над ур. м., на левом берегу реки; Даут-3 – 1923 м над ур. м., на правом берегу реки).

Сбор материала (по 10 побегов с каждого дерева) осуществляли с 15 деревьев на каждой ПП. Хвою (5–10 пар с каждого побега) отбирали в средней части кроны дерева, согласно методическим рекомендациям Л.Ф. Правдина [13] и С.А. Мамаева [8]. Количественные признаки хвои и побега измеряли электронным штангенциркулем с точностью до $\pm 0,01$ мм. Продолжительность жизни хвои на осевых и боковых побегах оценивали по максимальному возрасту охвоенного побега. Густоту охвоения побега устанавливали методом подсчета хвоинок на 1 см длины годичного побега. Для определения абсолютно сухой массы хвою выдерживали в термостате при температуре 38 °С в течение 3–5 сут., затем месяц – в режиме свободного высушивания (до стабильных значений массы).

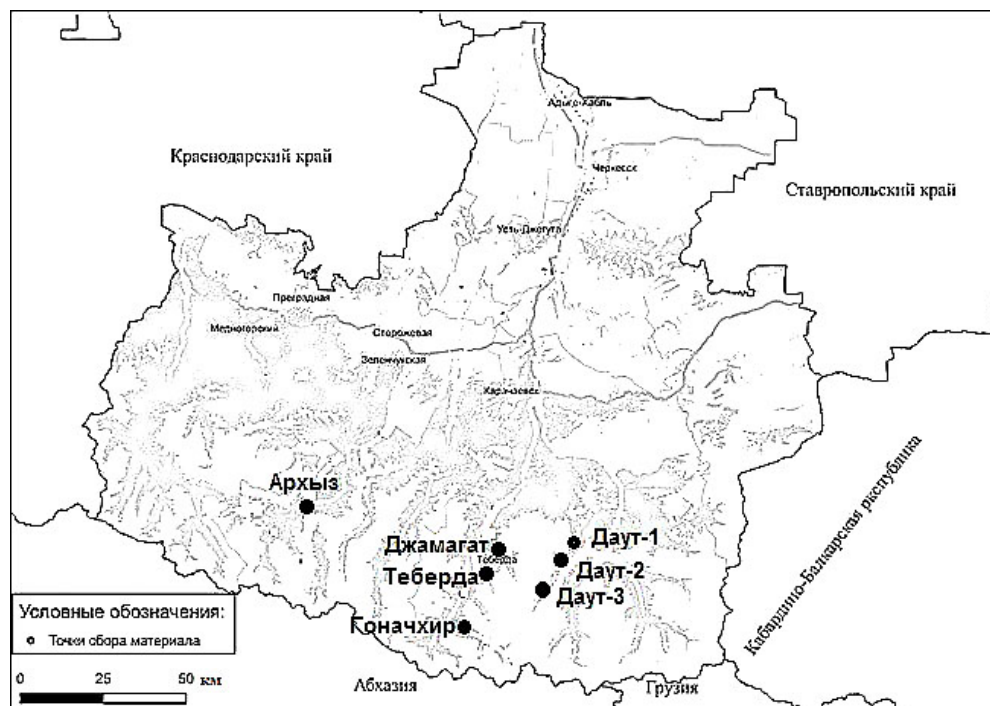


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей на исследуемой территории

Fig.1. Layout of sample plots in the study area

Массу хвои (100 пар) устанавливали взвешиванием образцов в 3-кратной повторности на электронных весах с погрешностью ± 1 мг. Учитывая высокую изменчивость исследуемых морфологических параметров сосны в пределах кроны [13], для каждого дерева считали среднее значение. Индивидуальную изменчивость хвои оценивали по шкале С.А. Мамаева [8]. Анализ полученных данных проводили методами математической статистики в программе Statistica 10.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам изучения морфометрических параметров хвои *P. sylvestris* на территории Карачаево-Черкесской республики (табл. 1) выявлена вариация длины хвои от 40,04 (Даут-2) до 56,05 (Гоначхир) мм. Максимальная средняя ширина хвои сосны отмечается в Архызе (1,56 мм), минимальная – в Теберде (1,21 мм) [11]. Коэффициент индивидуальной изменчивости средней длины хвои в выборках сосны обыкновенной на исследуемой территории варьирует от 9 (Джамагат) до 20 (Даут-2) %, что, согласно классификации С.А. Мамаева [8], соответствует низкому и среднему уровням изменчивости; ширины хвои – от 4 (Архыз) до 10 (Даут-2) % – низкий уровень изменчивости.

Дисперсионный анализ средних длины и ширины хвои, длины и степени охвоенности побега разновысотных выборок сосны обыкновенной выявил статистически значимые различия по длине хвои (при $p \leq 0,005$) между следующими выборками (табл. 2.): Теберда отличается только от 2 выборок – Архыза и Даута-2; Гоначхир достоверно отличается от всех выборок, за исключением Даута-1; Архыз отличается только от Гоначхира и Даута-2; Джамагат – от Гоначхира, Даута-1 и Даута-2; Даут-1 – от Даута-2, Архыза и Джамагата; Даут-2 и Даут-3 отличаются от Гоначхира и Даута-2. По ширине хвои различий практически не выявлено.

Таблица 1

Средние длина и ширина хвои *Pinus sylvestris*, произрастающей на разной высоте в Карачаево-Черкесии

Average length and width of needles of *Pinus sylvestris* samples growing at different altitudes in the Karachay-Cherkess Republic

Выборка	Высота над уровнем моря, м	Длина хвои		Ширина хвои	
		M±m, мм	CV, %	M±m, мм	CV, %
Теберда	1330	46,76±1,3	11,05	1,21±0,01	5,80
Гоначхир	1670	56,05±1,7	10,87	1,45±0,02	6,89
Архыз	1820	44,82±1,7	13,15	1,56±0,01	4,18
Джамагат	1820	45,62±1,7	9,31	1,30±0,03	9,31
Даут-1	1876	51,24±1,6	11,39	1,38±0,02	6,54
Даут-2	1900	40,04±2,1	20,34	1,39±0,03	9,58
Даут-3	1923	49,92±1,7	12,21	1,35±0,03	8,66

По длине побега достоверно различны между собой выборки Теберда – Архыз, Теберда – Даут-2, Архыз – Даут-1, Даут-1 – Даут-2. По индексу охвоенности достоверных различий почти нет, за исключением выборки Теберда, которая отлична от всех выборок, полученных на ПП в Даутском ущелье, также различны между собой выборки Джамагат и Даут-2.

Таблица 2

Попарный уровень значимости средних длины хвои и длины побега (LSD-тест, при $p < 0,005$, ANOVA) *Pinus sylvestris*, произрастающей на разной высоте в Карачаево-Черкесии

Pairwise significance level of the average needle length and shoot length (LSD-test, at $p < 0.005$, ANOVA) of *Pinus sylvestris* samples growing at different altitudes in the Karachay-Cherkess Republic

Выборка	Теберда	Гоначхир	Архыз	Джамагат	Даут-1	Даут-2	Даут-3
Теберда		0,0023	0,4587	0,6759	0,0632	0,0052	0,1836
Гоначхир	0,3227		0	0,0001	0,0653	0	0,0195
Архыз	0,0194	0,1911		0,7586	0,0146	0,0538	0,0512
Джамагат	0,1799	0,7352	0,3306		0,0317	0,0251	0,0987
Даут-1	0,8670	0,2732	0,0176	0,1530		0	0,6083
Даут-2	0,0170	0,1969	0,9296	0,3484	0,0158		0,0001
Даут-3	0,4960	0,7687	0,1105	0,5276	0,4214	0,1108	

Примечание: В верхнем правом углу таблицы приведены значения для длины хвои, в левом нижнем – для длины побега. Полужирным шрифтом отмечены достоверные различия между сравниваемыми выборками.

В целях исследования влияния высотного градиента как комплекса факторов среды на вариативность параметров хвои и побега выборки сосны были сгруппированы в следующие высотные уровни, м над ур. м.: 1 – 1300 (Теберда); 2 – 1600 (Гоначхир); 3 – 1800 (Архыз, Джамагат, Даут-1); 4 – 1900 и более (Даут-2 и Даут-3). На рис. 2 представлена изменчивость густоты охвоения и морфометрических показателей хвои и побега в зависимости от высотного градиента.

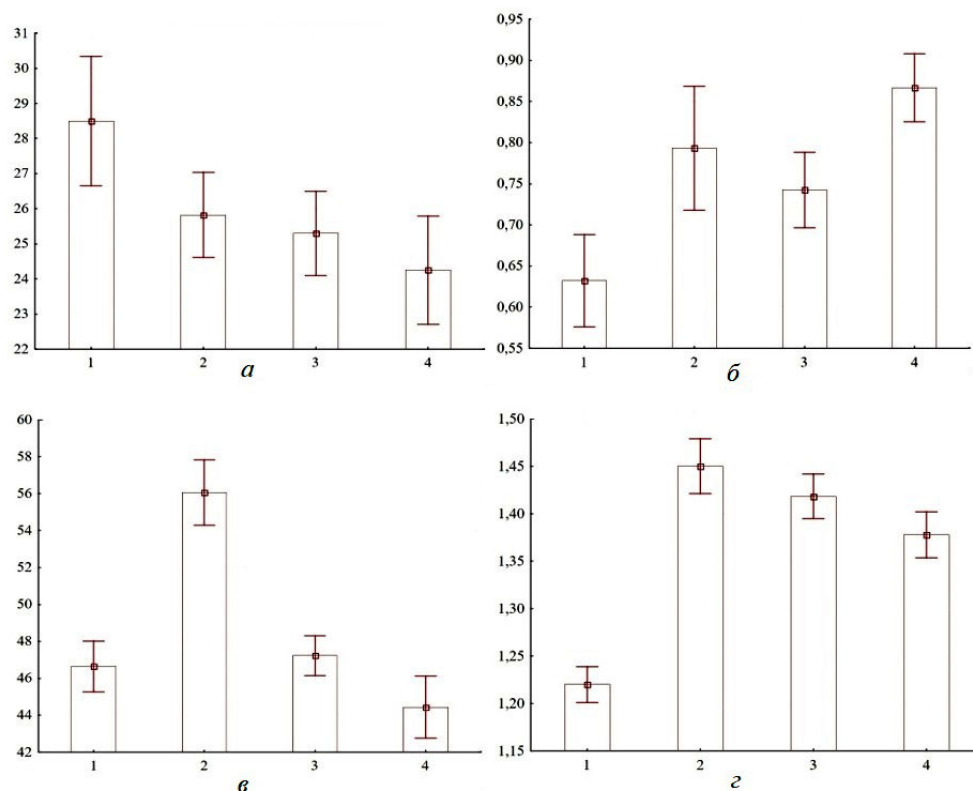


Рис. 2. Изменчивость морфометрических параметров (мм) сосны обыкновенной для высотных уровней 1–4 в Карачаево-Черкессии: *a* – длина; *б* – густота охвоения побега; *в* – длина хвои; *г* – ширина хвои

Fig. 2. Variability of morphometric parameters (mm) of *Pinus sylvestris* samples for altitudes 1–4 in the Karachay-Cherkess Republic: *a* – the shoot length; *б* – needle packing density of the shoot; *в* – needle length; *г* – needle width

Максимальная средняя длина побега наблюдается на высотном уровне 1, показатель постепенно уменьшается с увеличением высотного градиента. Отмечается вариация признака от 22,00 (Архыз и Даут-2) до 28,94 (Теберда, Даут-1) мм (табл. 3). Однако корреляционный анализ не выявил связи длины побега и высоты мест произрастания ($r = -0,18$ при $p \leq 0,005$). Густота охвоения, или индекс охвоенности побега (табл. 3), напротив, увеличивается с высотой местности ($r = 0,27$ при $p \leq 0,005$), варьируя от 0,63 шт./мм на высотном уровне 1 до 0,88 шт./мм на уровне 4 (Даут-2). Длина хвои на уровне 2 значительно превышает средние показатели других уровней, наблюдается слабая тенденция уменьшения длины хвои. На высотном уровне 1 отмечается наименьшая ширина хвои, на уровне 2 показатель достигает максимума, затем постепенно снижается, однако связи с высотой практически не выявлено ($r = 0,14$ при $p \leq 0,005$). Возможно, уменьшение длины хвои в условиях высокогорий компенсируется увеличением ее ширины и густоты охвоения с высотой, тем самым сохраняется площадь фотосинтезирующей поверхности. Средняя длина хвои сосны обыкновенной, произрастающей на Западном Кавказе, составляет 47,6 мм, что ниже на 14,6 мм в сравнении с данными для сосны Центрального Кавказа. Ширина хвои

сосны Западного Кавказа также в 1,5 раза меньше ширины хвои Центрального Кавказа [11]. При этом сохраняется общая закономерность уменьшения длины хвои и побега с увеличением высоты мест произрастания, хотя на Центральном Кавказе связь более тесно выражена [10]. Уменьшение длины и увеличение ширины хвои в горах Кавказа является адаптацией растения к экстремальным условиям, что согласуется с литературными данными [2, 6, 7, 12, 13, 20].

Таблица 3

Длина и охвоенность побега *Pinus sylvestris*, произрастающей на разной высоте в Карачаево-Черкесии
Length and needle packing of the shoots of *Pinus sylvestris* samples growing at different altitudes in the Karachay-Cherkess Republic

Выборка	Длина побега, мм	Индекс охвоенности, шт./мм	Масса 100 пар хвои, г	
			свежей	сухой
Теберда	28,49±1,80	0,63±0,05	4,43±0,06	2,23±0,02
Гоначхир	25,82±1,21	0,79±0,07	5,91±0,08	2,99±0,02
Архыз	22,08±1,09	0,72±0,08	5,84±0,08	2,46±0,01
Джамагат	24,86±1,64	0,66±0,08	5,22±0,05	2,57±0,03
Даут-1	28,94±2,07	0,83±0,05	6,06±0,06	2,75±0,02
Даут-2	22,32±2,07	0,88±0,06	5,22±0,08	2,41±0,02
Даут-3	26,65±2,20	0,84±0,05	5,45±0,09	2,75±0,02

Масса свежесобранной хвои сосны обыкновенной на территории Карачаево-Черкесии варьирует от 4,43 (Теберда) до 6,06 (Даут-1) г, масса в большинстве выборок – более 5 г (табл. 3). При высушивании масса 100 пар хвои уменьшается во всех выборках в 2 раза. Масса сухой хвои колеблется от 2,23 (Теберда) до 2,99 (Гоначхир) г. Увеличение сухой массы хвои связывают с накоплением крахмала в хлоропластах и рассматривают как адаптивную реакцию на неблагоприятные условия мест произрастания [3, 16]. Разность между массой свежей и сухой хвои отражает содержание в ней влаги, что, в свою очередь, характеризует влажность почвы корнеобитаемого слоя. Исходя из вышеизложенного, можно сделать предварительный вывод, что наиболее влажным микроклиматом отличается ПП Даут-1, возможно, из-за близкого расположения к реке по сравнению с другими.

Дисперсионный анализ массы свежей хвои сосны в высотном градиенте показал следующие результаты: высотный уровень 1 достоверно отличается от всех исследуемых высот на принятом уровне значимости ($p \leq 0,005$). По массе сухой хвои достоверно отличны между собой все высотные уровни, кроме уровней 3 и 4, которые близки между собой, что, вероятно, связано с небольшой разницей их альтитуд. Несмотря на выявленные различия между выборками, с высотой местности масса хвои, как свежей, так и сухой, не коррелирует ($r = 0,16$ при $p \leq 0,005$), что, однако, противоречит данным А.Г. Нордмайера [19].

По полученным результатам, продолжительность жизни хвои сосны на исследуемой территории в среднем составляет 3 года, за исключением выборки Даут-2, где хвоя держится на побегах только 2 года. Доли хвои того или иного возраста в разных выборках неодинаковые (рис. 3),

однако в процентном соотношении во всех выборках преобладает хвоя 1-го года (50 % и более), хвоя 2-го года – на 2-й позиции (до 40 %), далее, около 10 %, – хвоя 3 лет, т. е. количество хвои на побегах с возрастом уменьшается. Хвоя достигает 4-летнего возраста только в 2 выборках – Теберда (1 %) и Джамагат (4 %), тогда как на Центральном Кавказе доживает до 5–6 лет.

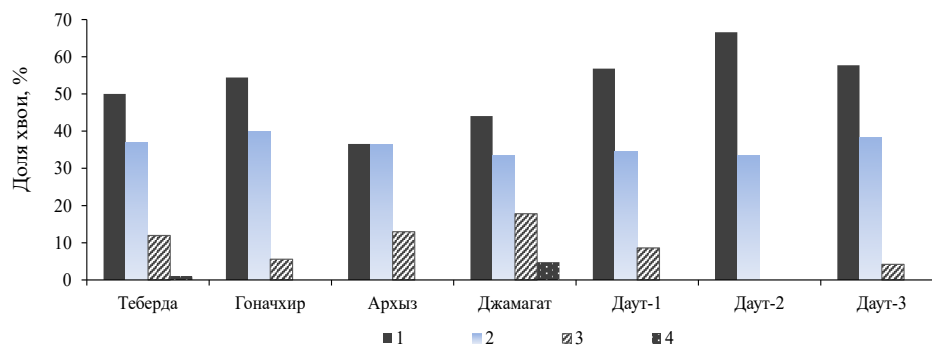


Рис. 3. Представленность (%) хвои сосны разного возраста (1, 2, 3 и 4-го годов) на территории Тебердинского национального парка

Fig. 3. Representation (%) of pine needles of different ages on the territory of the Teberda National Biosphere Reserve: 1 – first year; 2 – second year; 3 – third year; 4 – fourth year

Заклучение

Впервые на территории Карачаево-Черкесской республики получены данные изменчивости ассимиляционного аппарата сосны в условиях высокогорий Тебердинского национального парка:

1. Индивидуальная изменчивость средней длины хвои в выборках сосны обыкновенной соответствуют низкому и среднему уровням, ширины хвои – низкому уровню.

2. С повышением высотного градиента наблюдается уменьшение длины хвои и побега *Pinus sylvestris*. Взаимосвязи изменчивости ширины хвои сосны обыкновенной с высотным градиентом не выявлено.

3. Густота охвоения сосны обыкновенной увеличивается от 63 % на высотном уровне 1 (1300 м над ур. м.) до 88 % на уровне 4 (1900 м над ур. м.), с высотой местности показатель коррелирует слабо.

4. Масса свежей хвои (100 пар) сосны обыкновенной варьирует значительно, в большинстве выборок составляя более 5 г. Масса воздушно-сухой хвои уменьшается во всех выборках в 2 раза по сравнению со свежесобранной, изменяясь для разных высот места произрастания. Несмотря на выявленные различия, с высотой местности массы свежей и сухой хвои не коррелируют.

5. Возраст хвои в разновысотных выборках сосны в среднем составляет 2–3 года.

Полученные результаты для сосны обыкновенной на Западном Кавказе дополняют сведения об изменчивости ее ассимиляционного аппарата с высотным градиентом местности и подтверждают данные об увеличении размеров и массы хвои, а также уменьшении продолжительности жизни последней при продвижении ареала с севера на юг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абрамова Л.П., Залесов А.С.* Характеристика ассимиляционного аппарата предварительных культур сосны обыкновенной в зависимости от полноты березового древостоя // Леса Урала и хозяйство в них: сб. науч. тр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. Вып. 22. С. 149–151.

Abramova L.P., Zalesov A.S. Characteristics of the Assimilating Apparatus of Preliminary Cultivars of Scots Pine Depending on the Completeness of the Birch Forest Stand. *Forests of the Urals and Management in them: Collection of Scientific Papers*, Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University, 2002, iss. 22, pp. 149–151. (In Russ.).

2. *Бендер О.Г., Зотикова А.П., Бендер А.Г.* Морфоанатомические и ультраструктурные особенности хвои кедра сибирского на разных высотах произрастания в горах Алтая // Интеграция ботанических исследований и образования: традиции и перспективы: тр. междунар. науч.-практ. конф., Томск, 12–15 нояб. 2013 г. Томск: НИ ТГУ, 2013. С. 11–13.

Bender O.G., Zotikova A.P., Bender A.G. Morphological, Anatomical and Ultra structural Characteristics of Siberian Cedar Needles at Different Altitudes in the Altai Mountains. *Proceedings of the international scientific-practical conference «Integration of botanical research and education: traditions and prospects»*, 2013, Tomsk, 12–15 November, National Research Tomsk State University Publ., pp. 11–13. (In Russ.).

3. *Васфилов С.П.* Изменчивость сухой массы и содержание воды в хвое *Pinus sylvestris* (Pinaceae) // Ботан. журн. 2005. Т. 90, № 8. С. 1235–1247.

Vasfilov S.P. Variability in Dry Weight and Water Content of Cone of *Pinus sylvestris* (Pinaceae). *Botanicheskii Zhurnal*, 2005, vol. 90, no. 8, pp. 1235–1247. (In Russ.).

4. *Воробьева Ф.М., Малышев А.А., Ткаченко В.И.* Тебердинский заповедник. М.: Знание, 1970. 47 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер.: Наука о Земле; № 2).

Vorobyeva F.M., Malyshev A.A., Tkachenko V.I. *Teberda Reserve*. Moscow, Znanie Publ., 1970. 47 p. (In Russ.).

5. *Дышеков М.М., Братков В.В.* Экологические особенности лесных ландшафтов Карачаево-Черкесии // Изв. ДГПУ. Естеств. и точн. науки. 2008. № 3(4). С. 108–111.

Dyshekov M.M., Bratkov V.V. Ecological Features of Forest Landscapes of Karachay-Cherkessia. *Izvestiya Dagestanskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo universiteta = Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences, Estestvennyye i tochnyye nauki*, 2008, no. 3(4), pp. 108–111. (In Russ.).

6. *Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П.* Опыт построения бонитировочной шкалы местообитаний болотных сосняков южнотаежной подзоны Западной Сибири // Хвойные бореал. зоны. 2008. Т. 25, № 3–4. С. 269–276.

Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P. Experience of Constructing a Habitat Rating Scale for Bog Pine Forests in the Southern Taiga Subzone of Western Siberia. *Khvoynyye boreal'noy zony = Conifers of the Boreal Area*, 2008, vol. 25, no. 3-4, pp. 269–276. (In Russ.).

7. *Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г., Аврова А.Ф., Ефремов С.П.* Хвоя и побеги сосны обыкновенной на болотах как индикаторы типов условий произрастания // Krylovia. Сиб. ботан. журн. 2001. Т. 3, № 2. С. 106–113.

Efremova T.T., Ovchinnikova T.M., Sukhovolsky V.G., Avrova A.F., Efremov S.P. Coniferous Pine Needles and Shoots in Bogs as Indicators of Types of Growing Conditions. *Krylovia. Sibirskii Botanicheskii Zhurnal = Siberian Botanical Journal*. 2001, vol. 3, no. 2, pp. 106–113. (In Russ.).

8. *Мамаев С.А.* Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.

Мамаев S.A. *Forms of Intraspecific Variability in Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).

9. *Милютин Л.И., Новикова Т.Н., Тараканов В.В., Тихонова И.В.* Сосна степных и лесостепных боров Сибири. Новосибирск: Гео, 2013. 127 с.

Milutin L.I., Novikova T.N., Tarakanov V.V., Tikhonova I.V. *Pine of Steppe and Forest-Steppe Pine Forests of Siberia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2013. 127 p. (In Russ.).

10. Моллаева М.З. Морфометрические параметры ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в горах Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. Т. 4, № 4. С. 406–414.

Mollaeva M.Z. Morphometric Parameters of the Scots Pine Assimilation Apparatus in the Mountains of the Central Caucasus. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2021, vol. 4, no. 4, pp. 406–414. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821040082>

11. Моллаева М.З. Оценка изменчивости хвои *Pinus sylvestris* L. в контексте высотно-поясной структуры Кавказа // Теоретические и прикладные аспекты организации, проведения и использования мониторинговых наблюдений: материалы междунар. науч. конф., Минск, 9–10 марта 2023 г. Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 261–263.

Mollaeva M.Z. Assessment of Variability of *Pinus sylvestris* L. Needles in the Context of the Altitude-Belt Structure of the Caucasus. *Proceedings of the International Scientific Conference "Theoretical and Applied Aspects of the Organisation, Conduct and Use of Monitoring Observations". Minsk, 9–10 March, 2023*, Data-processing centre of the Ministry of Finance Publ., pp. 261–263. (In Russ.).

12. Наквасина Е.Н. Ассимиляционный аппарат как показатель адаптации сосны обыкновенной к изменению климатических условий произрастания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 3. С. 12–20.

Nakvasina E.N. Assimilatory Apparatus as an Indicator of Adaptation of Scots Pine to Changing Climatic Conditions of Growth. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 3, pp. 12–20. (In Russ.).

13. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 190 с.

Pravdin L.F. *A Scots Pine. Variability, Intraspecific Systematics and Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 190 p. (In Russ.).

14. Чернодубов А.И. Изменчивость морфолого-анатомических признаков сосны обыкновенной в островных борах юга Русской равнины // Лесоведение. 1994. № 2. С. 28–35.

Chernodubov A.I. Variability of Morphological and Anatomical Characters of *Pinus sylvestris* in Island Pine Forests of the Southern Russian Plain. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1994, no. 2, pp. 28–35. (In Russ.).

15. Androsiuk P., Urbaniak L. Differentiation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Populations in the Tatra Mountains Based on Needle Morphological Traits. *Biodiv Res Conserv*, 2006, vol. 3-4, pp. 227–231.

16. Łabiszak B., Lewandowska-Wosik A., Pawlaczyk E.M., Urbaniak L. Variability of Morphological Needle Traits of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) among Populations from Mountain and Lowland Regions of Poland. *Folia Forestalia Polonica, series A – Forestry*, 2017, vol. 59(2), pp. 134–145. <https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0013>

17. Ewers F.W., Schmid R. Longevity of Needle Fascicles of *Pinus longaeva* (Bristlecone Pine) and other North American Pines. *Oecologia Journal*, 1981, vol. 51, pp. 107–115. <https://doi.org/10.1007/BF00344660>

18. Urbaniak L., Lesiczka P., Gąsiorowska E., Pawlaczyk E.M., Androsiuk P., Lewandowska-Wosik A., Vončina G. Genetic and Phenotypic Relationships among *Pinus sylvestris* Populations in the Pieniny National Park. *Archives of Biological Sciences*. January 2017, pp. 1–17. <https://doi.org/10.2298/ABS170525045U>

19. Nordmeyer A.H. Phytomass in Different Tree Stands near Timberline. *Mountain Environments and Subalpine Tree Growth*. New Zealand Forest Service. Wellington: Forest Research Institute Technical Paper, 1980, no. 70, pp. 111–124.

20. Poljak I., Idžojt'c M., Vukovic M., Vidakovic A., Vukelic J. Variability of the Populations of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Northwestern Part of Mala Kapela According to the Morphological Characteristics of the Needles and Cones. *Šumarski List*, 2020, vol. 144, pp. 539–548. <https://doi.org/10.31298/sl.144.11-12.1>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*232; 582.475.4(470.51/.54)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-101-113

Выращивание культур кедр сибирского в условиях повреждаемости дикими животными

Г.Г. Терехов[✉], *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [AAC-8684-2020](https://orcid.org/0000-0002-2312-9224),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Е.М. Андреева, *канд. биол. наук*; *ResearcherID*: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

С.К. Стеценко, *канд. биол. наук*; *ResearcherID*: [AAD-2834-2020](https://orcid.org/0000-0002-4885-3817),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; terekhov_g_g@mail.ru[✉], e_m_andreeva@mail.ru, stets_s@mail.ru


Поступила в редакцию 18.01.22 / Одобрена после рецензирования 24.04.22 / Принята к печати 26.04.22

Аннотация. Исследования 26-летних культур кедр сибирского, созданного биогруппами (около 300 шт./га), по 2–5 растений через 4–9 сеянцев ели сибирской в ряду, показали, что повреждение лосями здесь значительно меньше, чем в изученных нами ранее чистых культурах кедр и культурах, смешанных с сосной обыкновенной. Доля биогрупп с поврежденными кедром составила 18 %, из них 1/3 – с повреждением всех деревьев. Наиболее выражено это в биогруппах с 4–5 кедром и при частом чередовании биогрупп в ряду. Живых кедров сохранилось 76 %, из них без повреждения стволика – 89,3 %, почти 2/3 (около 500 шт./га) находятся в кроне смежных с биогруппой деревьев ели. Длительное пребывание кедр в кроне ели негативно отражается на росте его осевого побега и кроны. Впервые для условий Среднего Урала нами предложен новый способ выращивания устойчивых производительных культур кедр сибирского с елью сибирской (возможно с елью европейской). Кедр высаживают биогруппами по 2–3 сеянца, начало их расположения строго с одной стороны участка. Первую биогруппу в нечетных рядах (1, 2, 3, 5 и т. д.) размещают через 3 сеянца ели от начала ряда, вторую и последующие биогруппы в этих рядах – через 9 сеянцев ели. В четных рядах (2, 4, 6, 8 и т. д.) первую биогруппу располагают через 9 сеянцев ели от начала ряда, сохраняя эту последовательность до конца ряда. Каждый ряд смешанных культур завершается не менее чем 3 сеянцами ели. При лесоводственных уходах сплошь удаляют естественное возобновление: хвойные породы – с помощью механических средств, а лиственные – путем кольцевания или инъекции экологически безопасных химических препаратов на водной основе. Это уменьшает либо исключает появление поросли и, соответственно, кормовую базу для диких животных. Ели, смежные с биогруппой кедр, вырубает при прочистке и прореживании, что создает возможность для роста кедр. На данный способ выращивания культур кедр сибирского с елью сибирской получен патент. Способ может быть внедрен в лесокультурную практику во всей таежной зоне, где выращивают кедр.

Ключевые слова: лесные культуры, кедр сибирский, ель сибирская, сохранность культур, повреждаемость культур лосями, схема закладки кедр

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Ботанического сада УрО РАН. Авторы выражают глубокую благодарность лесничему Новоуральского участкового лесничества Невьянского лесничества Н.И. Мосунову за помощь при проведении полевых исследований.

© Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Для цитирования: Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К. Выращивание культур кедров сибирского в условиях повреждаемости дикими животными // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 101–113. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-101-113>

Original article

Cultivating Siberian Stone Pine Plantations under Wild Animal Damage Conditions

Gennadiy G. Terekhov[✉], Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAC-8684-2020](https://orcid.org/0000-0002-2312-9224),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Elena M. Andreeva, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

Svetlana K. Stetsenko, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAD-2834-2020](https://orcid.org/0000-0002-4885-3817),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>

The Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; terekhov_g_g@mail.ru[✉], e_m_andreeva@mail.ru, stets_s@mail.ru

Received on January 18, 2022 / Approved after reviewing on April 24, 2022 / Accepted on April 26, 2022

Abstract. The research of 26-year-old mixed plantations of Siberian spruce and Siberian stone pine cultivated by biogroups of about 300 pcs/ha (2–5 stone pine seedlings alternating 4–9 spruce seedlings in a row) has shown that the damage rate by moose to them is much lower than to pure stone pine plantations or the mixed ones of Siberian stone pines and Scots pines we have studied before. The share of biogroups containing damaged stone pine trees is 18 %. A third of this number is plantations with damage to all the trees. This is most pronounced in biogroups of 4 to 5 stone pines as well as in case of frequent alternation of biogroups in a row. 76 % living stone pines have been preserved (89.3 % of them without damage to the stem). About two thirds of them (about 500 pcs/ha) grow in the crown of spruce trees adjacent to stone pine biogroups. Prolonged exposure to growing in a spruce tree crown negatively affects the growth of a stone pine's central shoot and crown. We are the first in the Middle Urals to propose a scheme for cultivating sustained productive mixed plantations of Siberian stone pines and Siberian spruce trees (or Norway spruce trees). Stone pines are planted in biogroups of 2–3 seedlings, beginning the planting strictly on one side of the site. The first biogroup in odd-numbered rows (1, 2, 3, 5, etc.) is planted after 3 spruce seedlings from the beginning of the row, the second and subsequent biogroups in these rows – after 9 spruce seedlings. The first biogroup in even-numbered rows (2, 4, 6, 8, etc.) is planted after 9 spruce seedlings from the beginning of the row, maintaining this sequence until the end of the row. Every row in mixed plantations is concluded with planting no less than 3 spruce seedlings. During silvicultural treatment procedures natural regeneration is completely removed: softwoods – by mechanical means, and hard woods – by ringing or injection of environmentally friendly water-based chemicals. These measures reduce or eliminate the appearance of coppice and, accordingly, food reserve for wild animals. Spruce trees adjacent to stone pine biogroups are cut down while lightening and thinning, which creates the possibility for the growth of stone pines. The proposed method for cultivating plantations of Siberian stone pines and Siberian



spruce trees has been patented. It can be introduced into silvicultural practice in the taiga zone where stone pines are grown.

Keywords: forest plantations, Siberian stone pine, Siberian spruce, plantation preservation, moose damage to plantations, Siberian stone pine plantation establishment scheme

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The authors express their deep gratitude to the forester of the Novouralsk district forestry of the Nevyansk forestry N.I. Mosunov for his assistance in field research.

For citation: Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. Cultivating Siberian Stone Pine Plantations under Wild Animal Damage Conditions. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 101–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-101-113>

Введение

Хвойные леса, в составе которых присутствует сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), далее по тексту – кедр, имеют очень обширный ареал, лежащий в основном на территории России. Небольшое участие кедр отмечаются также в горных северо-восточных частях Монголии, Китая [16]; кроме естественно произрастающего кедр, здесь есть культуры кедр сибирского [17, 19, 20]. В пределах Свердловской области общая площадь лесов, занятых чистым кедром сибирским либо с его значительным участием в составе древостоя, на 01.01.1993 г. насчитывала 710 тыс. га [7], через 20 лет, по данным С.В. Залесова с коллегами [2], – уже 651 тыс. га.

Менее всего кедровые леса сохранились в южной части области (подзона южнотаежных лесов). Здесь развивающаяся уральская металлургия в XVIII – 1-й половине XX в. требовала огромного количества древесного угля. Древостои, предназначенные для углежжения, в т. ч. с участием кедр сибирского, вырубали сплошь. В результате процесс активного возобновления вида нарушился из-за отсутствия приспевающих и спелых материнских деревьев, а также из-за уменьшающейся численности подроста и молодняка (до 80 лет). Кроме того, снижение возобновительной способности кедр обусловлено биотическими (кедровый орех – кормовой ресурс для огромного количества дикой зоофауны) и антропогенными (пастьба скота, хищнические способы сбора шишек населением, пожары) факторами. Также на вырубках и гарях формируется обильный травяной покров, с доминированием в составе злаковых видов, способствующих увеличению численности мышевидных грызунов, которые поедают как орешки, так и молодые кедр, а ежегодный плотный зимний опад препятствует развитию всходов кедр. С появлением лиственных молодняков происходит быстрое формирование сомкнутого древесного полога, резко ухудшающего экологические условия для кедр [1, 3, 4, 10, 11, 15, 16, 18].

Надежный способ восстановления кедр в составе южнотаежных лесов – введение его в культуры. Посадка чистых и смешанных с елью (*Picea obovata* Ledeb.) или сосной (*Pinus sylvestris* L.) культур кедр за последние 60 лет в Свердловской области проведена на площади около 7 тыс. га [14] по технологиям для других хвойных пород. Исследование многих участков культур кедр 1-го класса возраста (до 40 лет) показало их невысокую эффективность [12, 13]. Такое положение вида объясняется отсутствием нормативной базы по схемам смешения, технологиям создания культур кедр, формирования молодняков с его участием и прежде всего – отсутствием какой-либо защиты от воздействия диких животных.

Наибольший ущерб от них отмечен при посадке кедра в чистых либо смешанных с сосной культурах, которые в течение многих лет являются стабильной кормовой базой для нескольких поколений лосей [8]. В смешанных с сосной культурах кедры в большей степени повреждены, чем соседние сосны [13]. Хвоя кедра на стволе и ветвях расположена в пучках по 5 шт., она длиннее, темнее и значительно мягче. Одиночные кедры, и особенно группа деревьев кедра в культурах с сосной, ярко выделяются темным пятном в рядах, что увеличивает обнаружение их животными, которые скусывают концы ветвей и верхнюю часть стволика на высоте 0,5–2,6 м. Оставшаяся нижняя часть стволика с охвоенными ветвями сохраняет свою жизнеспособность. Через несколько лет у мутовчатых ветвей из центрального побега появляется по вершине. Из-за медленного роста они долгое время находятся в пределах досягаемости животных. Отросшие вершины при очередном нашествии лосей повреждаются, и все повторяется. Такие же повреждения лоси наносят кедром в чистых культурах. Кедры в 20-летних культурах имеют 3–5-кратное повреждение кроны и вершин, сосны – 2-кратное. Доля сосны без повреждений стволика в смешанных культурах составила 28–39 % (0,9–1,7 тыс. шт./га), кедра – 4,8–8,6 % (от 40 до 80 шт./га). Последние сохранились благодаря тому, что находятся в кроне сосны. В чистых 40-летних культурах доля кедров без повреждений стволика – 18,4 % [12].

Непоправимый ущерб кедром и сосне обыкновенной наносит также косуля сибирская. Косули, как и лоси, объедают ветви, скусывают или ломают вершины у деревьев на высоте ствола 0,5–1,5 м. У более взрослых кедров высотой до 6,0 м животные используют в пищу кору, обдирая ее вдоль ствола полосами (лентами) или полностью по всему периметру на высоте от 0,3 до 1,7 м, что вызывает отпад деревьев.

За последние 18 лет в Сухоложском лесничестве Свердловской области создано 2340 га культур сосны, но из-за сильного повреждения дикими животными, по данным В.В. Савина с коллегами [9], списано полностью 11,2 % от всех высаженных. Исследование нами 3 участков 16–20-летних культур кедра с участием сосны на территории данного лесничества рядом с Богдановичским охотничьим заказником выявило, что 57 % сосны и 97 % кедра имеют различные виды повреждений. Отпад деревьев ценных пород в культурах происходит постоянно. Таким образом, дикие животные на незащищенных участках чистых культур кедра или культур, смешанных с сосной, наносят огромный ущерб, сводя на нет усилия лесоводов по восстановлению долговечных хозяйственно ценных древесных пород. Этот процесс, по материалам инвентаризации, продолжается из года в год.

Современные рекомендации по защите ценных древесных пород от потравы дикими животными предлагают огораживать участки молодняков сеткой по всему периметру либо применять постоянно действующие отпугивающие средства. Оба мероприятия очень затратны, а эффект от них не всегда дает желаемый результат. Возможности установить виновных лиц и взыскать материальный ущерб в случае потравы лесных культур дикими животными из-за несовершенной законодательной базы пока нет. В сложившихся условиях для минимизации ущерба лесохозяйственному производству от воздействия диких животных следует ориентироваться на более надежные способы выращивания культур кедра, сосны и лиственницы.

Дикие животные крайне редко используют в пищу еловую хвою и ветви. Участки культур ели с отсутствием молодой поросли или отпрысков лиственных пород лоси почти не посещают, и, наоборот, при ее наличии их посещаемость возрастает. В этом случае у единичных елей отмечено повреждение молодых побегов и коры, сломанных стволиков нет [13]. Хвоя кедр имеет сходный цвет с елью – темно-зеленый, поэтому в смешанных культурах кедр при незначительном количестве деревьев в рядах менее заметен со стороны междурядий. Доля поврежденных лосями кедров здесь меньше в несколько раз по сравнению с чистыми либо смешанными с сосной культурами.

Цель работы – исследование сохранности, особенностей роста и формирования культур кедр сибирского с елью сибирской в составе.

Основная задача – поиск эффективного способа выращивания этой ценной многовековой древесной породы в условиях повреждаемости дикими животными.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стал участок (6,1 га) смешанных культур кедр с елью в ельнике-сосняке ягодниковом. Он находится в квартале 108 (выдел 13) Новоуральского участкового лесничества Невьянского лесничества. Территория расположена в подзоне южнотаежных лесов Среднего Урала [5]. Обработку почвы на 3-летней вырубке ограничили только расчисткой полос с помощью клина (КРП-2). Ширина минерализованной части – 2 м, межполосного пространства – 3,5–4,5 м. Посадка 3-летних сеянцев кедр и ели проведена под меч Колесова по центру полос, шаг посадки – 0,75 м. Общая исходная густота – 3330 шт./га, в т. ч. кедр – 1165 шт./га (35 %). Внутри рядов через 4–10 сеянцев ели высаживали сеянцы кедр биогруппой от 2 до 5 шт. подряд. Начало и окончание каждого ряда засаживали сеянцами ели (от 3 до 5 шт.). За культурами проведено 3 агротехнических и 2 лесоводственных ухода: осветление через 7 лет после посадки и прочистка через 18 лет. При прочистке вырубали сплошь только естественное возобновление. Участок оказался в аренде, и согласие арендатора на изреживание деревьев ели и кедр не получено.

Исследование 26-летних кедрово-еловых культур проводили на временных пробных площадях (ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки»), где учитывали естественное возобновление в междурядьях, количество кедров в биогруппах, определяли сохранность, состояние и рост деревьев каждой породы. Живые кедр в биогруппах разделяли по состоянию на 3 группы: 1) без механических повреждений ствола и межвидового угнетения (срединные деревья); 2) с повреждением центрального ствола лосем; 3) деревья в кроне ели (крайние в биогруппе), испытывающие угнетение от нее. Доля снеголомных (со сломанной вершиной) и снеговальных (дугообразный изгиб ствола) кедров крайне мала, поэтому они не рассматривались.

Статистическая обработка полученных данных проведена с применением программы Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

В таежных условиях на лесокультурных участках, в основном по междурядьям, активно возобновляются естественным путем хвойные и лиственные породы (сосна, лиственница, осина, береза, ива козья), которые в молодом возрасте являются (как сосна и кедр) основным кормовым ресурсом для лосей и

косуль. Через 8 лет после прочистки естественное возобновление лиственных пород в междурядьях смешанных культур распространилось неравномерно, в местах высокой сомкнутости крон ели оно отсутствовало. Среднее количество пневого поросли (стволиков) ивы козьей, березы повислой, липы сердцевидной высотой более 1 м – 2290 шт./га; корневых отпрысков осины – 290 шт./га. Некоторые деревья поросли и особенно отпрысков имеют давние повреждения стволика (залом) лосями. Преобладающая высота деревьев ивы – 3,3 м, березы – 2,4 м и осины – 3,0 м. Из кустарников присутствуют рябина, шиповник, ракитник. Семенное возобновление лиственных встречается очень редко, из хвойных отмечен только подрост ели – 160 шт./га (высотой 0,2–0,8 м). Чтобы снизить вегетативное возобновление лиственных деревьев и кустарников, являющихся кормовым ресурсом для диких животных, необходимо рубки ухода проводить способами, исключающими появление поросли и отпрысков.

Сохранность ели в 26-летних культурах высокая – 78 % (1665 шт./га). Ее отпад, по всей вероятности, произошел в начальный период после посадки, т. к. сломанных и сухих деревьев нет, но в рядах встречаются просветы (окна). Из-за отсутствия изреживания в рядах ель давно сомкнулась кронами с перекрытием ветвей одновременно 2–3 деревьев в ряду, образуя сплошную живую стену. Горизонтальная проекция кроны ели занимает 79–95 % территории, в междурядьях остались узкие просветы между кронами.

На участке смешанных культур отмечено от 260 до 320 (шт./га) биогрупп с 2–5 живыми кедррами. Доля биогрупп с разным количеством поврежденных лосями кедров оказалась в среднем 18 %, из них с повреждением всех кедров в биогруппе – около 1/3. Наиболее интенсивно кедр поврежден в биогруппах с 4 и 5 деревьями, здесь же наиболее выражен отпад экземпляров, у которых ствол сломан на высоте 0,5–1,8 м, нижние ветви без хвои. В биогруппах с 2 и даже 3 кедррами выявлена его наименьшая повреждаемость лосями (не более 4 % от общего количества биогрупп), особенно в местах с редким размещением биогрупп в рядах (через 7–9 елей).

Среднее количество живых кедров, в т. ч. со сломанным стволиком, но с охвоенными ветвями, – 885 шт./га (76 % от посаженных). Их расположение по территории участка близко к равномерному. Количество живых кедров, поврежденных лосями (ствол сломан, но ветви с живой хвоей) – 7,7 %, снегом (снеголом, снеговал) – 3,0 %. Без повреждения стволика оказалось 790 шт./га (89,3 %) кедров, но 2/3 (64 %) из них произрастают в кроне смежных елей (около 500 шт./га), такие кедрры почти не заметны со стороны междурядий. В этом случае верхняя часть стволика кедрра, находясь длительное время в кроне ели, вытягивается между мутовчатыми ветвями последней и приобретает изогнутую форму. Годичные приросты осевого побега кедрра здесь очень малы (3–5 см), его диаметр на высоте 3–4 м снижается до 1,0 см, охвоение стволика и кроны слабое.

Морфометрические показатели роста ели и кедрра в 26-летних смешанных культурах приведены на рис. 1, откуда видно, что высота, диаметр ствола и проекция кроны ели значительно превышают те же показатели у кедрра. Средний прирост побегов 1-го порядка у ели почти в 2 раза больше, чем у кедрра. Смыкание крон у большинства елей со смежными кедррами произошло в 8–10-летнем возрасте культур, а еще через 7–10 лет кроны этих елей достигли уже крон вторых деревьев кедрра внутри биогрупп. Апикальная точка роста крайних деревьев кедрра с обеих сторон биогруппы оказалась под кроной ели в 10–14-летних культурах.

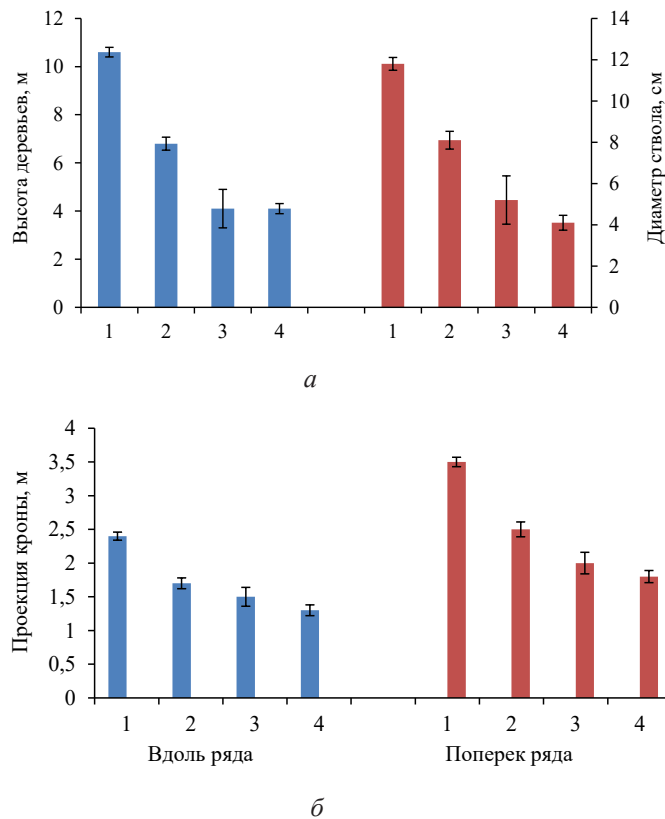


Рис. 1. Высота и диаметр (а), проекция кроны (б) ели и кедра в смешанных 26-летних культурах: 1 – ель; 2 – кедр без повреждений стволика; 3 – кедр с поврежденным центральным побегом; 4 – кедр в кроне ели

Fig. 1. Height and stem diameter of spruce and stone pine (a), spruce and stone pine crown projections (b) in mixed 26-year-old cultures: 1 – spruce; 2 – stone pine without the stem damage; 3 – stone pine with the damaged central shoot; 4 – stone pine in the crown of a spruce

Кроны обоих деревьев ели, растущих справа и слева от биогрупп с малым количеством кедра (2 шт.), в 26-летних культурах сомкнулись. Биогруппы с 2 кедром оказались перекрыты кроной ели с обеих сторон. Высота и проекция кроны елей, смежных с биогруппой, больше на 10–20 %, чем у 2, 3 и 4-й ели от биогруппы. Угнетение со стороны смежных елей испытывают в разной степени также центральные кедры в биогруппах с 3 и 4 деревьями. Из-за бокового затенения со стороны ели в последние 3 года у них замедлился текущий прирост стволика и центральных побегов кроны. В биогруппах с 5 кедром по 1–2 крайних дерева также оказались в кроне ели, но у центральных кедров, не поврежденных лосями, отмечены высокие текущие приросты осевого побега. Влияние ели на кедр здесь пока слабо выражено, поскольку в светлое время суток кроны центральных кедров затеняются непродолжительное время. У центральных кедров без повреждений высота и диаметр ствола были больше в

1,5–2,0 раза, а проекция кроны – на 31–37 % по сравнению с крайними, находящимися в кроне ели. Поврежденные лосями кедр (чаще срединные в биогруппе), имевшие по несколько вершин, значительно отстали в росте от деревьев без повреждения, однако годовые приросты стволиков кедров с несколькими вершинами больше в 2–3 раза, чем у кедр в кроне ели.

Ели, смыкаясь кронами с кедром, закрывают его от лосей. На определенном отрезке времени ель выполняет положительную роль, но далее начинает угнетать кедр, ухудшая его состояние и рост. Без изреживания ели в рядах до конца 1-го класса возраста ее негативное влияние будет усиливаться. Кедр сохранились в кроне ели от повреждения животными, но при этом у них образовались тонкие изогнутые стволики. После рубки (либо отпада) ели такие кедр окажутся открытыми. Под воздействием мокрого снега с ветром у них произойдет снеговал (дугообразный изгиб) или снеголом (слом стволика), что приведет к массовому отпаду деревьев. Здесь необходима разработка специального метода воздействия на ель, чтобы дать возможность кедру адаптироваться к новым условиям и сохранить его ствол.

На основании полученных материалов по данному участку и результатов многолетних исследований чистых и смешанных с сосной и елью культур кедр [12, 13] нами предложена научно обоснованная схема смешения, способ создания и формирования культуры кедр с елью в условиях повреждаемости первого дикими животными (рис. 2). Эти две лесобразующие древесные породы в таежной зоне часто встречаются вместе в составе естественных насаждений. С заготовкой семян и выращиванием посадочного материала обеих древесных пород проблем не бывает. Предлагаемый способ выращивания смешанных культур требует минимальных материальных затрат. Он позволит вырастить высокопродуктивные устойчивые долговечные искусственные дендроценозы, имеющие многоцелевое значение (ценная хвоя и древесина, долговечная лесосеменная база сбора товарного (семенного) кедрового ореха, в пригородных лесах – рекреационное значение). За счет зоофауны подрост кедр будет появляться далеко за пределами лесокультурных участков, обогащая видовой состав близлежащих лесов. Способ может быть успешно применен в зоне ареала кедр, где существует угроза его потравы дикими животными. Полученные результаты рекомендуется использовать при разработке стратегий по сохранению лесных ресурсов и увеличению биоразнообразия вне зоны ареала кедр. На новый способ выращивания смешанных культур кедр сибирского с елью сибирской получен патент [6].

Предлагаемый способ предусматривает следующее:

1. Культуры кедр с елью создают в еловых типах леса (чистых ельниках и смешанных с другими лесобразующими породами). Режим увлажнения почв – свежие, периодически сухие, устойчиво свежие, свежие периодически влажные. Смешение культур ели с кедром должно быть только в рядах по центру минерализованных полос, дну борозд, гряд. Ширина междурядий культур – 4–5 м. Размещение био групп – близкое к шахматному. Посадка кедр сближенными рядами в оба пласта плугов ПЛ-1, ПЛП-135 не допускается.

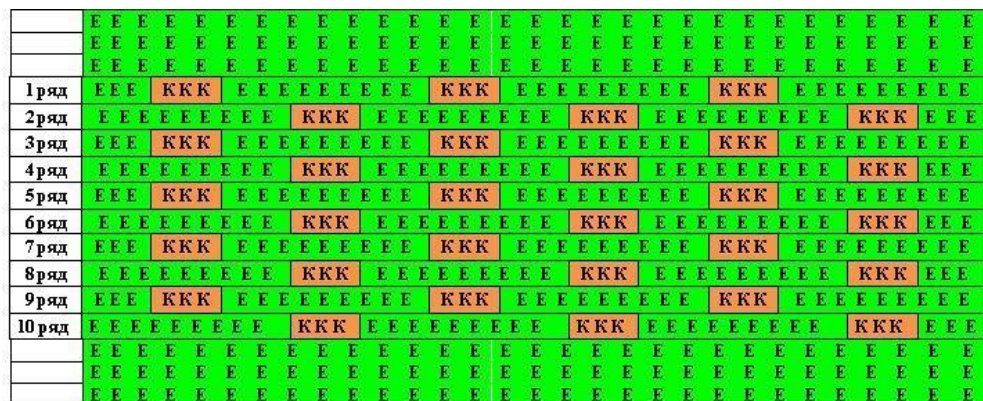


Рис. 2. Схема закладки смешанных культур ели сибирской (Е) с кедром сибирским (К) в условиях повреждаемости кедра дикими животными (лосями)

Fig. 2. Scheme for the establishment of Siberian spruce (E) and Siberian stone pine (K) mixed plantations at damage to Siberian stone pine by wild animals (moose)

2. Перед рядами ели с кедром создают защитную зону из 3 рядов чистой ели. В целях быстрой смыкания крон в защитных рядах шаг посадки 3–4-летних сеянцев ели – 0,75 м. После смыкания ели в рядах образуется живая изгородь, препятствующая проникновению лосей в междурядья участка и одновременно закрывающая кедр со всех сторон.

3. Для достижения равномерного расположения биогрупп с кедром, близкого к шахматному, посадку сеянцев в каждом ряду смешанных культур начинают только с одной стороны участка. В начале каждого нечетного ряда (1, 3, 5, 7, 9 и т. д.) смешанных культур высаживают 3 сеянца ели 3–4-летнего возраста. После сеянцев ели высаживают биогруппу из 2–3 сеянцев кедра 4–5-летнего возраста, затем снова 9 сеянцев ели и биогруппу сеянцев кедра (2–3 шт.). Такое чередование ели и кедра продолжается до конца каждого нечетного ряда, но завершается ряд посадкой не менее 3 сеянцев ели. В четных рядах (2, 4, 6, 8, 10 и т. д.) посадку первой биогруппы сеянцев кедра (2–3 шт.) проводят через 9 сеянцев ели от начала ряда и далее чередование биогрупп кедра сохраняется через 9 сеянцев ели до конца каждого ряда, каждый ряд завершается посадкой не менее 3 сеянцев ели. Шаг посадки ели и кедра в рядах – 1,0 м. При таком размещении ель в начале 2-го десятилетия будет прикрывать кронами кедр в рядах, тем самым снизится его привлекательность для лосей и повреждаемость ими, что обеспечит ему хороший рост и сохранность к моменту изреживания.

4. Осветление проводят в конце 1-го десятилетия путем сплошного удаления из междурядий естественно возобновившейся пихты, лиственницы и сосны с помощью механических средств, а осины, березы, ивы козьей и рябины – путем кольцевания или инъекции экологически безопасных химических препаратов на водной основе в комлевую часть ствола. Это вызывает усыхание молодых деревьев на корню (без удаления), что значительно уменьшает либо исключает появление от них поросли. Отсутствие кормовой базы снизит посещаемость лосями лесокультурных участков, следовательно, минимизируется воздействие животных на кедр. Одновременно с осветлением у смежных с биогруппой елей удаляют крону (от вершины ствола до поверхности почвы), растущую в сторону кедра.

5. При прочистке (в конце 2-го десятилетия) полностью удаляют теми же способами вновь возобновившиеся естественные деревья. Затем вырубает с обеих сторон от каждой био группы смежные ели с односторонней кроной и дополнительно изреживают ель в рядах. Валка ели должна быть вдоль рядов, без задевания био группы с кедром, а трелевка спиленных деревьев – строго по центру междурядий. Одновременно в био группах изреживают кедры, оставляя 1–2 здоровых дерева с высотой ствола не менее 3,5 м и симметричным расположением кроны. В результате этих двух приемов рубок ухода создаются благоприятные экологические условия для роста и развития надземной части и корневой системы кедров, что позволит им быстрее вступить в фазу семеношения.

6. Прореживание необходимо в конце 3-го десятилетия, его целью является сплошное удаление вновь появившегося естественного возобновления и рубка смежных елей с обеих сторон от био групп кедра, а также изреживание оставшейся ели в рядах. Одновременно выполняют изреживание кедра в тех био группах, где его ранее не проводили. Оставляют 1–2 лучших дерева. Расстояние между кронами кедров и ближайшими елями должно быть не менее 3 м. Отсутствие затенения елью кроны кедра обеспечит равномерное развитие последней во всех направлениях и более ранний срок начала образования репродуктивных органов кедра (шишек и кедровых орешков). В это же время необходимо провести равномерное изреживание ели в защитных рядах (полосах) по периметру участка.

Заключение

Изучение 26-летних смешанных кедрово-еловых культур показало их высокую сохранность (для ели – 78 % от исходной густоты, для кедра – 76 %) – 885 шт./га, в т. ч. без повреждения стволика – 790 шт./га. Количество поврежденных лосями био групп кедра (по 2–5 растений в каждой) между био группами ели незначительно – 18 % от общего числа. Наибольшая степень повреждения кедра дикими животными отмечена в био группах с 4–5 деревьями или при частом чередовании био групп.

Основные морфометрические показатели ели: высота и диаметр ствола, проекция кроны – превышают эти показатели у кедра в 1,5–3 раза, что обусловлено расположением 2/3 кедров (около 500 шт./га) в кронах елей, смежных с био группой кедра. Своим пологом ель закрывает кедр, но без своевременных рубок ухода угнетает его, сдерживая рост осевого побега и кроны.

Результаты, полученные по данному участку, а также наши предыдущие многолетние исследования кедра сибирского в чистых и смешанных культурах на территории лесной зоны позволяют предложить новый способ создания и выращивания данного вида в смешанных культурах с елью сибирской при минимизации воздействия диких животных на высокоценную породу. На этот способ получен патент. Он предусматривает новую схему смешения кедра с елью в рядах, совершенно другой подход (сроки, методы) к проведению лесоводственных мероприятий. В целях уменьшения проникновения животных на участок вокруг него (по всему периметру) создают защитную полосу из 3 рядов чистой ели с укороченным шагом посадки семян. Чтобы обеспечить после рубок ухода равномерное (близкое к шахматному) расположение кедров, при закладке культур ряды

кедра с елью размещают по всей территории участка строго через определенные расстояния (4–5 м). Соблюдение этих требований создает благоприятные условия для роста ствола и кроны ценной породы, ее стабильного семеношения и максимальной урожайности кедрового ореха. Данный способ выращивания кедра сибирского с елью сибирской может быть использован во всей зоне, где выращивают кедр сибирский в культурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Данченко А.М., Бех И.А. Перспективы освобождения кедрового подростка из-под полога других пород // Вестн. ТГУ. Сер.: Биология. 2010. № 1(9). С. 68–77.
Danchenko A.M., Beh I.A. Outlooks of Siberian Stone Pine Undergrowth Liberation Cuttings from Various Tree Canopy. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2010, no. 1(9), pp. 68–77. (In Russ.).
2. Залесов С.В., Секерин Е.М., Платонов Е.П. Анализ распространения сосны кедровой сибирской по территории Свердловской области // Современ. проблемы науки и образования. 2014. № 5. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14907> (дата обращения: 26.04.22).
Zalesov S.V., Sekerin E.M., Platonov E.P. Analysis of the Propagation of Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in Sverdlovsk Region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education, 2014, no. 5. (In Russ.).
3. Кирсанов В.А. Биолого-экологическая характеристика кедра сибирского как главного лесообразователя сибирских кедровых лесов // Воспроизводство кедровых лесов на Урале и в Западной Сибири: сб. науч. тр. ИЭРиЖ / отв. ред. Р.С. Зубарева, В.А. Кирсанов. Свердловск, 1981. С. 3–12.
Kirsanov V.A. Biological and Ecological Characteristics of Siberian Stone Pine as the Main Dorester of Siberian Cedar Forests. *Reproduction of Cedar Forests in the Urals and Western Siberia*. Sverdlovsk, 1981, pp. 3–12. (In Russ.).
4. Корзухин М.Д., Тер-Микаэлян М.Г. Конкуренция за свет и динамика модельных особей, независимо распределенных по плоскости // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. Л.: Гидрометеоздат, 1982. Т. 5. С. 242–248.
Korzukhin M.D., Ter-Mikaelyan M.G. Competition for Light and Dynamics of Model Individuals Independently Distributed over a Plane. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovanie ekosistem* = Problems in Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, vol. 5, pp. 242–248. (In Russ.).
5. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области: практ. рук. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.
Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Forest-Growing Conditions and Types of Forest in the Sverdlovsk Region: a Practical Guide*. Sverdlovsk, USC USSR Academy of Sciences, 1973. 176 p. (In Russ.).
6. Патент РФ 2770476 С1, СПК А01G23/00. Способ создания смешанных культур кедра в условиях повреждаемости дикими животными: № 2021129644: заявл. 12.10.2021: опубл. 18.04.2022 / Г.Г. Терехов, Е.М. Андреева, С.К. Стеценко.
Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. *Method for Cultivating Siberian Stone Pine Mixed Plantations Under Wild Animal Damage Conditions*. Patent RF, no. СПК А01G23/00. С1, 2022. (In Russ.).
7. Петухов Н.В., Нефедов А.А., Лобанов Н.А., Зотов Л.Н., Софронов Б.И. Основные положения организации и ведения лесного хозяйства Свердловской области. Екатеринбург, 1995. 525 с.

Petukhov N.V., Nefedov A.A., Lobanov N.A., Zotov L.N., Sofronov B.I. *Basic Provisions for Organizing and Maintaining Forestry in the Sverdlovsk Region*. Ekaterinburg, 1995. 525 p. (In Russ.).

8. Савин В.В., Белов Л.А., Залесов С.В., Шубин Д.А. Повреждаемость лесных культур лосями в Западно-Сибирском подтаежном лесном районе Алтайского края // Изв. Оренбург. ГАУ. 2017. № 1(63). С. 46–49.

Savin V.V., Belov L.A., Zalesov S.V., Shubin D.A. Damage of Forest Plantations by Moose in the West Siberian Subtaiga Forest District of the Altai Territory. *Izvestiya Orenburgskogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of Orenburg State Agrarian University, 2017, no. 1(63), pp. 46–49. (In Russ.).

9. Савин В.В., Зарипов Ю.В., Белов Л.А., Залесова Е.С., Шубин Д.А. Влияние лося и косули на сохранность лесных культур сосны и ели // Аграр. вестн. Урала. 2017. № 9(163). С. 52–57.

Savin V.V., Zaripov Yu.V., Belov L.A., Zalesova E.S., Shubin D.A. Effect of Elk and Roe on Forest Cultures of Pine and Spruce Conservation. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2017, no. 9(163), pp. 52–57. (In Russ.).

10. Судачкова Н.Е., Расторгуева Е.Я., Коловский Р.А. Физиология подростка кедра: Исследования в кедровнике Западного Саяна. М.: Наука, 1967. 123 с.

Sudachkova N.E., Rastorgueva E.Ya., Kolovsky R.A. *Physiology of Cedar Undergrowth*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 123 p. (In Russ.).

11. Танцырев Н.В., Андреев Г.В. Влияние конкуренции древостоя на возобновление и рост подростка кедра сибирского в березняке // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 2(50). С. 13–22.

Tantsyrev N.V., Andreev G.V. The Effect of Stand Competition on the Regeneration and Growth of Siberian Stone Pine Undergrowth in Birch Forest. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2021, no. 2(50), pp. 13–22. (In Russ.).

12. Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К. Оценка культур кедра сибирского в конце первого класса возраста // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 56–68.

Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K. Evaluation of Siberian Stone Pine Plantations at the End of the First Age Class. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 6, pp. 56–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-56-68>

13. Терехов Г.Г., Стеценко С.К., Андреева Е.М., Крюк В.И., Луганский В.Н. Особенности формирования чистых и смешанных культур кедра сибирского с сосной обыкновенной и елью сибирской на Среднем Урале // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 95–104.

Terekhov G.G., Stetsenko S.K., Andreeva E.M., Kryuk V.I., Lugansky V.N. Peculiarities of Formation of Clean and Mixed Plantations of Siberian Cedar with Scots Pine and Siberian Spruce on Middle Urals. *Lesotekhnicheskyy zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 95–104. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b24060e034156.02757256

14. Терехов Г.Г., Усольцев В.А., Луганский Н.А., Колтунова А.И. Состояние и рост культур кедра сибирского в подзоне южной тайги Среднего Урала // Изв. Оренбург. ГАУ. 2015. № 2(52). С. 13–16.

Terekhov G.G., Usoltsev V.A., Lugansky N.A., Koltunova A.I. The Siberian Pine Trees State and Growth in the South Taiga Subzone of Middle Urals. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of Orenburg State Agrarian University, 2015, no. 2(52), pp. 13–16. (In Russ.).

15. Eberhard J. Zur Frage der Naturverjungung von *Pinus Cembra* ssp. *Sibirica* in der Unteren Bergzone des Altai im Gebiet des Telezker Sees. *Archi Forstwesen*, 1966, Bd. 15, Nr. 5-6, pp. 617–628.

16. Farjon A. A Handbook of the World's Conifers. The Netherlands, Leiden, Brill Publ., 2010, vol. 2. 1111 p. <https://doi.org/10.1163/9789047430629>

17. Guangyi Z., Aiju H., Chuntain Y. Determination About Northwestern Area Limit of *Pinus koraiensis* and the Geographic Occurrence of *Pinus sibirica*. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, vol. 2, no. 1, pp. 42–47. <https://doi.org/10.1007/BF02874790>

18. Pukkala T. Methods to Describe the Competition Process in a Tree Stand. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1989, vol. 4, iss. 1, pp. 187–202. <https://doi.org/10.1080/02827588909382557>

19. Wang C. *Study on the Introduction and Seed Origin Experiment of Pinus sibirica*. Thesis for M.S. Northeast Forestry University, 2011, pp. 1–7.

20. Wolff R.L., Pedrono F., Pasquier E., Marpeau A.M. General Characteristics of *Pinus* spp. Seed Fatty Acid Compositions, and Importance of 5-Olefinic Acids in the Taxonomy and Phylogeny of the Genus. *Lipids*, 2000, vol. 35, no. 1, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11745-000-0489-y>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья
УДК 630*43(571.53)
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-114-125

Точка росы как основа оперативного показателя лесопожарной опасности

*Е.В. Болданова, канд. экон. наук, доц.; ResearcherID: [AGE-0460-2022](https://orcid.org/0000-0001-9630-6917),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-6917>*

Байкальский государственный университет, ул. Ленина, д. 11, г. Иркутск, Россия, 664003; boldanova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.22 / Одобрена после рецензирования 28.04.22 / Принята к печати 30.04.22

Аннотация. Проблема предупреждения лесных пожаров и своевременной мобилизации средств тушения стоит особенно остро в Иркутской области, где леса занимают значительные площади. Использование классических индексов оценки лесной пожарной опасности не всегда дает точные результаты при оперативном планировании мероприятий по пожаротушению. Цель исследования – разработка простого и эффективного показателя для прогнозирования возникновения лесных пожаров. В качестве объекта исследования выбраны лесничества Иркутской области, наиболее сильно пострадавшие от лесных пожаров. Решен ряд задач, связанных с характеристикой адекватности существующих методов, разработан более точный и простой показатель для местных условий, определены алгоритм расчета и шкала оценки класса пожарной опасности. В качестве исходных данных использованы открытые сведения архивов метеорологических наблюдений, данные Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства РФ. Применены методы кластерного и корреляционно-регрессионного анализа. Выявлена зависимость числа лесных пожаров от погодных условий на малонаселенных территориях. Периодичность циклов количества и площадей лесных пожаров составляет 3–4 года. Рассмотрены разные вариации расчета накопленного дефицита точки росы для прогноза количества и площадей лесных пожаров. Наиболее тесная корреляционная зависимость выявлена для показателя, рассчитываемого за 10 дн. Проанализирован зарубежный опыт оценки лесопожарной опасности по условиям погоды, сделано предположение о возможности частичного использования австралийского индекса FFDI. При расчетах не получено удовлетворительного результата, поэтому в качестве показателя лесной пожарной опасности предложено применять накопленный дефицит точки росы за 10 дн. Количество лесных пожаров отражается квадратичной зависимостью от данного показателя. Разработана шкала для оценки пожароопасности, адаптированная к шкале по индексу Нестерова. Описана последовательность расчета в среде MS Office Excel, что делает предложенный показатель подходящим для практического применения в лесничествах Иркутской области. Накопленный дефицит точки росы за 10 дн. позволит уточнять состояние лесопожарной опасности по метеоусловиям в соответствии с разработанной шкалой с помощью описанного алгоритма и макроса для расчета в Excel.

Ключевые слова: лесные пожары, индекс Нестерова, дефицит точки росы, шкала оценки пожароопасности, FFDI, лесопожарная опасность, Иркутская область

Для цитирования: Болданова Е.В. Точка росы как основа оперативного показателя лесопожарной опасности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 114–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-114-125>

Original article

Dew Point as a Basis for the Operational Indicator of Forest Fire Danger

Elena V. Boldanova, Candidate of Economy, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AGE-0460-2022](https://orcid.org/0000-0001-9630-6917),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-6917>
Baikal State University, ul. Lenina, 11, Irkutsk, 664003, Russian Federation;
boldanova@mail.ru

Received on January 25, 2022 / Approved after reviewing on April 28, 2022 / Accepted on April 30, 2022

Abstract. The problem of preventing forest fires and timely mobilization of extinguishing agents is particularly acute in the Irkutsk Region, where forests cover considerable areas. The use of classical indices for assessing forest fire danger does not always provide accurate results in the operational planning of fire extinguishing measures. The aim of this study is to develop a simple and effective indicator for predicting the occurrence of forest fires. The forestries of the Irkutsk Region, which were most severely affected by forest fires, were chosen as the object of this study. In the course of the study, it has been necessary to solve a number of problems, such as assessing the adequacy of the existing methods, developing a more accurate and simple indicator for local conditions, establishing the algorithm for calculating and the scale for assessing the fire danger class. As the initial data, the publicly available data from the meteorological observations archives and the data from the Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency (ISDM-Rosleskhoz) have been used. The methods of cluster analysis and correlation and regression analysis have been applied. The dependence of the number of forest fires on weather conditions in sparsely populated areas has been revealed. The frequency of the cycles of the number and area of forest fires is 3–4 years. Various options for calculating the accumulated dew-point deficit for predicting the number and area of forest fires have been considered. The closest correlation has been found for the indicator calculated over 10 days. Foreign experience in assessing fire danger according to weather conditions having been analyzed, an assumption has been made about the potential partial use of the Australian FFDI index. In the calculations, a satisfactory result has not been achieved. Therefore, it has been proposed to use the accumulated dew-point deficit over 10 days as an indicator of forest fire danger. The number of forest fires is described through the quadratic dependence on this indicator. A scale for assessing fire danger, adapted to the scale based on the Nesterov index, has been developed. For practical use, the calculation algorithm in MS Office Excel has been described, which makes it possible to apply the proposed indicator in the forestries of the Irkutsk Region. The indicator based on the accumulated dew-point deficit over 10 days will make it possible to check the state of forest fire danger according to weather conditions in accordance with the developed scale using the described algorithm and the macro for calculation in MS Excel.

Keywords: forest fires, the Nesterov index, dew-point deficit, fire danger rating scale, FFDI, forest fire danger, the Irkutsk Region



For citation: Boldanova E.V. Dew Point as a Basis for the Operational Indicator of Forest Fire Danger. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 114–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-114-125>

Введение

Для Иркутской области из года в год нарастает проблема лесных пожаров, неконтролируемого стихийного бедствия, пагубно отражающегося на экономике региона в целом и лесном комплексе в частности. В ближайшее десятилетие, согласно указу президента РФ, предстоит сократить площадь лесных пожаров в 2 раза по сравнению с уровнем 2021 г. Кроме того, к 2030 г. все лесные пожары должны ликвидироваться в течение первых суток. Для решения такой масштабной задачи необходимо использовать различные средства, в т. ч. показатели пожарной опасности для предупреждения лесных пожаров.

Возникновению пожаров способствуют разные факторы: климат, погода, влияющая на созревание лесных горючих материалов (ЛГМ), пирологические характеристики растительности, антропогенное воздействие [8, 9, 14]. В настоящем исследовании основное внимание было уделено погодным факторам.

Сопоставление метеорологических данных и сведений о лесных пожарах позволило разработать ряд показателей, таких как показатель В.Г. Нестерова [11], логарифмический показатель Г.П. Телицына [18], показатель влажности С.Н. Вонского [12], показатель влажности с учетом гигроскопичности мхов М.А. Софронова [14] и другие, основанные на усовершенствовании индекса Нестерова. Существует ряд источников, где предлагается использовать различные поправки к уже существующим показателям лесопожарной опасности с принятием во внимание сезона, состава растительности, скорости ветра, количества осадков [6, 10, 15, 16].

В зарубежной практике заслуживает внимания австралийский индекс пожарной опасности, представляющий собой экспоненциальную зависимость последней от влажности ЛГМ, относительной влажности воздуха, скорости ветра [22, 23]. В США национальная рейтинговая система пожарной опасности учитывает множество факторов, в т. ч. влагосодержание ЛГМ, скорость распространения огня, количество тепловой энергии при пожаре [21]. В Канаде рейтинговая система лесной пожарной опасности берет в расчет влажность ЛГМ, которая, в свою очередь, зависит от метеоусловий. Также учитываются антропогенный фактор и грозовая активность [26, 27]. Кроме использования данных метеослужб, для прогнозирования лесных пожаров все более широко применяются возможности геоинформационных систем [19, 20, 24].

Несмотря на большое количество исследований, посвященных прогнозированию лесных пожаров, разработанные методические подходы не лишены недостатков, при применении на практике вызывают ряд затруднений. Для российских условий это отсутствие всех необходимых для расчета данных и доступа сторонних пользователей к показателям Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз).

Цель исследования – разработка простого и эффективного показателя для прогнозирования лесных пожаров в лесах Иркутской области.

Задачи:

оценить возможности расчета существующих показателей пожароопасности в лесах, а также степень их точности;

на основе статистических данных найти более простой индекс пожароопасности для лесов Иркутской области;

предложить шкалу для оценки класса пожарной опасности и алгоритм определения индекса пожарной опасности в лесах Иркутской области.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступают лесничества Иркутской области. Регион является одним из крупнейших в России по площади лесов. Из года в год в области регистрируется значительное количество лесных пожаров, уничтожающих большие части лесных насаждений.

Предварительно сделан анализ влияния плотности населения на количество пожаров в лесах. Выбраны страны со схожими климатическими условиями и типами лесов – Россия, Канада и США. По данным мировой статистики, на этих территориях путем корреляционно-регрессионного анализа выявлена прямая зависимость между плотностью населения и числом лесных пожаров, а также обратная зависимость между плотностью населения и средней площадью лесных пожаров [2]. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что на территориях с низкой плотностью населения возгорание в лесах в большей степени зависит от погодных условий.

В России на основе кластерного анализа по показателям горимости, площади лесов, плотности населения и развитости транспортной инфраструктуры выделено 3 группы регионов, близких по проблемам лесных пожаров [1]. Наиболее сложная обстановка с количеством и площадями лесных пожаров наблюдается в группе с низкой плотностью населения и транспортной инфраструктуры. С помощью спектрального анализа установлено, что число и площадь лесных пожаров не одинаковы каждый год, а имеют период в 3–4 года [5], это также дает основание предположить о значительном влиянии погодных условий на возникновение лесных пожаров на малозаселенных территориях.

Для разработки оперативного показателя пожарной опасности по условиям погоды для Иркутской области взяты Баяндаевское, Качугское и Казачинское лесничества, где наблюдается большое число лесных пожаров, а также Иркутское лесничество с высоким показателем горимости [3].

Разработка оперативного показателя осуществлена по метеорологическим данным, представленным на сайте https://rp5.ru/Погода_в_Иркутской_области, а также по сведениям о количестве и площадях лесных пожаров по лесничествам Иркутской области, полученным в системе ИСДМ-Рослесхоз.

При выборе прогностического фактора возникновения лесного пожара проанализированы показатели температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности воздуха, количества осадков за сутки, в результате не найдено корреляционной связи с количеством и площадью лесных пожаров.

В ГОСТ Р 22.1.09–99 «Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров» указана необходимость использования индекса Нестерова для оценки степени пожарной опасности, поэтому решено обратиться к существующему индексу Нестерова для усовершенствования его в направлении повышения точности и простоты. Предложено вместо указанного индекса рассчитывать накопленный дефицит точки росы за 10, 15, 30 и 45 дн. Проведено сопоставление предложенных индексов с количеством и площадью крупных лесных пожаров за 2015–2016 гг. по лесничествам, прилегающим к г. Иркутску, с. Баяндаю, пос. Качугу и с. Казачинскому. Получены существенные показатели корреляционной связи, в среднем составляющие 0,75. Построены регрессионные модели, позволяющие прогнозировать количество и площадь лесных пожаров в зависимости от накопленного дефицита точки росы за различные периоды. Определены пороговые значения этого показателя для начала возгораний.

Проведено исследование по лесничествам Иркутской области, в которых наблюдались наибольшие количество и площадь лесных пожаров с 2012 по 2016 гг. В расчет были включены все пожары, от мелких до крупных. Выявлена наилучшая корреляционная зависимость числа и площади пожаров от накопленного дефицита точки росы за 10 дн.

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с результатами для оперативной оценки лесной пожарной опасности по условиям погоды автором статьи предлагается использовать накопленный дефицит точки росы за 10 дн., °С [4]:

$$d_{10} = \sum_{i=1}^{10} (T_i - r_i),$$

где T – температура воздуха (°С) в 8:00 и 20:00 по местному времени; r – точка росы в 8:00 и 20:00 по местному времени (°С); i – число дней до расчета оценки.

Более высокая точность регрессионных моделей наблюдается для данных накопленного дефицита точки росы, полученных в 11:00 и 14:00, но для оперативных расчетов автором статьи предложено использовать данные, фиксируемые в 8:00 и 20:00. Выявлена квадратичная зависимость количества и площади пожаров от накопленного дефицита точки росы за 10 дн. по пос. Куйтуну в 2012 г., г. Иркутску в 2015 г., г. Нижнеудинску в 2014 г. [1]. Зависимость в большинстве случаев описывается квадратичной параболой с резким подъемом вверх при $d_{10} > 150$ °С. Коэффициент детерминации в среднем составляет 0,66, что свидетельствует об объяснении 66 % изменений количества или площадей пожаров влиянием вариации d_{10} . Сравнение зависимостей числа и площадей лесных пожаров от индекса Нестерова и накопленного дефицита точки росы по Иркутску в 2015 г. приведено на рис. 1.

Связь количества и площадей лесных пожаров от накопленного дефицита точки росы имеет вид квадратичной зависимости, что можно наблюдать по данным для Куйтунского и Нижнеудинского лесничеств (рис. 2).

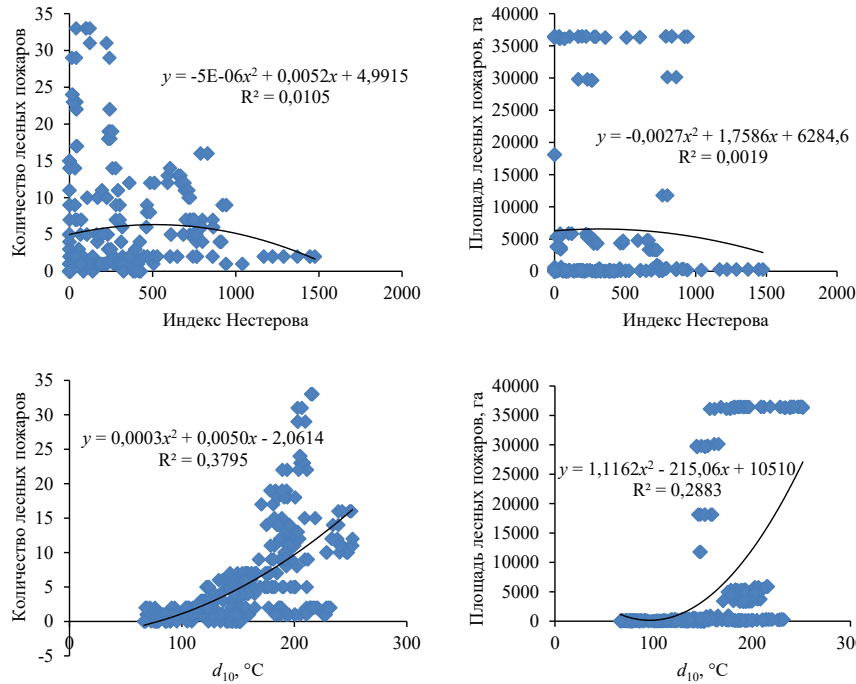


Рис. 1. Сравнение зависимостей числа и площадей лесных пожаров от индекса Нестерова и накопленного дефицита точки росы по Иркутску в 2015 г.

Fig. 1. Comparison of the dependencies of the number and area of forest fires on the Nesterov index and the accumulated dew-point deficit in Irkutsk in 2015

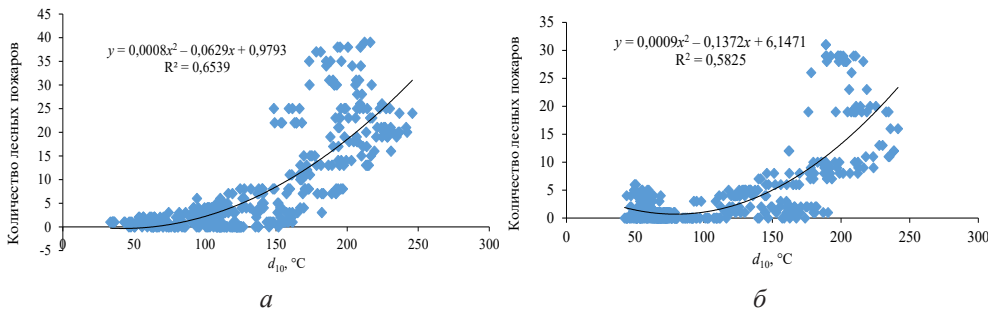


Рис. 2. Сравнение зависимостей числа лесных пожаров от накопленного дефицита точки росы по Нижнеудинску в 2014 г. (а) и Куйтуну в 2012 г. (б)

Fig. 2. Comparison of the dependencies of the number of forest fires on the accumulated dew-point deficit in Nizhneudinsk in 2014 (а) and in Kuitun in 2012 (б)

Из зарубежного опыта наиболее близок по используемым критериям индекс FFDI – ключевой инструмент для оценки лесопожарной опасности в Австралии [22, 23]. Канадская и североамериканская системы пожарной опасности многофакторные, строятся на использовании сети лесных пожарных метеостанций. Обязательным условием является измерение влажности ЛГМ, живых и отмерших. Для Иркутской области таких данных в открытом доступе нет. В австралийском индексе показатель ЛГМ также учитывается, остальные факторы относятся к метеоусловиям, определяемым и на российских метео-

станциях. Формула для расчета австралийского индекса лесной пожарной опасности выглядит следующим образом [22]:

$$FFDI = 2e^{(-0,45 + 0,987 \ln(DF) - 0,0345RH + 0,0338T + 0,0234v)},$$

где DF – доступность топлива, фактор засухи; RH – относительная влажность, %; T – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в 12:00 по местному времени; v – скорость ветра, км/ч.

Произведен расчет индекса FFDI без учета показателя DF , результаты оказались неудовлетворительными (рис. 3).

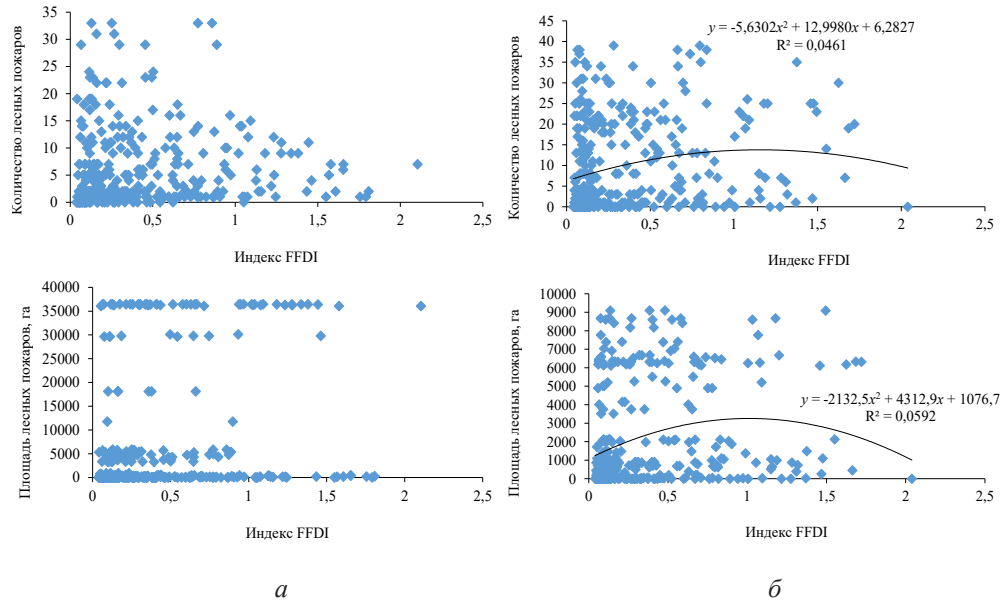


Рис. 3. Сравнение зависимостей числа и площадей лесных пожаров от индекса FFDI по Иркутску в 2015 г. (а) и Нижнеудинску в 2014 г. (б)

Fig. 3. Comparison of the dependencies of the number and area of forest fires on FFDI in Irkutsk in 2015 (а) and in Nizhneudinsk in 2014 (б)

Адаптация индекса FFDI для местных условий не дает удовлетворительного результата, коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,22-0,23$. Есть предположение, что в данном расчете важен отсутствующий коэффициент засухи (DF), который зависит от времени, прошедшего с момента последнего дождя, количества выпавших осадков и сухости почвы [25]. Отмечается, что зависимость FFDI от фактора засухи в уравнении очень близка к линейной [25]. Идея использовать простой индекс пожароопасности не нова. В основе решения – создание некоторого суррогата для оценки влажности ЛГМ. В частности, J. Sharples et al. [25] были рассмотрены австралийские, канадские, североамериканские индексы, которые в большинстве учитывали температуру, относительную влажность и скорость ветра. Для косвенной оценки влажности топлива использовались зависимости от температуры и относительной влажности воздуха. В нашем случае роль косвенного показателя влажности ЛГМ выполняет накопленный дефицит точки росы.

На основании полученных данных предложена шкала пожароопасности по показателю накопленного дефицита точки росы за 10 дн., адаптированная под существующую шкалу по индексу Нестерова (см. таблицу). Также разработан алгоритм расчета накопленного дефицита точки росы за 10 дн.

Шкала пожароопасности лесов по накопленному дефициту точки росы за 10 дн.
Forest fire danger rating scale based on the accumulated dew-point deficit over 10 days

Класс пожароопасности	Накопленный дефицит точки росы за 10 дн.	Пожарная опасность
I	до 50	Низкая
II	от 51 до 100	Ниже среднего
III	от 101 до 150	Средняя
IV	от 151 до 200	Высокая
V	свыше 200	Чрезвычайная

На основе приведенной шкалы становится возможным оценить класс пожароопасности. Для этого необходимо выполнить определенный алгоритм по обработке данных. Он применим на основе использования пакета MS Excel и доступа в интернет. Алгоритм следующий:

1. Определить ближайшую к интересующему району метеостанцию. Получить архив данных за последние 10 дн. с сайта https://rp5.ru/Погода_в_Иркутской_области в формате .xls (Excel).

2. Открыть файл с данными в Excel. Добавить столбец Time. Извлечь время из столбца «Местное время в...» с помощью «=ПРАВСИМВ(RC[-29];5)» (должен быть включен соответствующий формат ссылок формул). Скопировать формулу до конца столбца.

3. Добавить расчет столбца дефицита точки росы (T-Td). В первую ячейку столбца внести соответствующую формулу, например «=RC[-29]-RC[-8]». Скопировать формулу до конца столбца.

4. Выделить строку с подписями столбцов. На вкладке «Данные» в «Сортировка и фильтр» выбрать «Фильтр».

5. В заголовке столбца Time в фильтре оставить только 08:00 и 20:00.

6. С помощью функции автосуммы провести расчет значений в столбце T-Td.

7. В ячейку под суммой вставить формулу «=ЕСЛИ(R[-1]C<51; "низкая"; ЕСЛИ(R[-1]C<101; "ниже среднего"; ЕСЛИ(R[-1]C<151; "средняя"; ЕСЛИ(R[-1]C<201; "высокая"; "чрезвычайная"))))».

Данный алгоритм может быть реализован в виде макроса. Например:

```
Sub Макрос1()
ActiveWindow.LargeScroll ToRight:=0
Range("AD7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "T-Td"
Range("AD8").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-28]-RC[-7]"
Range("AD8").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("AD8:AD86")
Range("AD8:AD86").Select
Range("AE7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Time"
```

```

Range("AE8").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RIGHT(RC[-30],5)"
Range("AE8").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("AE8:AE86")
Range("AE8:AE86").Select
Range("AE7").Select
Selection.AutoFilter
Selection.AutoFilter
Rows("7:7").Select
Selection.AutoFilter
ActiveWindow.SmallScroll ToRight:=3
Range("AE7").Select
ActiveSheet.Range("$A$7:$AE$86").AutoFilter Field:=31,
Criteria1:="=08:00"
, Operator:=xlOr, Criteria2:="=20:00"
Range("AD87").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUBTOTAL(9,R[-79]C:R[-1]C)"
Range("AD88").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=IF(R[-1]C<51, ""низкая"",IF(R[-1]C<101, ""ниже среднего"",IF(R[-1]
C<151, ""средняя"",IF(R[-1]C<201, ""высокая"", ""чрезвычайная"")))"
Range("AD89").Select
End Sub

```

Предлагаемый показатель является еще одним инструментом для предупреждения возникновения пожаров. Ни один из показателей и мониторинговых систем не даст полного соответствия действительности, но в совокупности они повышают общую точность прогнозов возникновения пожаров в лесу. Пожар легче предупредить, чем потушить. Вопросы борьбы с лесными пожарами, их экологические последствия рассматривались разными авторами, в т. ч. Д.А. Ивановой [7], Г.Д. Русецкой и О.И. Горбуновой [13], А.П. Суходоловым с соавторами [17].

Заключение

Предложено использовать накопленный дефицит точки росы в 8:00 и 20:00 для оперативных расчетов в целях оценки лесопожарной опасности. Выявлена квадратичная зависимость количества и площади пожаров от накопленного дефицита точки росы за 10 дн. по пос. Куйтуну в 2012 г., г. Иркутску в 2015 г. и г. Нижнеудинску в 2014 г. Зависимость в большинстве случаев описывается квадратичной параболой с резким подъемом вверх в случае повышения накопленного дефицита точки росы за 10 дн. до значений более 150 °С. Коэффициент детерминации в среднем составляет 0,66, что свидетельствует об объяснении 66 % изменений количества или площади пожаров влиянием вариации накопленного дефицита точки росы за 10 дн.

На основании полученных данных разработана шкала пожароопасности лесов по накопленному дефициту точки росы за 10 дн., адаптированная под шкалу по индексу Нестерова. Предложен алгоритм расчета данного показателя.

Он может быть использован в лесничествах Иркутской области для более адекватного и быстрого определения класса пожарной опасности.

Дальнейшие исследования рекомендуется проводить с применением методов дистанционного зондирования, которые позволят получить дополнительную оперативную информацию о состоянии растительности, запасе влаги в листьях и почве. Пространственный анализ и мультитременные снимки дадут возможность более точного прогнозирования лесных пожаров. Совмещение данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений должно иметь синергетический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Болданова Е.В. Методические подходы к предсказанию возникновения лесных пожаров на примере Иркутской области // Евроазиатское сотрудничество: сб. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 14–15 сент. 2017 г. Иркутск, 2017. С. 30–37.

Boldanova E.V. Methodological Approaches to Predicting Forest Fires by the Example of the Irkutsk Region. *Eurasian Cooperation: Materials of the International Scientific and Practical Conference (Irkutsk, September 14–15, 2017)*. Irkutsk, 2017, pp. 30–37. (In Russ.).

2. Болданова Е.В., Давыдова Г.В. Лесные пожары в России, Канаде, США: динамика, тенденции, факторы // Актуальные тенденции развития мировой экономики: сб. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 15–16 марта 2016 г.: в 2 ч. Ч. 2. Иркутск, 2016. С. 12–20.

Boldanova E.V., Davydova G.V. Forest Fires in Russia, Canada, the United States: Dynamics, Trends, Factors. *Actual Trends in the Development of the World Economy: Materials of the International Scientific and Practical Conference (Irkutsk, March 15–16, 2016)*: in 2 parts. Irkutsk, 2016, part 2, pp. 12–20. (In Russ.).

3. Болданова Е.В., Давыдова Г.В. Влияние антропогенной нагрузки на возгорание лесов Иркутской области // Активизация интеллектуального и ресурсного потенциала регионов: новые вызовы для менеджмента компаний: сб. по материалам 2-й Всерос. конф., Иркутск, 19–20 мая 2016 г.: в 2 ч. Ч. 2. Иркутск, 2016. С. 55–59.

Boldanova E.V., Davydova G.V. Impact of Anthropogenic Load on Forest Fire of the Irkutsk Region. *Activation of Intellectual and Resource Potential of Regions: New Challenges for Company Management: Materials of the 2nd All-Russian Conference*: in 2 parts. Irkutsk, 2016, part 2, pp. 55–59. (In Russ.).

4. Болданова Е.В., Давыдова Г.В. Методические подходы к прогнозированию лесных пожаров Иркутской области // Активизация интеллектуального и ресурсного потенциала регионов: новые вызовы для менеджмента компаний: сб. по материалам 3-й Всерос. конф., Иркутск, 18 мая 2017 г. / науч. ред. С.В. Чупрова, Н.Н. Даниленко. Иркутск, 2017. С. 45–51.

Boldanova E.V., Davydova G.V. Methodological Approaches to Forecasting Forest Fires in Irkutsk Oblast. *Activation of Intellectual and Resource Potential of Regions: New Challenges for Company Management: Materials of the 3rd All-Russian Research Conference*. In S.V. Chuprov, N.N. Danilenko (eds.). Irkutsk, 2017, pp. 45–51. (In Russ.).

5. Давыдова Г.В., Болданова Е.В. Исследование динамики количества и площадей лесных пожаров в Иркутской области // *Global and Regional Research*. 2019. Т. 1, № 3. С. 241–246.

Davydova G.V., Boldanova E.V. Study of the Dynamics of the Number and Area of Forest Fires in the Irkutsk Region. *Global and Regional Research*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 241–246. (In Russ.).

6. Долгов А.А., Сумина Е.Н., Цомаева Д.С. Методология оценки лесопожарных рисков // Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов:

материалы науч.-практ. конф., Москва, 10–14 апр. 2008 г. М.: Моск. гос. ун-т природо-обустройства, 2008. Ч. 1. С. 97–103.

Dolgov A.A., Sumina E.N., Tsomaeva D.S. Methodology for Assessing Forest Fire Risks. The Role of Land Reclamation and Water Management in the Implementation of National Projects: *Materials of the Scientific and Practical Conference*. Moscow, Moscow State University of Environmental Engineering, 2008, part 1, pp. 97–103. (In Russ.).

7. Иванова Д.А. К вопросу об экологических проблемах лесов Байкальского региона: экономический аспект // Изв. БГУ. 2019. Т. 29, № 1. С. 24–31.

Ivanova D.A. On the Issue of Ecological Problems of the Baikal Region Forests: an Economic Aspect. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Baikal State University, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 24–31. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29\(1\).24-31](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(1).24-31)

8. Курбатский Н.П. Проблема лесных пожаров // Возникновение лесных пожаров. М.: Наука, 1964. С. 5–60.

Kurbatsky N.P. The Problem of Forest Fires. *The Occurrence of Forest Fires*. Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 5–60. (In Russ.).

9. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.

Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).

10. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды / сост. А.Л. Кац, В.А. Гусев, Т.А. Шабунина; Гидрометеорол. науч.-исслед. центр СССР. М.: Гидрометеоиздат. Моск. отд-ние, 1975. 16 с.

Kats A.L., Gusev V.L., Shabunina T.A. *Methodical Instructions on Forecasting of Fire Danger in the Woods under Weather Conditions*. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 16 p. (In Russ.).

11. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.

Nesterov V.G. *Combustibility of the Forest and Methods for its Determination*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1949. 76 p. (In Russ.).

12. Определение природной пожарной опасности в лесу: метод. рекомендации / ЛенНИИЛХ; сост. С.М. Вонский и др. Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. 52 с.

Vonsky S.N., Zhdanko V.A., Korbut V.I. *Estimating the Natural Fire Threat in a Forest*. Leningrad, LenNIILH Publ., 1981. 52 p. (In Russ.).

13. Русецкая Г.Д., Горбунова О.И. Реализация принципов устойчивого управления древесными ресурсами в лесах Иркутской области // Изв. БГУ. 2021. Т. 31, № 2. С. 248–261.

Rusetskaya G.D., Gorbunova O.I. Implementation of Sustainable Lumber Management Principles in Irkutsk Region. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Baikal State University, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 248–261. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2021.31\(2\).248-261](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2021.31(2).248-261)

14. Софронов М.А., Гольдаммер И.Г., Волокитина А.В., Софронова Т.М. Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, 2005. 322 с.

Sofronov M.A., Goldammer I.A., Volokitina A.V., Sofronova T.M. *Fire Danger in Natural Conditions*. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ., 2005. 322 p. (In Russ.).

15. Софронова Т.М., Волокитина А.В., Софронов М.А. Совершенствование оценки пожарной опасности по условиям погоды в горных лесах Южного Прибайкалья. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, Краснояр. пед. ун-т, 2007. 236 с.

Sofronova T.M., Volokitina A.V., Sofronov M.A. *Improvement of Fire Danger Rating According to Weather Conditions in Mountain Forests of the South Baikal Lake Basin*. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ., Krasnoyarsk Stated Pedagogical University named after V.P. Astafiev Publ., 2007. 236 p. (In Russ.).

16. Софронова Т.М., Волокитина А.В., Софронов М.А. Оценка пожарной опасности по условиям погоды в горных лесах Южного Прибайкалья // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 74–80.

Sofronova T.M., Volokitina A.V., Sofronov M.A. Assessing the Fire Hazard from Weather Conditions in Mountain Forests of the Southern Baikal Region. *Geography and Natural Resources*, 2008, no. 2, pp. 74–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2008.06.009>

17. Суходолов А.П., Сорокина П.Г., Лебедева А.В. Математическая модель борьбы с лесными пожарами в Восточной Сибири (на примере Иркутской области): вычислительные эксперименты в среде Julia // Изв. БГУ. 2019. Т. 29, № 3. С. 349–358.

Sukhodolov A.P., Sorokina P.G., Lebedeva A.V. Mathematical Model of Fight against Forest Fires in Terms of Irkutsk Oblast: Computational Experiments in Terms of the Julia Language. *Isvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Baikal State University, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 349–358. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29\(3\).349-358](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(3).349-358)

18. Телицын Г.П. Логарифмический показатель пожарной опасности для леса // Лесн. хоз-во. 1970. № 11. С. 58–59.

Telitsyn G.P. A Logarithmic Indicator of Forest Fire Danger. *Forestry*, 1970, no. 11, pp. 58–59. (In Russ.).

19. Castro R., Chuvieco E. Modeling Forest Fire Danger from Geographic Information Systems. *Geocarto International*, 1998, vol. 13, iss. 1, pp. 15–23. <https://doi.org/10.1080/10106049809354624>

20. Chuvieco E., Salas J. Mapping the Spatial Distribution of Forest Fire Danger Using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, vol. 10, iss. 3, pp. 333–345. <https://doi.org/10.1080/02693799608902082>

21. Cohen J.D., Deeming J.E. *The National Fire-Danger Rating System: Basic Equations*: Gen. Tech. Rep. PSW-82. US Department of Agriculture, Forest Service, Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1985. 16 p. <https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-82>

22. Dowdy A.J., Mills G.A., Finkele K., de Groot W. *Australian Fire Weather as Represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index*: Technical Report 10. Australia, Melbourne, The Centre for Australian Weather and Climate Research, 2009. 84 p.

23. Dowdy A.J., Mills G.A., Finkele K., de Groot W. Index Sensitivity Analysis Applied to the Canadian Forest Fire Weather Index and the McArthur Forest Fire Danger Index. *Meteorological Applications*, 2010, vol. 17, iss. 3, pp. 298–312. <https://doi.org/10.1002/met.170>

24. Sanabria L.A., Qin X., Li J., Cechet R.P., Lucas C. Spatial Interpolation of McArthur's Forest Fire Danger Index across Australia: Observational Study. *Environmental Modelling & Software*, 2013, vol. 50, pp. 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.08.012>

25. Sharples J.J., McRae R.H.D., Weber R.O., Gill A.M. A Simple Index for Assessing Fire Danger Rating. *Environmental Modelling & Software*, 2009, vol. 24, iss. 6, pp. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.004>

26. Turner J.A., Lawson B.D. *Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System: A User Guide to National Standards and Practices*. Canadian Forest Service Information Report BC-X-177, 1978. 40 p.

27. Wotton B.M. Interpreting and Using Outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in Research Applications. *Environmental and Ecological Statistics*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 107–131. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0084-2>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 004.896; 630*96

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-126-140

Сегментация перекрывающихся изображений деревьев на цифровых снимках лесных массивов

И.В. Петухов[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [A-9472-2014](https://orcid.org/0009-0000-2365-4857)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>

К.О. Иванов, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: [A-6724-2014](https://orcid.org/0000-0002-6395-4085)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6395-4085>

Д.М. Ворожцов, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: [JAN-6772-2023](https://orcid.org/0009-0005-8396-2778)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8396-2778>

А.А. Роженцов, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAU-8039-2020](https://orcid.org/0000-0003-0043-0070)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0043-0070>

Н.И. Роженцова, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: [JMD-0172-2023](https://orcid.org/0009-0006-4024-7886)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4024-7886>

Л.А. Стешина, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [JMC-9977-2023](https://orcid.org/0009-0006-1526-991X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; PetuhovIV@volgatech.net[✉], IvanovKO@volgatech.net, VorozhtsovDM@volgatech.net, RozhencovAA@volgatech.net, RozhencovaNI@volgatech.net, SteshinaLA@volgatech.net

Поступила в редакцию 11.06.23 / Одобрена после рецензирования 09.09.23 / Принята к печати 13.09.23

Аннотация. Применение систем поддержки принятия решений на основе компьютерного зрения и искусственного интеллекта значительно улучшает условия работы операторов технологических машин лесного комплекса, профессиональная деятельность которых связана с высокой интенсивностью и психоэмоциональными перегрузками. При помощи компьютерного зрения и искусственного интеллекта оператор легко и быстро может получить информацию о состоянии лесосеки и выбрать оптимальные решения для проведения рабочих операций. Это облегчает его труд и позволяет сократить время на поиск и анализ данных о лесосеке. При этом одним из ключевых элементов подобных систем является подсистема автоматической сегментации объектов на изображениях. Исследована возможность сегментации перекрывающихся объектов на изображениях лесных массивов с помощью сверточной нейронной сети на базе архитектуры Mask R-CNN. В отличие от большинства работ по схожим темам, используются цветные изображения, полученные с помощью RGB-камеры, а не лидара. Это создает перспективу снижения стоимости аппаратно-программных комплексов поддержки принятия решений операторами лесосечных машин. В качестве сегментируемых объектов выступают изображения ствола и кроны деревьев хвойных и лиственных пород, перекрывающихся друг друга. С помощью графического редактора GIMP выполнена ручная разметка цветных изображений, содержащих в общей сложности 134 дерева 4 различ-

© Петухов И.В., Иванов К.О., Ворожцов Д.М., Роженцов А.А., Роженцова Н.И., Стешина Л.А., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

ных пород: ель, осина, береза и сосна. С использованием разработанной базы данных поставлен эксперимент по дообучению сверточной нейронной сети Mask R-CNN сегментации перекрывающихся частей деревьев на цифровых снимках лесных массивов. При этом нейронная сеть была предварительно обучена с применением набора данных Microsoft COCO dataset, содержащего более 200 000 изображений 80 различных классов объектов, таких как люди, автомобили, животные и различные предметы. В процессе обучения нейронной сети изображения, подаваемые на ее вход, подвергались серии линейных и нелинейных геометрических преобразований, что позволило увеличить объем обучаемых данных в 11 раз. В итоге точность сегментации изображений стволов и крон хвойных и лиственных пород деревьев, перекрывающих друг друга, составила 79 %, что допускает использование нейронных сетей подобной архитектуры в системах поддержки принятия решений для операторов лесосечных машин.

Ключевые слова: глубокое обучение, искусственный интеллект, сверточная нейронная сеть, сегментация перекрывающихся объектов, система поддержки принятия решений для операторов лесосечных машин

Благодарности: Работа была поддержана грантом № 23-19-00568 РФФ.

Для цитирования: Петухов И.В., Иванов К.О., Ворожцов Д.М., Роженцов А.А., Роженцова Н.И., Стешина Л.А. Сегментация перекрывающихся изображений деревьев на цифровых снимках лесных массивов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 126–140. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-126-140>

Original article

Segmentation of Overlapping Tree Images in the Digital Photographs of Forest Areas

Igor V. Petukhov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-9472-2014](https://orcid.org/0009-0000-2365-4857),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>

Konstantin O. Ivanov, Candidate of Engineering; ResearcherID: [A-6724-2014](https://orcid.org/0000-0002-6395-4085),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6395-4085>

Dmitry M. Vorozhtsov, Candidate of Engineering; ResearcherID: [JAN-6772-2023](https://orcid.org/0009-0005-8396-2778),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8396-2778>

Alexey A. Rozhentsov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAU-8039-2020](https://orcid.org/0000-0003-0043-0070),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0043-0070>

Nataliya I. Rozhentsova, Candidate of Engineering; ResearcherID: [JMD-0172-2023](https://orcid.org/0009-0006-4024-7886),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4024-7886>

Ludmila A. Steshina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [JMC-9977-2023](https://orcid.org/0009-0006-1526-991X), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>

Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; PetuhovIV@volgatech.net[✉], IvanovKO@volgatech.net, VorozhtsovDM@volgatech.net, RozhencovAA@volgatech.net, RozhencovaNI@volgatech.net, SteshinaLA@volgatech.net

Received on June 11, 2023 / Approved after reviewing on September 9, 2023 / Accepted on September 13, 2023

Abstract. The use of decision support systems based on computer vision and artificial intelligence significantly improves the working conditions for the operators of technological machines in the timber sector, whose work implies high intensity and psycho-emotional

overload. By means of computer vision and artificial intelligence the operator can quickly and easily obtain the data on the state of the cutting area and adopt the optimal solution for holding the working operation. This facilitates his work and reduces the time spent searching and analyzing the data on the cutting area. Meanwhile, one of the key elements of such a system is a subsystem for automatic segmentation of objects in the photograph. We have explored the possibility of segmenting overlapping objects in the photographs of forest areas using a convolutional neural network based on the Mask R-CNN architecture. Unlike in most works on similar topics, the objects of this study are color photographs taken by an RGB camera rather than a lidar. This creates the prospect for reducing the cost of hardware and software systems used to support decision-making by the operators of logging machines. The images of the stems and crowns of coniferous and deciduous trees overlapping each other are the segmented objects under consideration. Using the GIMP graphic editor, we have manually marked the color photographs depicting a total of 134 trees of 4 different species: spruce, aspen, birch and pine. Utilizing the developed database, we have carried out an experiment to further train the Mask R-CNN convolutional neural network for segmentation of overlapping parts of the trees in the digital photographs of forest areas. The neural network has been pre-trained using the Microsoft COCO dataset containing more than 200,000 images of 80 different classes of objects such as people, cars, animals and various items. While training the neural network, the images supplied to its input were subjected to a series of various linear and nonlinear geometric transformations, which made it possible to increase the volume of training data by 11 times. As a result, the accuracy of segmentation of the images of the stems and crowns of coniferous and deciduous trees overlapping each other has reached 79 %, which allows the use of neural networks based on a similar architecture in decision support systems for logging machine operators.

Keywords: deep learning, artificial intelligence, convolutional neural network, segmentation of overlapping objects, decision support system for logging machine operators

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-19-00568.

For citation: Petukhov I.V., Ivanov K.O., Vorozhtsov D.M., Rozhentsov A.A., Rozhentsova N.I., Steshina L.A. Segmentation of Overlapping Tree Images in the Digital Photographs of Forest Areas. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 126–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-126-140>

Введение

Работа операторов технологических машин характеризуется высокой интенсивностью, психоэмоциональными перегрузками, необходимостью: соблюдения технологических норм и правил, тщательного контроля окружающей обстановки, достижения целевых показателей трудовой деятельности. В частности, оператору харвестера, особенно при проведении выборочных рубок, рубок ухода и т. п., необходимо определять и учитывать в работе таксационные показатели деревьев, их распределение по лесосеке, знать характеристики используемого оборудования, схему разработки лесосеки. Существенную помощь в этом могут оказывать средства поддержки принятия решений, базирующиеся на системах технического зрения и технологиях искусственного интеллекта [26].

В литературе описаны подходы к сегментации изображений деревьев в лесных массивах, однако данные подходы либо ориентированы на решение специализированных задач, связанных с дистанционным зондированием при использовании соответствующих ракурсов наблюдений (верхнебоковой) [3, 18,

19], либо требуют применения дополнительного оборудования (лидаров) [22, 27–30]. Исследования, посвященные сегментации перекрывающихся изображений деревьев по одиночным снимкам, отсутствуют. В связи с этим актуальной является задача разработки системы помощи операторам лесосечных машин, обеспечивающей возможность выделения единичных деревьев на изображении древостоя, изображений кроны и ствола для конкретного дерева, определения его породы, главных таксационных характеристик. Для решения подобных задач в настоящее время широко используются подходы на основе глубинного обучения.

Цель – разработка элементов подсистемы машинного зрения для системы поддержки принятия решений оператором лесосечных машин.

Объекты и методы исследования

Анализ 2D- и 3D-изображений лесных массивов является основой для выполнения технологическим оборудованием лесохозяйственных операций в автономном режиме [12]. Существующие системы обычно используют входные данные от лидарных датчиков для решения задач навигации, обнаружения деревьев и оценки диаметра, тогда как цифровые камеры в сочетании с алгоритмами глубокого обучения обычно решают задачи классификации видов или обнаружения лесных аномалий [9]. В любом из этих случаев недоступность данных для обучения и разнообразие лесов сдерживают применение методов глубокого обучения в целях создания автономных систем.

В области лесного хозяйства глубокое обучение привлекает большое внимание, поскольку может обеспечить решение таких проблем, как обнаружение деревьев, определение породного состава и оценка параметров древостоя [12]. Однако этот подход требует достаточного количества аннотированных изображений на этапе обучения.

В настоящее время создание обучающих наборов данных ведется в двух направлениях. Первый, наименее трудозатратный, – на основе синтетических изображений. Так, на ресурсе GitHub размещен аннотированный набор данных объемом 43 тыс. синтетических изображений. Как утверждают авторы, модель нейронной сети, обученная на этом наборе данных, достигает точности 90,4 % для обнаружения деревьев, 87,2 % для сегментации деревьев и оценки ключевых точек (см) [18]. Второй метод создания обучающих наборов данных – ручная сегментация реальных цифровых изображений. Метод является трудозатратным, и к созданию наборов данных привлекаются как IT-специалисты, так и специалисты в области лесного хозяйства. Их задача – сегментация изображений, которая заключается в фиксировании отдельно стоящих деревьев и составных частей этих деревьев, таких как ствол и крона. В ходе сегментации выполняется аннотирование изображения, т. е. присвоение каждому объекту определенных меток (названий). Решение задачи сегментации изображений осложняется тем, что некоторые породы трудно дешифрируются, если на изображении видна только часть дерева. Например, ствол осины сложно отличить от ствола березы, когда на изображении не видна крона.

Основное назначение инструментов ручной сегментации – предоставление возможностей для выделения интересующей области изображения и прикрепления к ней описания. Предварительный анализ изображений лесных массивов и

лесотаксационных материалов позволил определить количество классов объектов, которые можно отграничить при сегментации. Таким образом, исходя из возможного породного состава (18 пород) и того, что на изображении можно обозначить 2 части дерева (ствол и крону), количество классов объектов равно 36. Каждому классу объектов был присвоен свой цвет, и составлена цветовая схема для всех потенциально наблюдаемых объектов, представленная в таблице.

Цветовая схема классов объектов для сегментации изображений деревьев

The object class color scheme for segmentation of the tree images

Порода	Часть дерева	RGB цвета			Цвет
		R	G	B	
Сосна (Pinus)	Крона (Crown)	248	144	96	
	Ствол (Trunk)	248	64	0	
Ель (Picea)	Крона	208	96	200	
	Ствол	128	16	136	
Пихта (Abies)	Крона	184	168	232	
	Ствол	64	32	136	
Кедр (Pinus_sibirica)	Крона	248	88	88	
	Ствол	224	0	0	
Лиственница (Larix)	Крона	176	104	104	
	Ствол	128	0	0	
Дуб (Quercus)	Крона	128	128	128	
	Ствол	72	72	72	
Ясень (Fraxinus)	Крона	128	160	192	
	Ствол	0	0	128	
Клен (Acer)	Крона	208	144	160	
	Ствол	184	32	40	
Вяз (Ulmus)	Крона	224	112	0	
	Ствол	128	64	0	
Береза (Betula)	Крона	128	200	248	
	Ствол	24	144	248	
Осина (Populus_tremula)	Крона	136	200	160	
	Ствол	0	136	80	
Ольха серая (Alnus_incana)	Крона	168	240	72	
	Ствол	80	136	0	
Ольха черная (Alnus_glutimosa)	Крона	200	176	216	
	Ствол	112	32	168	
Липа (Tilia)	Крона	240	232	144	
	Ствол	248	248	0	
Ива (Salix)	Крона	248	160	208	
	Ствол	248	48	152	
Черемуха (Padus)	Крона	248	152	56	
	Ствол	200	96	0	
Рябина (Sorbus)	Крона	248	96	88	
	Ствол	184	16	0	
Яблоня (Malus)	Крона	248	152	136	
	Ствол	240	48	8	

Примечание: В скобках приведено название в программе; R – красный; G – зеленый; B – синий.

Для сегментации изображений использовался компьютерный графический редактор Gimp. В редакторе для каждого объекта отдельного дерева создавался слой, в котором обводились контуры данного объекта. Далее выполнялась заливка контура согласно цветовой схеме из таблицы. Так как изображение дерева состоит из объектов двух классов (ствол и крона), то для сегментации одного дерева может потребоваться создание двух слоев. При этом достаточно часто на изображении можно выделить только одну часть дерева: ствол или крону. Каждому создаваемому слою присваивалось имя, которое формировалось по следующему правилу: <порода>-<часть дерева>-<номер дерева>, например: Pinus-Trunk-5. Таким образом сформирован файл проекта, состоящий из набора слоев, количество которых соответствует количеству выделенных фрагментов. Данный подход позволяет видеть на изображении объекты, частично перекрываемые другими. На практике очень часто встречается перекрытие фрагмента ствола кроной того же или рядом растущего дерева, редко – стволом соседнего дерева. Пример создания многослойного файла представлен на рис. 1.









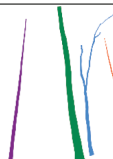





Часть дерева	Сосна	Ель	Береза	Осина	Все породы
Крона					
Ствол					
Дерево целиком					

Рис. 1. Послойное представление результатов сегментации

Fig. 1. The layered representation of segmentation results

В соответствии с описанной методикой была выполнена сегментация 13 изображений. Среднее количество пород на изображении – 2. Всего выделено 134 дерева 4 различных пород. Максимальное количество пород на изображении – 4. Минимальное – 1. На других подобных изображениях представлены чистые еловые насаждения, объем таких изображений составил 25 % от общего количества. Распределение числа деревьев по породам имеет следующий вид: сосна – 51 %; ель – 37 %; береза – 11 % и осина – 1 %. Общее количество выделенных объектов составило 196 шт., из них стволы – 61 %, кроны – 39 %. Полученные в ходе сегментации изображений данные не противоречат материалам лесоустройства по исследуемому участку. Пример сегментированного изображения приведен на рис. 2.



Рис. 2. Результаты ручной сегментации изображения

Fig. 2. The results of manual image segmentation

Исходя из результатов сегментации, возможно допустить применение автоматической сегментации деревьев (автоматического анализа изображений) в ходе проведения государственной инвентаризации лесов при условии, что апробация машинного обучения покажет высокую точность.

Как правило, в качестве результатов сегментации выступают пиксельные маски сегментированных объектов на изображении, цветные пиксели которых соответствуют сегментированным объектам, а черные – фону. В области компьютерного зрения и обработки изображений наибольшее распространение получили семантическая сегментация и сегментация экземпляров. Различия между ними демонстрирует рис. 3. Все 3 объекта на рис. 3, *а* – люди. При семантической сегментации все они будут классифицироваться как единый экземпляр. На рис. 3, *б* также есть 3 объекта (люди), но здесь разные объекты одного и того же класса выделены как разные экземпляры. Это пример сегментации экземпляров. Поскольку в нашей работе требуется, чтобы различные породы деревьев и их элементы отмечались как отдельные объекты, мы будем использовать сегментацию экземпляров.

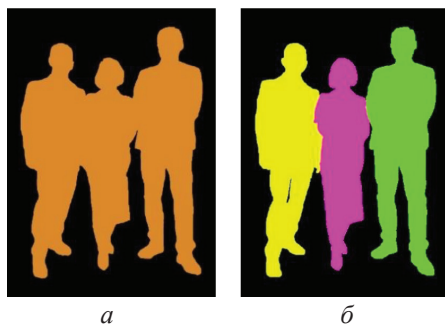


Рис. 3. Различия между семантической сегментацией (*а*) и сегментацией экземпляров (*б*) на изображении

Fig. 3. The differences between semantic segmentation (*a*) and instance segmentation (*b*) in the photograph

Наилучшую точность сегментации в настоящее время показывают различные методы глубокого обучения [11, 16, 20]. Среди преимуществ, которые предоставляют глубокие нейронные сети для сегментации объектов на изображении, следует отметить способность к обработке перекрывающихся объектов [6]. При этом одни из лучших результатов сегментации экземпляров

объектов на изображении показывают нейронные сети на базе современной архитектуры Mask R-CNN [14]. Они могут обнаруживать и сегментировать каждый объект независимо от наличия перекрытия, что делает их эффективными для решения задач сегментации в сложных сценах, поэтому данная архитектура нейронной сети была выбрана нами для сегментации частей деревьев.

Для обучения подобных нейронных сетей используются «большие» базы данных, в частности Microsoft COCO dataset [7], которая содержит более 200 000 изображений, охватывающих 80 различных классов объектов, таких как люди, автомобили, животные и различные предметы. Каждое изображение сопровождается подробной разметкой, включающей в себя координаты ограничивающего прямоугольника для конкретного объекта на изображении, класс объекта и маску сегментации, описывающую пиксели объекта. Такая база данных позволяет осуществлять обучение нейронных сетей сегментации объектов и далее проводить их дообучение на собственной небольшой базе данных изображений, содержащей объекты новых классов. Эта база данных также была использована нами для первичного обучения модели.

Алгоритм сегментации с использованием нейронной сети Mask R-CNN упрощенно можно представить в виде диаграммы, изображенной на рис. 4.



Рис. 4. Алгоритм получения бинарных масок объектов с помощью нейронной сети Mask R-CNN

Fig. 4. The algorithm for obtaining binary masks of the objects using the Mask R-CNN neural network

На шаге 1 для вычисления локальных признаков объектов используется сверточная нейронная сеть. При этом могут применяться нейронные сети различной архитектуры, такие как CNN ResNet-50/101, Feature Pyramid Network (FPN) или VGG16 [21]. Данные нейронные сети состоят из слоев свертки и слоев субдискретизации, работа которых иллюстрируется рис. 5.

В сверточном слое ко входному или к промежуточному многоканальному изображению применяются несколько операций 3-мерной свертки в формате построчной развертки. Как правило, размерность ядра свертки по высоте и ширине выбирается равной 3×3 или 7×7 пикс., при этом количество каналов яркости в ядре совпадает с числом каналов яркости обрабатываемого изображения. Результат каждой свертки сохраняется в отдельный канал изображения [2]. Например, если к цветному RGB-изображению, поданному на вход нейронной сети, применяется 32 операции свертки, то на выходе данного сверточного слоя будет 32-канальное изображение. На начальном этапе работы нейронной сети

значения в узлах ядер свертки выбираются случайным образом и корректируются с целью минимизации ошибки при обучении нейронной сети с помощью метода обратного распространения ошибки [1, 4, 5, 11, 13, 25]. Также следует отметить, что яркость изображения, полученная на выходе сверточного слоя, подвергается преобразованию с помощью нелинейной функции активации, в частности, в архитектуре VGG16 используется функция ReLu [8].

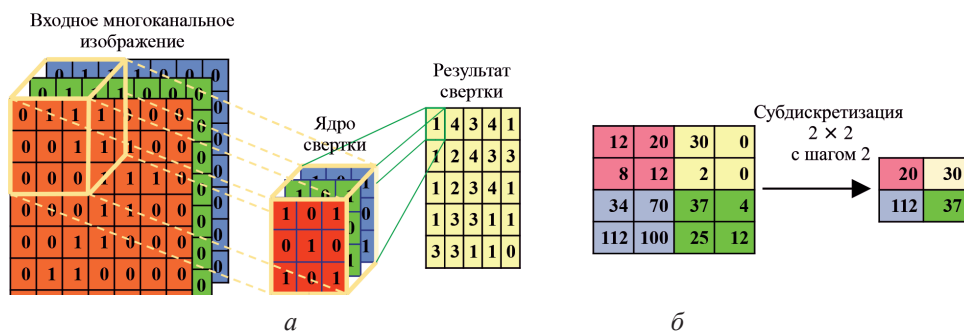


Рис. 5. Пример свертки с 3-мерным ядром (а) и операции субдискретизации изображения (б)
Fig. 5. An example of a 3D convolution (a) and an example of image subsampling operation (б)

Операция субдискретизации заключается в разбиении каждого канала изображения на равные области и выборе максимальной яркости из каждой области (рис. 5, б) [6, 23]. Пересечение областей изображения контролируется шагом субдискретизации: если он равен ширине и высоте области изображения, то перекрытия не происходит. Как правило, разрешение изображения на выходе слоя субдискретизации уменьшается в 2 раза, что видно из рис. 5, б. Схематичное изображение архитектуры нейронной сети VGG16, иллюстрирующее последовательность операций свертки и субдискретизации, представлено на рис. 6.



Рис. 6. Архитектура нейронной сети VGG16

Fig. 6. The VGG16 neural network architecture

На следующем шаге работы нейронной сети Mask R-CNN осуществляется поиск минимальных прямоугольных областей на изображении, содержащих объекты, которые надо сегментировать. Для этого используется метод Region Proposal Network (RPN) [10, 24]. В полученной карте признаков с выхода сверточной нейронной сети наращивается рецептивное поле с помощью сверточного слоя с ядрами $3 \times 3 \times 512$ пикс. При этом итоговая матрица не меняется в размерах. Далее с использованием сгенерированной карты признаков происходит поиск регионов, где могут содержаться объекты. В классическом варианте метода RPN для генерации карты признаков используется сверточная нейронная сеть VGG16.

Карта признаков изображения, полученная на выходе нейронной сети VGG16, в 16 раз меньше изначального размера изображения, при этом имеет 512 каналов яркости. Работа метода RPN основана на том, что каждой ячейке карты признаков может соответствовать область на исходном изображении, содержащая какой-либо объект. При определении размеров этой области для каждой ячейки карты признаков принимается $k = 9$ гипотез, что объект на исходном изображении находится в пределах области (якоре) размером 128×128 , 128×256 , 256×128 , 256×256 , 512×256 , 256×512 , 512×512 , 512×1024 , 1024×512 пикс. Обозначим данное множество гипотез как $H = \{h_0, h_1, \dots, h_8\}$, также отметим, что одной ячейке карты признаков на выходе нейронной сети VGG16 соответствует вектор размерности $c = 512$. Далее каждая ячейка карты признаков подается на два отдельных сверточных слоя с ядром свертки 1×1 пикс. и количеством выходных каналов \hat{c} .

Первый слой имеет параметр $\hat{c} = 2k$ и необходим для определения вероятности наличия или отсутствия какого-либо объекта для каждой гипотезы. То есть на выходе слоя для каждой гипотезы из множества H имеем пару значений вероятностей наличия и отсутствия объекта в якоре, размеры которого соответствуют текущей гипотезе h .

Второй слой имеет параметр $\hat{c} = 4k$ и необходим для вычисления точных параметров области, ограничивающей объект на изображении. На выходе данного слоя для каждой гипотезы из множества H имеем 4 значения – x, y, h, w (x, y – координаты центра области, четко ограничивающие объект на изображении по осям абсцисс и ординат соответственно; h, w – высота и ширина области соответственно).

Одна из гипотез из множества H принимается по максимальному значению вероятности наличия объекта внутри якоря, полученного на выходе первого сверточного слоя. При этом используется пороговое значение. Если вероятность наличия объекта меньше 0,7, то считается, что текущей ячейке из карты признаков не соответствует ни одна область с объектом на входном изображении. Точные параметры области, ограничивающей объект на входном изображении, берутся с выхода второго сверточного слоя для гипотезы с максимальной вероятностью. Упрощенная схема работы метода RPN представлена на рис. 7.

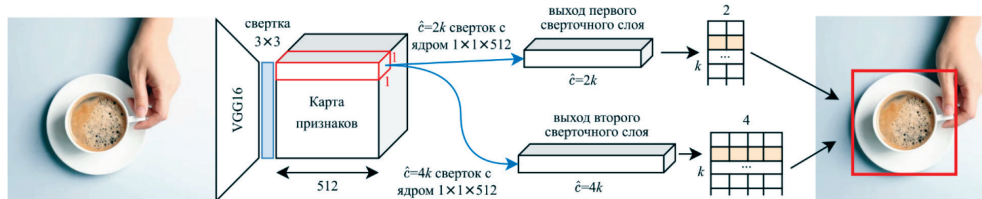


Рис. 7. Упрощенная схема работы метода RPN

Fig. 7. A simplified diagram of the RPN method

В нашем варианте нейронной сети Mask R-CNN для построения карты признаков изображения использована сверточная нейронная сеть FPN с параметрами, как в работе [31]. Карта признаков изображения, полученная на выходе данной нейронной сети, имеет в отличие от VGG16 256 каналов яркости.

Для классификации объектов изображения и выделения их бинарных масок на карте его признаков, полученной с выхода сверточной нейронной сети, обозначаются прямоугольные области, соответствующие прямоугольным областям на исходном изображении. Эти области приводятся к фиксированному размеру пикселей с помощью процедуры RoIAlign [14], в основе которой лежит билинейная интерполяция изображения. Модифицированные области поступают на вход последовательной нейронной сети для классификации объекта и на вход сверточной нейронной сети для генерации маски. Данный процесс иллюстрируется рис. 8.

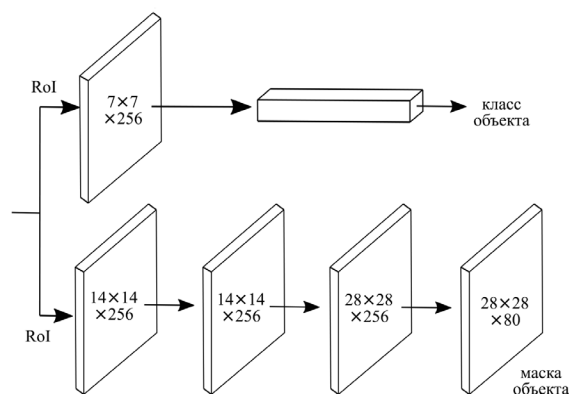


Рис. 8. Схема процесса генерации маски и классификации объекта в нейронной сети Mask R-CNN

Fig. 8. The diagram of the mask generation and object classification process in the Mask R-CNN neural network

Последовательная нейронная сеть содержит один слой, количество нейронов в котором равно числу распознаваемых классов, сверточная нейронная сеть имеет параметры, представленные на рис. 8.

Результаты исследования и их обсуждение

Мы использовали готовые весовые коэффициенты нейронной сети Mask R-CNN для библиотеки TensorFlow, обученной на базе данных Microsoft COCO dataset [7, 17]. К 80 классам объектов, для распознавания которых предназначена данная нейронная сеть, было добавлено еще 4: ствол лиственного дерева, ствол хвойного дерева, крона лиственного дерева, крона хвойного дерева. Дообучение нейронной сети осуществлялось с применением нашей базы данных, содержащей 13 размеченных изображений. При этом за счет различных преобразований изображений этот набор данных был увеличен в 11 раз. Каждое изображение зеркально отражалось по вертикали и горизонтали, поворачивалось на 45° и 90° , масштабировалось с коэффициентом масштабирования 0,5 по вертикали и 1,5 по горизонтали, подвергалось передискретизации с пропуском 1 пикс. по оси абсцисс, переводилось в градации серого, у всех изображений уменьшался оттенок и увеличивалась насыщенность – на 20 [15], случайным образом изменялась яркость в каждом канале в диапазоне от –10 до 10 по сравнению с исходным значением, инвертировались цветочные каналы, повышалась резкость. В итоге было получено 143 изображения, 110 из которых использовались для обучения нейронной сети, а 33 – для проверки. Коэффициенты нейронной сети корректировались всякий раз после подачи 5 изображений, нейронная сеть обучалась на 300 эпохах. Графики обучения нейронной сети представлены на рис. 9.

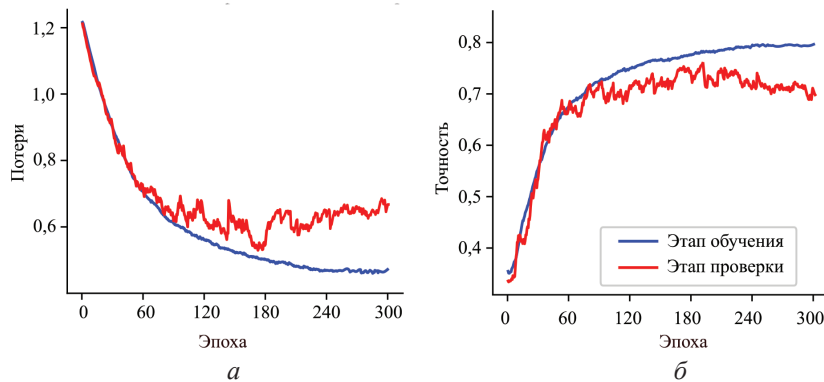


Рис. 9. Потери (а) и точность (б) нейронной сети Mask R-CNN при обучении сегментации перекрывающихся объектов на цифровых снимках лесных массивов

Fig. 9. The losses (a) and accuracy (б) of the Mask R-CNN neural network in training segmentation of overlapping objects in the digital photographs of forest areas

Из рис. 9 видно, что переобучение нейронной сети наступает в районе 240 эпохи, поскольку при дальнейшем обучении точность нейронной сети на этапе проверки не растет, а ошибка начинает увеличиваться. При этом точность сегментации объектов деревьев составила 79 %. Результат сегментации перекрывающихся объектов на цифровых снимках лесных массивов представлен на рис. 10.

Рис. 10. Результат сегментации перекрывающихся объектов на цифровых снимках лесных массивов

Fig. 10. The result of segmentation of overlapping objects in the digital photographs of forest areas



Заключение

Показана возможность использования нейронной сети Mask R-CNN для сегментации изображений элементов деревьев, перекрывающих друг друга, на цифровых снимках лесных массивов. При этом кроме стандартной процеду-

ры процесса сегментации объектов с помощью нейронной сети Mask R-CNN, включающей вычисление признаков изображения, обнаружение объектов, их классификацию и сегментацию, важным этапом является предварительное обучение модели на базе данных большого объема. В нашем случае в качестве подобной базы данных выступил набор изображений Microsoft COCO dataset. Предварительно обученная нейронная сеть Mask R-CNN позволяет осуществлять ее дообучение на собственной небольшой базе данных изображений, содержащей объекты новых классов. Для дообучения нейронной сети Mask R-CNN нами было использовано 143 изображения, при этом точность сегментации изображений стволов и крон хвойных и лиственных пород деревьев, перекрывающих друг друга, составила 79 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванов К.О. Классификация фрагментов электроэнцефалограммы по степени патологической значимости с помощью последовательных нейронных сетей // Вестн. ПГТУ. Сер.: Радиотехн. и инфокоммуникац. системы. 2022. № 4(56). С. 24–37.

Ivanov K.O. Classification of Electroencephalogram Segments Based on Pathological Significance Using Sequential Neural Networks. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems, 2022, no. 4(56), pp. 24–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.24>

2. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2022. 480 с.

Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep Learning. Dive into the World of Neural Networks*. St. Petersburg, Piter Publ., 2022. 480 p. (In Russ).

3. Портнов А.М., Иванова Н.В., Шашков М.П. Опыт использования нейронной сети DeepForest для детектирования деревьев в широколиственном лесу // Математическая биология и биоинформатика: докл. Междунар. конф. / под ред. В.Д. Лахно. Т. 9. Пушино: ИМПБ РАН, 2022. Ст. № e45.

Portnov A.M., Ivanova N.V., Shashkov M.P. Experience of Using the DeepForest Neural Network to Detect Trees in a Broad-Leaved Forest. *Proceedings of the International Conference "Mathematical Biology and Bioinformatics"*. Ed. V.D. Lakhno. Pushchino, IMPB RAS, 2022, vol. 9, art. no. e45. (In Russ). <https://doi.org/10.17537/icmbb22.12>

4. Тимофеев В.С., Сивак М.А. Робастная нейронная сеть с простой архитектурой // Сиб. журн. индустр. математики. 2021. Т. 24, № 4. С. 126–138.

Timofeev V.S., Sivak M.A. Robust Neural Network with Simple Architecture. *Sibirskiy zhurnal industrialnoy matematiki* = Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 126–138. (In Russ). <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2021.24.409>

5. Callan R. *The Essence of Neural Network*. Upper Saddle River: Prentice Hall Europe, 1998. 232 p.

6. Chollet F. *Deep Learning with Python: Second Edition*. New York, Manning Publications Co., 2021. 504 p.

7. COCO: Common Objects in Context. Available at: <https://cocodataset.org/#home> (accessed 17.01.23).

8. Daubechies I., DeVore R., Foucart S., Hanin B., Petrova G. Nonlinear Approximation and (Deep) ReLU Networks. *Constructive Approximation*, 2022, vol. 55, pp. 127–172. <https://doi.org/10.1007/s00365-021-09548-z>

9. Diez Y., Kentsch S., Fukuda M., Caceres M.L.L., Moritake K., Cabezas M. Deep Learning in Forestry Using UAV-Acquired RGB Data: A Practical Review. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 14, art. no. 2837. <https://doi.org/10.3390/rs13142837>
10. Girshick R. Fast R-CNN. *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448.
11. Goodfellow I., Benigo Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MIT Press Publ., 2017. 785 p.
12. Grondin V., Fortin J.-M., Pomerleau F., Giguère P. Tree Detection and Diameter Estimation Based on Deep Learning. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2023, vol. 96, iss. 2, pp. 264–276. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac043>
13. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation (3rd Edition)*. Hoboken: Prentice-Hall Inc., 2007. 938 p.
14. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 2980–2988.
15. *Imgaug*: a Library for Image Augmentation in Machine Learning Experiments. Available at: <https://imgaug.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 17.07.23).
16. Ivanov K.O., Kazarinov A.A., Rozhentsov A.A., Dubrovin V.N., Baev A.A., Evdokimov A.O. An Algorithm for Segmentation of Kidney Tissues on CT Images Based on a U-Net Convolutional Neural Network. *Biomedical Engineering*, 2023, vol. 56, pp. 424–428. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10249-z>
17. *Mask R-CNN for Object Detection and Segmentation*. Available at: https://github.com/matterport/Mask_RCNN (accessed 17.07.23).
18. Moussaid A., El Fkihi S., Zennayi Y. Tree Crowns Segmentation and Classification in Overlapping Orchards Based on Satellite Images and Unsupervised Learning Algorithms. *Journal of Imaging*, 2021, vol. 7, no. 241. <https://doi.org/10.3390/jimaging7110241>
19. Ochoa C.G., Caruso P., Ray G., Deboodt T., Jarvis T.W., Guldán S.J. Ecohydrologic Connections in Semiarid Watershed Systems of Central Oregon USA. *Water*, 2018, vol. 2, no. 10, art. no. 181. <https://doi.org/10.3390/w10020181>
20. Pointer I. *Programming PyTorch for Deep Learning: Creating and Deploying Deep Learning Applications*. O'Reilly Media Inc., 2019. 217 p.
21. Qassim H., Verma A., Feinzimer D. Compressed Residual-VGG16 CNN Model for Big Data Places Image Recognition. *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2018, pp. 169–175.
22. Qianwei L., Weifeng M., Jianpeng Z., Yicheng L., Dongfan X., Jinliang W. Point-Cloud Segmentation of Individual Trees in Complex Natural Forest Scenes Based on a Trunk Growth Method. *Journal of Forestry Research*, 2021, vol. 32, pp. 2403–2414. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01303-1>
23. Rao D., McMahan B. *Natural Language Processing with PyTorch: Build Intelligent Language Applications Using Deep Learning*. O'Reilly Media Inc., 2019. 254 p.
24. Ren S., Kaiming H., Ross G., Jian S. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *NIPS'15: Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Great Britain, Oxford, December, 2015, vol. 1, pp. 91–99.
25. Rojas R. The Backpropagation Algorithm. *Neural Networks*, 1996, pp. 149–182. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61068-4_7
26. Tarasova A., Strielkowski W., Larionova N. Digital Relations and Innovative Ecosystem for Sustainable Engineering Education: A Case of Russia. *Increasing Supply Chain Performance in Digital Society*. IGI Global, 2022, pp. 304–318.
27. Wang D., Liang X., Mofack II G., Martin-Ducup O. Individual Tree Extraction from Terrestrial Laser Scanning Data via Graph Pathing. *Forest Ecosystems*, 2021, vol. 8, no. 67. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00340-w>

28. Weinstein B.G., Graves S.J., Marconi S., Singh A., Zare A., Stewart D. A Benchmark Dataset for Canopy Crown Detection and Delineation in Co-Registered Airborne RGB, LiDAR and Hyperspectral Imagery from the National Ecological Observation Network. *PLoS Computational Biology*, 2021, vol. 7, no. 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009180>

29. Windrim L., Bryson M. Detection, Segmentation, and Model Fitting of Individual Tree Stems from Airborne Laser Scanning of Forests Using Deep Learning. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 9, art. no. 1469. <https://doi.org/10.3390/rs12091469>

30. Xu X., Iuricich F., Floriani L.D. A Topology-Based Approach to Individual Tree Segmentation from Airborne LiDAR Data. *GeoInformatica*, 2023, vol. 27, pp. 759–788. <https://doi.org/10.1007/s10707-023-00487-4>

31. Yang Z., Dong R., Xu H., Gu J. Instance Segmentation Method Based on Improved Mask R-CNN for the Stacked Electronic Components. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 6, art. no. 886. <https://doi.org/10.3390/electronics9060886>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-141-151

Теоретическое обоснование державшей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов

С.В. Посыпанов[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

К.В. Козлов, аспирант; *ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.posypanov@narfu.ru[✉], kozlovkonstantin94@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.23 / Одобрена после рецензирования 23.09.23 / Принята к печати 26.09.23

Аннотация. Лесотранспортная эксплуатация малых и средних рек обеспечивает экономическую доступность древесного сырья, находящегося на большом удалении от потребителей. Для этих рек типичны непродолжительность использования лесосплавных объектов, перемещение их с одного места на другое. На данных объектах наиболее подходящим представляется применение мобильных наполняемых опор. Приведено краткое описание их конструкции, монтажа и демонтажа. Изготовление и эффективное использование таких опор требует соответствующего обоснования их параметров, в частности державшей силы. Цель исследования – разработка научных основ для определения державшей силы и эффективного применения указанных опор. Выполнено теоретическое обоснование процесса взаимодействия предлагаемой нами опоры с грунтовым массивом. На базе этого обоснования разными способами получены 2 альтернативные формулы для установления державшей силы, обеспечиваемой одной секцией грунтозацепов. Вычисления по этим формулам дают близкие результаты. Примерно одинаковы в них и зависимости державшей силы от определяющих факторов, к которым относятся вертикальная нагрузка на секцию грунтозацепов, передаваемая от наполняемых емкостей, коэффициент трения материала опоры по грунту, плотность грунта, его коэффициент внутреннего трения, глубина внедрения грунтозацепов в грунт. Похожие свойства формул позволяют считать их достоверными. Общая державшая сила опоры рассчитывается по массе наполняемых емкостей, державшей силе одной секции грунтозацепов и их количеству. Установлены степень и характер влияния определяющих факторов на державшую силу мобильной наполняемой гравитационно-анкерной опоры. Увеличение любого из них приводит к возрастанию державшей силы. Наиболее значимым фактором является вертикальная нагрузка на секцию грунтозацепов. Зависимость от нее державшей силы линейная. В меньшей степени влияют (в порядке убывания) угол внутреннего трения грунта, коэффициент трения материала опоры по грунту, его плотность. Размеры грунтозацепов в реальных диапазонах их изменения воздействуют незначительно, но сам факт их наличия обеспечивает ощутимую долю державшей силы опоры.

Ключевые слова: лесосплав, опора, мобильная опора, наплавные сооружения, крепление плотов, державшая сила

Для цитирования: Посыпанов С.В., Козлов К.В. Теоретическое обоснование державшей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 141–151. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-141-151>

Original article

Theoretical Justification of the Holding Power of a Mobile Anchor for Holding Timber-Rafting Objects

Sergey V. Posypanov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Konstantin V. Kozlov, Postgraduate Student; ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.posypanov@narfu.ru[✉], kozlovkonstantin94@gmail.com

Received on June 29, 2023 / Approved after reviewing on September 23, 2023 / Accepted on September 26, 2023

Abstract. Exploitation of small and medium-sized rivers for wood transportation ensures the economic availability of wood raw materials located at a great distance from consumers. Short-term operation of timber rafting facilities and their movement from one place to another is typical for these rivers. At such facilities, the use of mobile fillable anchors is considered to be the most appropriate. The article provides a brief description of their design, installation and dismantling. The fabrication and effective application of such anchors requires appropriate justification of their parameters (the holding power, in particular). The purpose of this study is to develop the scientific basis for determining the holding power and effective application of these anchors. A theoretical justification for the process of interaction of the proposed anchor with the soil mass has been carried out. On the basis of this justification, two alternative formulas were obtained to determine the holding power provided by one section of the grouser. Calculations using these formulas give similar results. The dependences of the holding power on the determinants, such as the vertical load on one section of the grouser transmitted from the containers being filled, the coefficient of friction of the anchor material on the soil, the density of the soil, the coefficient of its internal friction and the depth of penetration of the grousers into the soil are approximately the same. Similar properties of these formulas allow to consider them reliable. The total holding power of the anchor is calculated according to the weight of the filled containers, the holding power of one section of the grouser and their number. The degree and nature of the influence of the determinants on the holding power of a mobile fillable gravity anchor have been established. An increase in any of them leads to an increase in the holding power. The most significant determinant is the vertical load on one section of the grouser. The dependence of the holding power on it is linear. To a lesser extent, in descending order, the angle of the internal friction of the soil, the coefficient of friction of the anchor material on the soil, and the density of the soil influence the holding power. The dimensions of the grouser and their change have little effect, but the very fact of their presence provides a sizeable proportion of the holding power of the anchor.

Keywords: timber rafting, anchor, mobile anchor, floating structures, raft holding, holding power



For citation: Posypanov S.V., Kozlov K.V. Theoretical Justification of the Holding Power of a Mobile Anchor for Holding Timber-Rafting Objects. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 141–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-141-151>

Введение

Экономическая доступность запасов древесины, которые находятся в удаленных лесных массивах, нередко может быть обеспечена лишь при использовании наиболее дешевого, водного транспорта. Речная сеть лесных регионов России состоит в основном из малых и средних рек. Большая часть из них использовалась для молевого сплава, на смену которому должны прийти новые, экологически щадящие технологии. Малые и средние реки имеют некоторые особенности, такие как непродолжительная навигация, существенные скорости течения и, соответственно, значительные нагрузки на лесосплавные объекты. Эти особенности необходимо учитывать при разработке технических и технологических решений, что относится и к опорам, предназначенным для крепления наплавных объектов.

Опоры являются важнейшими лесосплавными объектами, от которых зависит безаварийность выполняемых работ. Особенно актуально это стало в связи со значительным повышением требований промышленно-экологической безопасности. Существующие конструкции опор во многих случаях неприменимы на малых и средних реках. Для их сооружения и установки, как правило, требуется техника, во многих случаях не способная подойти к месту размещения опоры. Кроме того, большинство существующих опор имеют относительно высокую стоимость, они окупаются только при длительном сроке эксплуатации лесосплавного объекта, располагающегося на постоянном месте. Для малых и средних рек нужны относительно недорогие опоры, которые можно было бы легко перемещать из одного пункта в другой, при необходимости доставлять непосредственно на место установки без применения транспорта, устанавливать и демонтировать с использованием переносимых устройств. Нами предложена конструкция мобильной наполняемой опоры, удовлетворяющей указанным требованиям (рис. 1). По общеизвестной классификации она может быть отнесена к опорам гравитационно-анкерного типа [12].

В число главных элементов предлагаемой опоры входит гибкое основание, снабженное грунтозацепами, которые выполнены из прокатной стали. Грунтозацепы в основании размещены в несколько продольных рядов. Фрагмент одного из рядов представлен на рис. 1, б. Основание является несущим элементом конструкции, к нему крепится гибкая связь, соединяющая опору с удерживаемым наплавным объектом. На гибком основании располагаются легкие емкости, быстро заполняемые водой или другими местными материалами. В качестве легких заполняемых емкостей могут быть использованы, например, так называемые еврокубы [5, 20] (рис. 1, в).

Монтаж мобильной наполняемой опоры производится на местности непосредственно у уреза воды, что позволяет существенно уменьшить длину довольно дорогих стальных канатов, соединяющих опоры с наплавными объектами. После укладки на грунт гибкого основания на него устанавливаются заполняемые емкости и завершают сборку опоры, как указано на рис. 1, а.

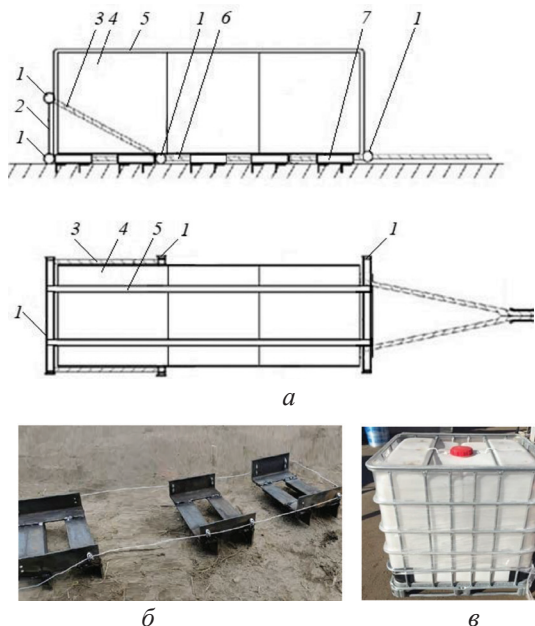


Рис. 1. Мобильная наполняемая опора: *a* – общая схема (1 – поперечная балка; 2 – пластина; 3 – канат боковой; 4 – наполняемая емкость; 5 – крепежная лента; 6 – канат гибкого основания; 7 – секция грунтозацепов); *б* – фрагмент ряда секций грунтозацепов; *в* – еврокуб

Fig. 1. Mobile fillable anchor: *a* – general scheme (1 – crossbeam; 2 – plate; 3 – side rope; 4 – container to be filled; 5 – tension band; 6 – flexible base rope; 7 – grouser section); *б* – fragment of the row of the grouser sections; *в* – eurocube

Затем, используя переносной насос, заполняют емкости водой или сыпучим грунтом, подаваемым в виде пульпы с последующим отводом воды через специальные прорези. После прекращения отстоя лесотранспортных единиц и, соответственно, эксплуатации наплавных сооружений в данном пункте опора может быть быстро демонтирована. При этом сливают воду из емкостей через краны в нижней части. В случае заполнения емкостей грунтом (песком) их разбирают, грунт разравнивают. Опору в разобранном или собранном виде доставляют на место следующего применения или хранения. Дополнительные сведения о мобильных наполняемых опорах можно найти в статьях [6–8].

Для изготовления и эффективного применения таких опор необходимо соответствующее обоснование их основных параметров, в частности держащей силы, поэтому мы обратились к литературным источникам. В данной области наиболее известны труды В.Г. Таскаева [1, 2], А.Н. Вихарева [3, 4], А.А. Митрофанова [9, 10], Г.Я. Сухова [11], а также W. Baker, R. Kondner [16], С. Heibig [18]. В результате изучения названных работ пришли к выводу о необходимости описываемого здесь исследования.

Цель исследования – разработка научных основ для определения держащей силы мобильных наполняемых опор гравитационно-анкерного типа и их эффективной эксплуатации.

Задачи:

- выполнить теоретическое обоснование процесса взаимодействия мобильной наполняемой гравитационно-анкерной опоры с грунтовым массивом;
- на основе выполненного обоснования получить зависимости для определения держащей силы указанной опоры;
- установить степень и характер влияния определяющих факторов на держащую силу такой опоры.

Объект исследования – мобильная наполняемая гравитационно-анкерная опора.

Результаты исследования и их обсуждение

Грунтозацепы опоры попарно соединены друг с другом жесткими продольными связями. Такая конструкция названа секцией грунтозацепов. Указанное соединение предотвращает поворачивание грунтозацепов относительно направленной вдоль них оси при приложении нагрузки к опоре. Грунтозацепы и соединяющие их жесткие связи изготавливаются из прокатной стали уголкового профиля. Секции грунтозацепов соединены между собой с помощью гибких связей (рис. 1, б; рис. 2).

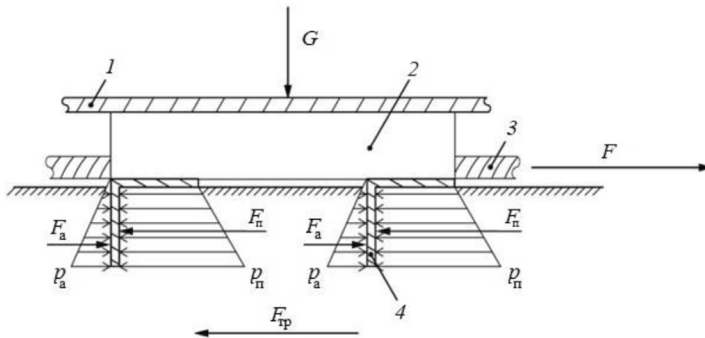


Рис. 2. Фрагмент нижней части наполняемой мобильной гравитационно-анкерной опоры: 1 – дно наполняемой емкости; 2 – соединительный продольный элемент секции грунтозацепов; 3 – продольная гибкая связь основания опоры; 4 – грунтозацеп [6]

Fig. 2. Fragment of the lower part of the fillable mobile gravity anchor: 1 – bottom of the container to be filled; 2 – connecting longitudinal element of the grouser section; 3 – longitudinal flexible connection of the anchor base; 4 – grouser [6]

Расстояние между грунтозацепами одной секции (рис. 2) и соседних секций в продольном ряду (м) установили с учетом длины призмы выпирания грунта, которая определяется по формуле

$$l = htg\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

где h – глубина внедрения грунтозацепов в грунт, м; φ – угол внутреннего трения грунта, ...°.

Общая держащая сила рассматриваемой опоры складывается из держащих сил ее секций грунтозацепов. На рис. 2 отражены силы, действующие на секцию. От заполненной емкости на секцию передается сила тяжести. Будем считать, что на каждую секцию приходится равная часть от общей силы тяжести, обусловленной массой всех емкостей. При этом непосредственный контакт между дном емкостей и грунтом отсутствует. В противном случае держащая сила опоры будет снижаться. Для недопущения этого соединительные продольные элементы секций грунтозацепов (рис. 2) должны быть достаточно высокими. В случае наличия на месте размещения опоры локальных резко выступающих неровностей грунта их следует устранить.

При действии на опору рабочей нагрузки возникает сила трения (Н) между поверхностью грунта и горизонтальными полками грунтозацепов:

$$F_{\text{тр}} = G\mu, \quad (2)$$

где G – сила тяжести, воспринимаемая одной секцией, Н; μ – коэффициент трения горизонтальной части грунтозацепа по поверхности грунта.

Также при приложении к опоре рабочей нагрузки со стороны ее действия на вертикальные части грунтозацепов действуют силы пассивного отпора грунта [14]. Здесь на эту силу оказывает влияние давление на поверхность грунта, которое обусловлено частью силы тяжести, передаваемой от наполняемой емкости. В связи с этим давление пассивного отпора имеет место уже на поверхности грунта. Учитывая трапецеидальную форму эпюры давления справа от грунтозацепа (рис. 2), выражение для силы пассивного отпора грунта (Н) при подходе, используемом в механике грунтов при расчетах подпорных стенок [15], можно записать в следующем виде:

$$F_{\text{п}} = 0,5(p_0 + \rho gh)\lambda_{\text{п}}\omega,$$

где p_0 – вертикальное давление на грунт от горизонтальных элементов грунтозацепов, Па; ρ – плотность грунта, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент пассивного отпора грунта; ω – площадь, воспринимающая давление грунта, м².

$$\lambda_{\text{п}} = \text{tg}^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right);$$

$$p_0 = \frac{G}{2\omega_{\text{г}}}, \quad (3)$$

$\omega_{\text{г}}$ – площадь опорной поверхности горизонтального элемента грунтозацепа, м².

При прямоугольной форме указанной поверхности

$$\omega_{\text{г}} = bl, \quad (4)$$

где b – ширина опорной поверхности горизонтального элемента грунтозацепа, м; l – длина рабочей части грунтозацепа, м.

С противоположной стороны на вертикальные части грунтозацепов действуют силы активного давления грунта [17]. Сила активного давления грунта на один грунтозацеп (Н) может быть определена из выражения

$$F_{\text{а}} = 0,5\rho gh\lambda_{\text{а}}\omega,$$

где $\lambda_{\text{а}}$ – коэффициент активного давления грунта,

$$\lambda_{\text{а}} = \text{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right).$$

При прямоугольной форме рабочей части грунтозацепа

$$\omega = hl.$$

С учетом всех усилий, действующих на секцию грунтозацепов на несвязных грунтах, и приведенных выше выражений для ее держащей силы (Н) получили формулу:

$$F = G\mu + 2\left(0,5\left(\frac{G}{2bl} + \rho gh\right)_{\text{п}} hl - 0,5\rho gh_{\text{а}} hl\right).$$

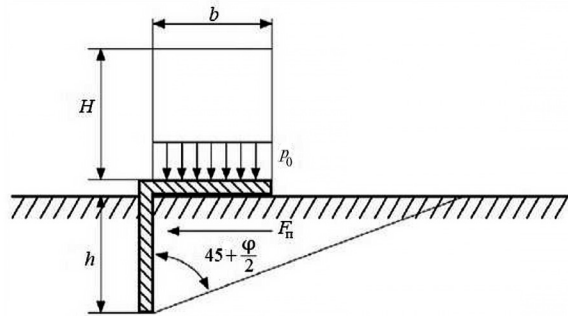
Посредством преобразований данную формулу привели к виду

$$F = G\mu + \left(\left(\frac{G}{2bl} + \rho gh \right) - \rho gh_a \right) hl. \quad (5)$$

Верность полученного выражения не вызывала бы сомнений, если бы вертикальная нагрузка на поверхность грунта прикладывалась по всей длине призмы выпирания. В данном случае это не так, поэтому рассмотрели альтернативное решение. При этом использовали расчетную схему, приведенную на рис. 3.

Рис. 3. Расчетная схема к альтернативному варианту определения силы пассивного отпора

Fig. 3. Design diagram for an alternative method of determining the passive resistance force



Вместо эпюры горизонтальных давлений здесь рассматриваем призму выпирания грунта [19]. Вертикальное давление p_0 заменяем параллелепипедом из грунта такого же, как в призме, выпирания. Один из размеров параллелепипеда равен длине призмы выпирания l , второй – ширине опорной поверхности горизонтального элемента грунтозацепа b . Высота параллелепипеда определяется из выражения

$$H = \frac{p_0}{\rho g},$$

или, с учетом (3) и (4),

$$H = \frac{G}{2bl\rho g}.$$

Тогда сила пассивного отпора

$$F_n = \left(0,5h^2 \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) l + \frac{G}{2\rho g} \right) \rho g \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right).$$

После преобразования этого выражения получили

$$F_n = 0,5lh^2 \rho g \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 0,5G \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right).$$

Эту формулу можно записать и в другом виде:

$$F_n = 0,5 \left(\rho gh \lambda_n \omega + G \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \right). \quad (6)$$

С учетом (6) альтернативой формуле (5) будет выражение

$$F = G\mu + G \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) + (\rho gh \lambda_n - \rho gh \lambda_a) hl. \quad (7)$$

После преобразований (7) получили

$$F = G\mu + Gtg\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) + \rho gh^2l(\lambda_n - \lambda_a). \quad (8)$$

Для наглядности сравнения привели (5) к виду

$$F = G\mu + \frac{Gh}{2b}\lambda_n + \rho gh^2l(\lambda_n - \lambda_a). \quad (9)$$

Альтернативные формулы (8) и (9) отличаются только 2-м слагаемым.

Для количественного сопоставления результатов провели расчеты по формулам (8), (9) для конкретного случая. Размеры грунтозацепов, выполненных из уголка 50×50×5 мм: $h = 0,045$ м; $b = 0,045$ м; $l = 0,240$ м. Указанные размеры приняты конструктивно с учетом пробных опытов по внедрению секций грунтозацепов в различные грунты. Плотность грунта $\rho = 1850$ кг/м³, угол внутреннего трения $\varphi = 33^\circ$ соответствуют мелкому сухому песку в плотном состоянии, $\mu = 0,4$ при взаимодействии стали с песком [13]. По полученным данным построили графики (рис. 4).

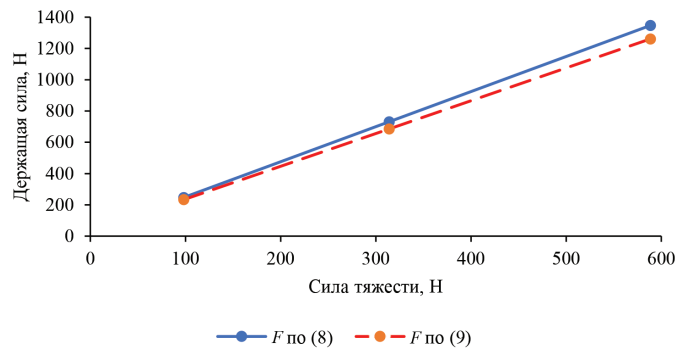


Рис. 4. Графики зависимостей державшей силы секции грунтозацепов от силы тяжести, приходящейся на нее, при $h = 0,045$ м; $b = 0,045$ м; $l = 0,240$ м; $\rho = 1850$ кг/м³; $\varphi = 33^\circ$; $\mu = 0,4$

Fig. 4. Graphs of the dependencies of the holding power of a grouser section on the force of gravity exerted on it, at $h = 0.045$ m; $b = 0.045$ m; $l = 0.24$ m; $\rho = 1850$ kg/m³; $\varphi = 33^\circ$; $\mu = 0.4$

Графики наглядно демонстрируют, что уравнения (8), (9) дают примерно одинаковые результаты. Державшая сила в обоих случаях линейно возрастает с увеличением вертикальной нагрузки, приходящейся на секцию грунтозацепов. Анализ полученных зависимостей позволил, кроме того, установить и другие факторы, влияющие на державшую силу секции грунтозацепов, а значит, и опоры в целом. Согласно обеим формулам, державшая сила увеличивается также с возрастанием плотности грунта и угла его внутреннего трения; заглубления грунтозацепов и коэффициента трения элементов опоры по грунту. Соответствие результатов в двух вариантах, установленных разными способами, позволяет полагать, что полученные решения являются правильными.

Выполненные по выражениям (8), (9) расчеты дали возможность оценить не только характер, но и степень влияния различных факторов на державшую

силу. Варьируя при расчетах значения каких-либо из факторов, остальные принимали равными тем, что указаны ранее.

При изменении вида несвязных грунтов меняются, как правило, плотность грунта и угол внутреннего трения. При переходе с мелкого рыхлого сухого песка плотностью 1550 кг/м^3 и с углом внутреннего трения 27° на крупный и гравелистый плотный мокрый песок плотностью 2250 кг/м^3 и с углом внутреннего трения 35° держащая сила увеличивается примерно на 30 %. Отметим, что угол внутреннего трения более значимо влияет на выходную величину, чем плотность грунта. Изменение коэффициента трения элементов опоры по грунту от 0,35 до 0,45 приводит к повышению держащей силы приблизительно только на 5 %. Рост держащей силы секции грунтозацепов более чем в 2 раза превышает вызвавшее его увеличение вертикальной нагрузки. Примерно на 70 % держащая сила опоры обусловлена наличием грунтозацепов, находящихся под воздействием вертикальной нагрузки, и, соответственно, примерно на 30 % – трением по поверхности грунта. При этом размеры самих грунтозацепов в реальном диапазоне их изменения не очень влияют на держащую силу. Важен факт их наличия. Они обеспечивают значительную долю держащей силы опоры.

Держащая сила опоры в целом определяется делением силы тяжести, создаваемой наполняемыми емкостями, на количество секций грунтозацепов, вычислением по полученному результату держащей силы одной секции по формуле (8) или (9) и последующим умножением этой силы на число секций.

Полученные результаты являются полезным вкладом в теоретическое изучение вопроса, при этом они позволят оптимизировать предполагаемые экспериментальные исследования, которые планируется провести с целью проверки приведенных в статье положений.

Выводы

1. Опираясь на положения механики грунтов, теоретически обосновали процессы взаимодействия мобильной наполняемой гравитационно-анкерной опоры с грунтовым массивом.

2. На базе выполненного обоснования разными способами получили 2 альтернативные формулы для определения держащей силы, обеспечиваемой одной секцией грунтозацепов. Близость результатов вычислений по формулам, схожесть зависимостей от определяющих факторов дают основание считать данные формулы достоверными. Общая держащая сила опоры рассчитывается по массе наполняемых емкостей, держащей силе одной секции и их количеству.

3. С использованием полученных зависимостей установили, что при переходе с мелкого рыхлого сухого песка плотностью 1550 кг/м^3 и с углом внутреннего трения 27° на крупный и гравелистый плотный мокрый песок плотностью 2250 кг/м^3 и с углом внутреннего трения 35° держащая сила секции грунтозацепов растет примерно на 30 %. Угол внутреннего трения более значимо влияет на выходную величину, чем плотность грунта. Коэффициент трения элементов опоры по грунту варьирует от 0,35 до 0,45, что обуславливает повышение держащей силы приблизительно на 5 %. Увеличение держащей силы секции грунтозацепов более чем в 2 раза превосходит вызвавшее его увеличение вертикальной нагрузки. То есть вертикальная нагрузка на секцию грунтозаце-

пов – наиболее значимый фактор. Примерно на 70 % держащая сила опоры объясняется действием грунтозацепов, находящихся под влиянием вертикальной нагрузки, и, следовательно, примерно на 30 % – трением по поверхности грунта. При этом размеры самих грунтозацепов в реальных диапазонах их изменения не очень значительно отражаются на держащей силе. Важно их наличие, обеспечивающее весомую долю держащей силы опоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 1523508 СССР, МПК В65G 69/20 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 4343248/31-11: заявл. 03.11.1987: опубл. 23.11.1989 / В.Г. Таскаев.

Taskaev V.G. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. USSR, no. SU 1523508A1, 1989. (In Russ.).

2. А. с. 1548321 СССР, МПК E02B 3/06 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 4360415/30-15: заявл. 06.01.1988: опубл. 07.03.1990 / В.Г. Таскаев, Г.Г. Чешков.

Taskaev V.G., Cheshkov G.G. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. USSR, no. SU 1548321A1, 1990. (In Russ.).

3. Вихарев А.Н. Расчет формы призмы выпирания грунта при вертикальном сдвиге анкера круглой формы методом квазипотенциального моделирования // Совершенствование техники и технологии лесозаготовок и транспорта леса: сб. науч. тр. фак. природ. ресурсов АГТУ. Вып. 4. Архангельск: АГТУ, 2010. С. 80–86.

Vikharev A.N. Calculation of the Shape of the Prism of Soil Protrusion during Vertical Displacement of a Round-Shaped Anchor Using the Quasi-Potential Modeling Method. *Improving Equipment and Technologies for Logging and Wood Transportation: Collection of Scientific Papers of the Faculty of Natural Resources of ASTU*. Arkanglelsk, ASTU, 2010, iss. 4, pp. 80–86. (In Russ.).

4. Вихарев А.Н., Гагарин П.Н. Квазипотенциальное моделирование механических характеристик работы анкера в грунтах // Совершенствование техники и технологии лесозаготовок и транспорта леса: сб. науч. тр. сотрудников фак. природ. ресурсов, посвящ. 70-летию АГТУ и ФПР. Архангельск: АГТУ, 1999. С. 73–83.

Vikharev A.N., Gagarin P.N. Quasi-Potential Modeling of the Mechanical Characteristics of the Anchor Operating in the Soil Mass. *Improving Equipment and Technologies for Logging and Wood Transportation: Collection of Scientific Papers of the Faculty of Natural Resources, Dedicated to the 70th Anniversary of ASTU and the Faculty of Natural Resources*. Arkhangelsk, ASTU, 1999, pp. 73–83. (In Russ.).

5. Еврокуб // Сайт «Завода удачных теплиц». Режим доступа: <https://tepli4ki.ru/> (дата обращения: 17.01.22).

Eurocube. *The Website of "The Successful Greenhouse Plant"*. (In Russ.).

6. Козлов К.В., Беляев Н.С., Посыпанов С.В. Оценка держащей силы мобильных наполняемых опор гравитационно-анкерного типа // Актуал. науч. исслед. в соврем. мире. 2021. № 11-11(79). С. 19–23.

Kozlov K.V., Belyaev N.S., Posypanov S.V. Assessment of the Holding Power of Mobile Fillable Gravity Anchors. *Current Scientific Research in the Modern World*, 2021, no. 11-11(79), pp. 19–23. (In Russ.).

7. Козлов К.В., Беляев Н.С., Посыпанов С.В. Анализ крепления лесосплавных объектов при коротких сроках навигации // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 36. С. 1543–1546.

Kozlov K.V., Belyaev N.S., Posypanov S.V. Analysis of Anchoring of Timber-Rafting Facilities for Short Navigation Periods. *Innovations. Science. Education*, 2021, no. 36, pp. 1543–1546. (In Russ.).

8. Козлов К.В., Посыпанов С.В. Использование мобильных наполняемых опор для крепления наплавных объектов на лесосплаве // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 541–545.

Kozlov K.V., Posypanov S.V. The Use of Mobile Fillable Anchors for Holding the Floating Objects in Timber Rafting. *Innovations. Science. Education*, 2020, no. 23, pp. 541–545. (In Russ.).

9. Митрофанов А.А. Научное обоснование и разработка экологически безопасного плотового лесосплава. Архангельск: АГТУ, 1999. 268 с.

Mitrofanov A.A. *Scientific Justification and Development of an Environmentally Safe Rafting*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1999. 268 p. (In Russ.).

10. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: моногр. Архангельск: АГТУ, 2007. 492 с.

Mitrofanov A.A. *Timber Rafting. New Technologies, Scientific and Technical Support: monograph*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 492 p. (In Russ.).

11. Патент 119757 РФ, МПК E02B 1/00 (2006.01), E02B 3/00 (2006.01), E01D 19/00 (2006.01). Анкерная опора для берегового крепления наплавных сооружений: № 2012116665/13: заявл. 24.04.2012: опубл. 27.08.2012 / Г.Я. Суров, А.Н. Вихарев, С.Е. Лихачев, А.А. Емельянов. 9 с.

Surov G.Ya., Vikharev A.N., Likhachev S.E., Emel'yanov A.A. *The anchor for holding the floating structures to the shore*. Patent RF, no. RU 119757U1, 2012. (In Russ.).

12. Патакин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.

Patyakin V.I., Dmitriev Yu.Ya., Zaytsev A.A. *Water Log Movement*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 336 p. (In Russ.).

13. Технические таблицы. 2006. Режим доступа: <https://tehtab.ru/> (дата обращения: 17.12.21).

Technical Tables, 2006. (In Russ.). <https://tehtab.ru/>

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Mechanics of Soils*: 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

15. Ambrose J. *Simplified Design of Masonry Structures*. New York, John Wiley and Sons, 1991. pp. 70–75.

16. Baker W.H., Kondner R.L. *Pullout Load Capacity of a Circular Earth Anchor Buried in Sand*. National Academy of Sciences, Highway Research Record, 1966, no. 108, pp. 1–10.

17. Craig R.F. *Soil Mechanics*. 6th ed. London, New York: E & FN Spon, 1997. 485 p.

18. Heibig C. *Künstliche Anker beim Seilkraneinsatz State of the Art*. Zürich, ETHZ D-WAHO Forstliches Ingenieurwesen, 1997. 44 p.

19. Verruijt A. *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, 2012. 331 p.

20. Yam K.L. *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*. John Wiley & Sons, 2009. 1376 p. <https://doi.org/10.1002/9780470541395>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



Научная статья

УДК 674.093

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-152-167

Повышение выхода пиломатериалов при распиловке с брусовкой

А.А. Каптелкин[✉], ассистент; *ResearcherID: AAC-8654-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8470-3496>

Н.В. Куликова, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: AGU-5552-2022*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6631-5246>

С.Н. Рыкунин, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: N-3182-2013*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4471-4668>

Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; kaptelkin94@mail.ru[✉], stelons@mail.ru, rikunin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 31.03.23 / Одобрена после рецензирования 28.06.23 / Принята к печати 30.06.23

Аннотация. В теории раскроя принимается, что объемный выход обрезных пиломатериалов из бруса максимального объема будет максимальным. В соответствии с действующими стандартами, обрезные пиломатериалы должны иметь заданные толщину и ширину. Часть бруса из-за неkratности ширины его пласти и толщины пиломатериалов не используется для производства центральных пиломатериалов. Объем такого бруса при получении обрезных центральных пиломатериалов не учитывается в теории раскроя, и вывод о том, что их объемный выход из бруса максимального объема будет максимальным, неочевиден. При распиловке с брусовкой в первом проходе получается двухкантный брус. При этом из-за смещения перед распиловкой оси круглого лесоматериала от центра постава образуются узкая и широкая пласти. Рассматривается размерообразование узкой пласти двухкантного бруса, т. к. именно ее размеры определяют объемный выход центральных обрезных пиломатериалов. В пределах узкой пласти двухкантного бруса выделено 2 зоны: безусловная и вероятностная. В безусловной зоне получается целое число обрезных досок. В диапазоне диаметров круглых лесоматериалов 17...29 см только круглые лесоматериалы с диаметрами 21 и 25 см дали брусья максимального размера, но объемный выход центральных обрезных пиломатериалов для этих диаметров не является максимальным. Из этого следует, что брус максимального объема не гарантирует максимальный объемный выход центральных обрезных пиломатериалов. В вероятностную зону попадает нецелое число обрезных досок. Определить их количество аналитическим способом невозможно, поэтому использовались методы теории вероятностей. Была выведена функция распределения узкой пласти двухкантного бруса. Чтобы воспользоваться функцией распределения для получения нецелого числа обрезных досок рассчитывалась ширина вероятностной зоны, а также размер части вероятностной зоны, определяющей получение нецелого числа обрезных досок и доверительный интервал. Далее по таблице «Функция распределения ширины узкой пласти двухкантного бруса» определено нецелое число обрезных досок. Получение

© Каптелкин А.А., Куликова Н.В., Рыкунин С.Н., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

представленных нецелым числом обрезных досок из двухкантных брусьев на практике может быть реализовано с использованием сменных или смежных поставов. Приведенные результаты возможно применять при определении количества сортировочных групп круглых лесоматериалов перед подачей их в лесопильный цех и при изменении технологии производства центральных обрезных пиломатериалов.

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, постав, брус, обрезные пиломатериалы, безусловная зона, вероятностная зона

Для цитирования: Каптелкин А.А., Куликова Н.В., Рыкунин С.Н. Повышение выхода пиломатериалов при распиловке с брусровкой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 152–167. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-152-167>

Original article

Increasing Sawn Timber Yield in Cant Sawing

Aleksandr A. Kaptelkin[✉], Assistant; ResearcherID: [AAC-8654-2019](https://orcid.org/0000-0002-8470-3496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8470-3496>

Nadezhda V. Kulikova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AGU-5552-2022](https://orcid.org/0000-0002-6631-5246), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6631-5246>

Stanislav N. Rykunin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-3182-2013](https://orcid.org/0000-0002-4471-4668),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4471-4668>

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; kaptelkin94@mail.ru[✉], stelons@mail.ru, rikunin@mgul.ac.ru

Received on March 31, 2023 / Approved after reviewing on June 28, 2023 / Accepted on June 30, 2023

Abstract. The log cutting theory accepts that the volumetric yield of edged sawn timber from the maximum volume cant will be maximal. According to current standards, edged sawn timber must have specified thickness and width. Some cants are not used for the production of centre yield because the widths of their faces are aliquant of the centre yield thickness. The volume of such cant in centre yield production is not taken into account in the log cutting theory and the conclusion that their volumetric yield from the maximum volume cant will be maximal is not obvious. The 1st stage of cant sawing is obtaining a two-edged cant from a log. At that, due to the deviation of the roundwood axis from the centre line of the sawing pattern, a narrow and a wide face are obtained. We consider the dimensioning of the narrow face of a two-edged cant, as its size determines the volumetric yield of centre yield. Within the narrow face of a two-edged cant 2 zones are allocated: unconditional and probabilistic. In the unconditional zone, an integer number of edged boards is obtained. In the range of roundwood diameters from 17 to 29 cm, only the roundwood with the diameters of 21 and 25 cm have provided the maximum volume two-edged cants, but the volumetric yield of the centre yield from the roundwood of these diameters has not been maximal. It follows from this that the maximum volume cant does not guarantee the maximal volumetric centre yield. The probability zone includes a non-integer number of edged boards. It is impossible to determine their number in an analytical way, so the methods of probability theory have been used. The distribution function of the narrow face of a two-edged cant has been derived. In order to use the distribution function to obtain a non-integer number of edged boards, the width of the probability zone has been calculated, as well as the size of the part of the probability

zone decisive in obtaining a non-integer number of edged boards and the confidence interval. Further, the “Distribution function of the width of the narrow face of a two-edged cant” table was used to determine the non-integer number of edged boards. Obtaining the non-integer number of the edged boards from a two-edged cant can be implemented in practice using changeable or adjacent sawing patterns. The presented results can be applied when determining the number of sorting groups of roundwood before its feeding to the sawmill and when changing the technology of centre yield production.

Keywords: roundwood, sawing pattern, cant, edged sawn timber, unconditional zone, probabilistic zone

For citation: Kaptelkin A.A., Kulikova N.V., Rykunin S.N. Increasing Sawn Timber Yield in Cant Sawing. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 152–167. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-152-167>

Введение

Теория раскроя круглых лесоматериалов на пиломатериалы способствует формированию обеспечивающих увеличение спроса [10–12, 30] и повышение потребительской ценности параметров пиломатериалов [6, 7, 22, 24–29]. При этом учет технологических ограничений и направленность на улучшение технико-экономических показателей отмечается на всех этапах развития теории [1–5, 8, 9, 13–20].

Способ раскроя с брусковкой круглых лесоматериалов на пиломатериалы является основным. В России ежегодно для производства пиломатериалов используется около 80 млн м³ круглых лесоматериалов. Параметры двухкантного бруса обеспечивают объемный выход центральных пиломатериалов в пределах пласти. В теории раскроя решение этой задачи сводится к определению наибольшего по площади прямоугольника, вписывающегося в торец круглого лесоматериала в верхнем отрезе [18]. Наибольший по площади прямоугольник, вписанный в круг, это квадрат с шириной стороны:

$$B = \frac{d}{\sqrt{2}} = 0,707d,$$

где d – диаметр круглого лесоматериала в верхнем отрезе.

Площадь поперечного сечения бруса максимального объема

$$F = B^2 = 0,5d^2.$$

В теории раскроя принимается, что объемный выход обрезных пиломатериалов из бруса максимального объема будет максимальным [2].

В соответствии с действующими стандартами обрезные пиломатериалы должны иметь заданные толщину и ширину. Часть бруса из-за некратности ширины пласти бруса и толщины пиломатериалов не используется для производства центральных пиломатериалов. Объем неиспользуемой части пласти бруса при получении обрезных центральных пиломатериалов не учитывается в теории раскроя, и вывод о том, что объемный выход обрезных центральных пиломатериалов из бруса максимального объема будет максимальным, может быть неочевидным. Толщина бруса для получения обрезных пиломатериалов номинальных размеров в большинстве случаев меньше или больше толщины бруса максимального объема, но площадь его поперечного сечения не превышает площадь бруса максимального сечения.

В табл. 1 представлены отношения площадей поперечных сечений брусьев для получения пиломатериалов номинальных размеров к площади поперечного сечения бруса максимального объема.

Таблица 1

Отношение площади поперечного сечения бруса для получения пиломатериалов номинальных размеров к площади поперечного сечения бруса максимального объема

Ratio of the cross-sectional area of a cant for obtaining sawn timber of nominal dimensions to the cross-sectional area of the maximum volume cant

Толщина бруса H	Ширина пласти бруса B	Площадь поперечного сечения HB, d^2	Отношение площадей поперечных сечений брусьев к площади сечения бруса максимального объема, %
в долях диаметра			
0,50	0,87	0,435	87,0
0,55	0,84	0,462	91,3
0,60	0,80	0,480	96,0
0,65	0,76	0,494	98,8
0,71	0,71	0,500	100,0
0,75	0,66	0,495	99,0
0,80	0,60	0,480	96,0
0,85	0,53	0,470	90,0
0,90	0,44	0,396	81,5

Из представленных в табл. 1 данных следует, что площади поперечного сечения брусьев при толщине $0,6d$ и $0,8d$ одинаковы, а объемы при одинаковой длине равны. Таким образом, ширина пласти бруса при толщине $0,6d - 0,8d$, а при $0,8d - 0,6d$ [2]. Вероятность получения большего количества обрезных досок в пределах пласти бруса будет у бруса с шириной пласти $0,8d$ и толщиной $0,6d$. При этом ширина досок из тонкого бруса меньше. Принятие решения о предпочтительном размере толщины двухкантного бруса возможно после нахождения объема толстых досок по сравниваемым вариантам.

Брус максимального объема не гарантирует получение максимального объема досок обрезных пиломатериалов, вероятны изменения в формировании сортировочных групп круглых лесоматериалов перед их распиловкой и в технологии производства обрезных пиломатериалов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются технологические процессы обработки круглых лесоматериалов при формировании пиломатериалов. В ходе работы использовались методы математического анализа, аналитической геометрии, имитационного компьютерного моделирования и теории вероятности.

Далее в тексте применяется термин «продольная ось круглого лесоматериала» – это линия, соединяющая центр торца в верхнем отрезе и в комле круглого лесоматериала. Также введен термин «постав» – план раскроя од-

ного круглого лесоматериала или однородной группы круглых лесоматериалов на пиломатериалы.

Методика нахождения распределения ширины пласти двухкантного бруса при смещении круглого лесоматериала от центра постава сводится к следующему: при распиловке с брусочкой в первом проходе получается двухкантный брус. Ширина его пласти равна ширине пласти четырехкантного бруса, на которой формируется количество центральных обрезных пиломатериалов. Поэтому в дальнейшем используется термин «двухкантный брус».

Ширина пласти двухкантного бруса зависит от диаметра круглого лесоматериала и расстояния от его продольной оси до пласти бруса и определяется по формуле

$$B = \sqrt{d^2 - 4a^2},$$

где B – ширина пласти бруса, мм; d – диаметр круглого лесоматериала, мм; a – расстояние от продольной оси круглого лесоматериала до пласти бруса, мм.

Расход ширины полупостава для пиломатериалов различной толщины представлен в табл. 2.

Таблица 2

Расход ширины полупостава (мм) при ширине пропила 5,5 мм
Rate of half-sawing pattern width (mm) at the width of kerf of 5.5 mm

Количество досок, шт.	Толщина досок, мм					
	40		50		60	
	Сосна	Береза	Сосна	Береза	Сосна	Береза
2	43,9	44,2	54,3	56,4	64,6	64,9
3	67,3	67,6	82,8	83,2	98,2	98,7
4	90,7	91,1	113,3	113,7	133,7	134,2

На размерообразование пластей бруса оказывает влияние расположение оси круглого лесоматериала относительно центра постава. На рис. 1 приведен эскиз круглого лесоматериала при выпиливании двухкантного бруса с учетом отклонения продольной оси от центра постава.

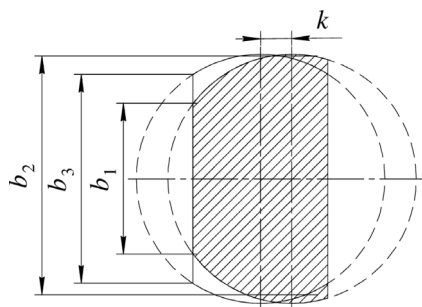


Рис. 1. Эскиз круглого лесоматериала при выпиливании двухкантного бруса с учетом отклонения продольной оси от центра постава: b_1 – узкая пластъ двухкантного бруса; b_2 – широкая пластъ двухкантного бруса; b_3 – пластъ двухкантного бруса без отклонения; k – отклонение оси круглого лесоматериала от центра постава

Fig. 1. Sketch of the roundwood while sawing-out a two-edged cant in view of the deviation of the longitudinal axis from the centre line of the sawing pattern: b_1 – narrow face of a two-edged cant; b_2 – wide face of a two-edged cant; b_3 – face of a two-edged cant without deviation; k – deviation of the roundwood axis from the centre line of the sawing pattern

Продольная ось круглого лесоматериала будет расположена в плюсовой зоне от оси постава, ширина левой пласти, по направлению подачи круглого лесоматериала, окажется меньше расчетной, ширина правой увеличится. В результате получится 2 распределения размеров ширины узкой и широкой пластей двухкантного бруса.

Далее рассматривается распределение узкой пласти двухкантного бруса, т. к. узкая пласти определяет количество досок из двухкантного бруса.

При статистическом контроле качества заготовок, к которым относится и двухкантный брус, используется нормированное нормальное распределение. Между отклонением продольной оси круглого лесоматериала и изменением ширины пласти двухкантного бруса существует функциональная связь. Плотность распределения размеров пласти двухкантного бруса будет такой же, как и при отклонении продольной оси круглого лесоматериала.

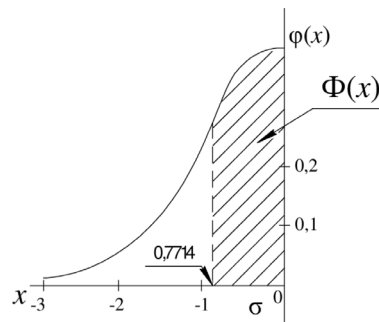
Функция распределения $\Phi(x)$ значений ширины узкой пласти двухкантного бруса может быть рассчитана по формуле (1) и представлена графически (рис. 2):

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt, \tag{1}$$

где t – переменная интегрирования.

Рис. 2. Функция $\Phi(x)$ распределения ширины узкой пласти двухкантного бруса ($\mu = 0; \sigma = 1$)

Fig. 2. $\Phi(x)$ function of the distribution of the narrow face of a two-edged cant ($\mu = 0; \sigma = 1$)



Результаты расчетов по формуле (1) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Функция распределения $\Phi(x)$ ширины узкой пласти двухкантного бруса
 $\Phi(x)$ distribution function of the width of the narrow face of a two-edged cant

χ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\Phi(x)$	0	0,07966	0,15852	0,23582	0,31084	0,38292	0,45149	0,51607
χ	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$\Phi(x)$	0,57629	0,63188	0,68269	0,72867	0,76986	0,80640	0,83849	0,86639
χ	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	
$\Phi(x)$	0,89040	0,91087	0,92814	0,94257	0,95450	0,96427	0,9722	
χ	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
$\Phi(x)$	0,97855	0,98360	0,98758	0,99307	0,99489	0,99489	0,99627	0,99730

Примечание: χ – доверительный интервал.

С использованием табл. 3 можно определить количество досок заданной толщины из бруса с учетом неточности базирования круглых лесоматериалов. Так, из круглого лесоматериала хвойных пород (за исключением

лиственницы) диаметром 19 см при толщине двухкантного бруса 125 мм и толщине досок 40 мм получается 2 обрезные доски в безусловной зоне, 0,559 – в вероятностной; из березовых круглых лесоматериалов таких же размеров – 0,440 обрезной доски.

Но, возможно, случайная величина X будет иметь нормальное распределение, например, сортировочная группа круглых лесоматериалов недостаточно однородна, тогда вместо соотношения

$$P(|X - \mu| < \chi\sigma) = \Phi(\chi) - \Phi(-\chi) = 2\Phi(\chi) - 1$$

используется оценка

$$P\left(|X - \mu| < \chi\sigma > 1 - \frac{1}{\chi^2}\right), \quad (2)$$

где P – вероятность события; μ – математическое ожидание генеральной совокупности; χ – доверительный интервал; σ – среднее квадратическое отклонение генеральной совокупности; χ^2 – случайная величина, удовлетворяющая χ^2 распределению, которая может быть получена из неравенства Чебышева [21, 23].

Параметры χ и σ^2 представляют соответственно математическое ожидание и дисперсию величины X . Из формулы (2) для $\chi = 3$ следует утверждение, которое верно для любого распределения, в интервале $(\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma)$ лежат минимум 89 % всех значений X , в т. ч. и для распределения, полученного для узкой пласти двухкантного бруса в интервале $\mu - 3\sigma$.

Из этого следует, что задача может решаться с использованием методов нормированного нормального распределения, искомая вероятность при 3σ будет, но 0,9973, а не менее 89 %. Для установления вероятности получения дополнительной доски в поставке такая точность приемлема.

Результаты исследования и их обсуждение

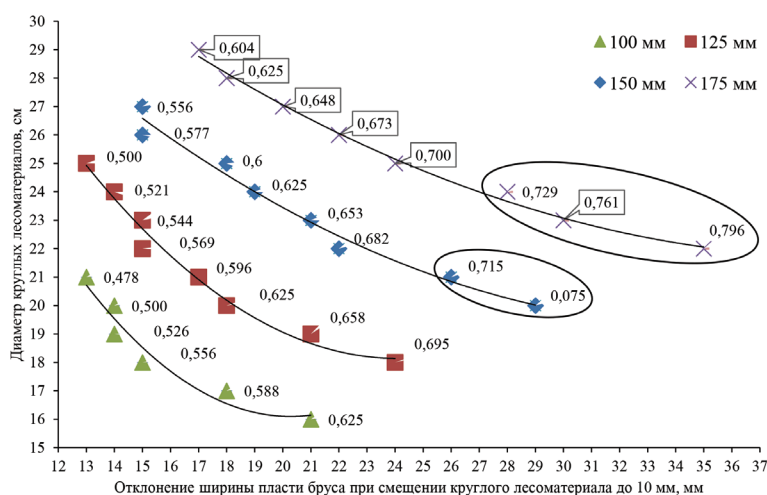


Рис. 3. Возможные варианты толщины (100–175 мм) двухкантного бруса в зависимости от диаметра круглых лесоматериалов (на рисунке обведены значения, превышающие толщину бруса максимального объема)
Fig. 3. Possible thickness options (100–175 mm) of two-edged cants depending on the diameter of roundwood (the values, exceeding the maximum volume cant thickness are circled at the figure)

Возможная толщина двухкантного бруса в зависимости от диаметра круглых лесоматериалов представлена на рис. 3.

В табл. 4 приведена ширина узкой пласти двухкантного бруса толщиной 100, 125, 150, 175 мм при совмещении продольной оси круглого лесоматериала с центром постава и смещении продольной оси на 10 мм.

Таблица 4

Ширина узкой пласти двухкантного бруса толщиной 100, 125, 150 и 175 мм
The width of the narrow faces of the two-edged cants with the thicknesses of 100, 125, 150 and 175 mm

Диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, см	Толщина бруса, мм	Соотношение толщины бруса и диаметра круглого лесоматериала в верхнем отрезе	Ширина пласти бруса в верхнем отрезе, мм	
			при совмещении продольной оси круглого лесоматериала и центра постава (расчетное значение)	при смещении продольной оси круглого лесоматериала от центра постава на 10 мм (минимальное значение)
16	100	0,625	123	102 (99)
17		0,588	135	117 (113)
18		0,556	147	132 (128)
19		0,526	159	145 (141)
20		0,500	172	158 (153)
21		0,478	183	170 (165)
18	125	0,695	126	102 (99)
19		0,658	140	119 (115)
20		0,625	153	135 (131)
21		0,596	166	149 (144)
22		0,569	178	163 (158)
23		0,544	191	176 (171)
24		0,521	203	189 (183)
25		0,500	214	201 (195)
20	150	0,750	127	98 (95)
21		0,715	143	117 (113)
22		0,682	157	135 (131)
23		0,653	171	150 (145)
24		0,625	184	165 (160)
25		0,600	197	179 (173)
26		0,577	210	195 (189)
27		0,556	221	206 (200)
22	175	0,796	127	92 (89)
23		0,761	144	114 (110)
24		0,729	159	133 (129)
25		0,700	174	150 (145)
26		0,673	188	166 (161)
27		0,648	201	181 (175)
28		0,625	214	196 (190)
29		0,604	227	210 (203)

Примечание: Без скобок (здесь и в табл. 5) указаны значения по хвойным пиломатериалам; в скобках – по березовым.

В практике лесопиления при расчете количества досок из двухкантного бруса к ширине его пласти резервируется 20...25 мм, чтобы уменьшить влияние обзола. Смещение круглого лесоматериала при получении двухкантного бруса принимается до 10 мм, что приводит к изменению ширины пласти двухкантного бруса на 20...25 мм.

Из материалов табл. 4 следует:

при формировании бруса толщиной 100 мм из группы круглых лесоматериалов с диаметрами 16...21 см отношение толщины бруса к диаметру круглых лесоматериалов изменяется в диапазоне 0,625...0,476;

при формировании бруса толщиной 125 мм из группы круглых лесоматериалов с диаметрами 18...25 см отношение толщины бруса к диаметру круглых лесоматериалов изменяется в диапазоне $(0,695...0,500)d$;

при формировании бруса толщиной 150 мм из группы круглых лесоматериалов с диаметрами 20...27 см отношение толщины бруса к диаметру круглых лесоматериалов изменяется в диапазоне $(0,750...0,556)d$;

при формировании бруса толщиной 175 мм из группы круглых лесоматериалов с диаметрами 22...29 см отношение толщины бруса к диаметру круглых лесоматериалов изменяется в диапазоне $(0,796...0,604)d$.

В табл. 5 представлено расчетное количество досок толщиной 40, 50 и 60 мм из двухкантных брусьев толщиной 100, 125, 150 и 175 мм с учетом смещения оси круглого лесоматериала от центра постава до 10 мм.

Таблица 5

**Количество досок из двухкантного бруса
при смещении оси круглого лесоматериала от центра постава до 10 мм
The number of boards produced from the two-edged cant with the deviation
of the roundwood axis from the centre line of the sawing pattern up to 10 mm**

Диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, см	Толщина бруса, мм	Количество досок (шт.) при толщине доски, мм		
		40	50	60
17	100	2	2	–
18		2,987 (2,935)	2	2
19		3	2	2
20		3	2,836 (2,626)	2
21		3	3	2
18	125	2	1,739 (1,668)	–
19		2,559 (2,440)	2	2
20		3	2	2
21		3	2	2
22		3	2,904 (2,752)	2
23		3,850 (3,651)	3	2
24		4	3	2,842 (2,610)
25		4	3	3

Окончание табл. 5

Диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, см	Толщина бруса, мм	Количество досок (шт.) при толщине доски, мм		
		40	50	60
20	150	2	–	–
21		2,667 (2,570)	2	–
22		3	2	2
23		3	3	2
24		3	2,996 (2,971)	2
25		3,989 (3,933)	3	2
26		4	3	2,993 (2,930)
27		4	3	3
22	175	2	1,592 (1,547)	–
23		2,652 (2,569)	2	1,544 (1,484)
24		2,995 (2,982)	2	2
25		3	2,711 (2,627)	2
26		3,337 (3,209)	3	2
27		4 (3,979)	3	2,509 (2,335)
28		4	3	2,996 (2,962)
29		4	3	3

Ширина пласти двухкантного бруса может обеспечить получение целого n или нецелого $n+1$ числа досок.

Данные табл. 5 показывают, что в пласти двухкантного бруса можно выделить 2 зоны получения обрезных досок (рис. 4): безусловную (b_{\min}) и вероятностную ($b_{\text{вер}}$).

Целое число центральных обрезных пиломатериалов в пределах пласти бруса получается в безусловной зоне. Количество обрезных пиломатериалов в вероятностной зоне $n+1$ определяют по табл. 3. Ниже приводится пример расчета.

Исходные данные: $d = 19$ см; толщина досок – 40 мм; расход ширины поставка для 2 центральных досок $a_n = 87,8$ мм (табл. 2); для 3 – $a_n = 134,6$ мм (табл. 2); расчетная ширина узкой пласти при смещении оси круглого лесоматериала $b_{\min} = 119$ мм (табл. 4).

При $b_{\min} = 119$ мм получается 2 доски толщиной 40 мм (с использованием формулы (1)). Ширина вероятностной зоны:

$$b_{\text{вер}} = b - b_{\min};$$

$$b_{\text{вер}} = 140 - 119 = 21 \text{ мм};$$

$$\sigma = \frac{b_{\text{вер}}}{3} = 7.$$

Ширина вероятностной зоны, определяющая получение $n+1$ досок:

$$\Delta = b - a_{n+1}; \quad (3)$$

$$\Delta = 140 - 134,6 = 5,4 \text{ мм}.$$

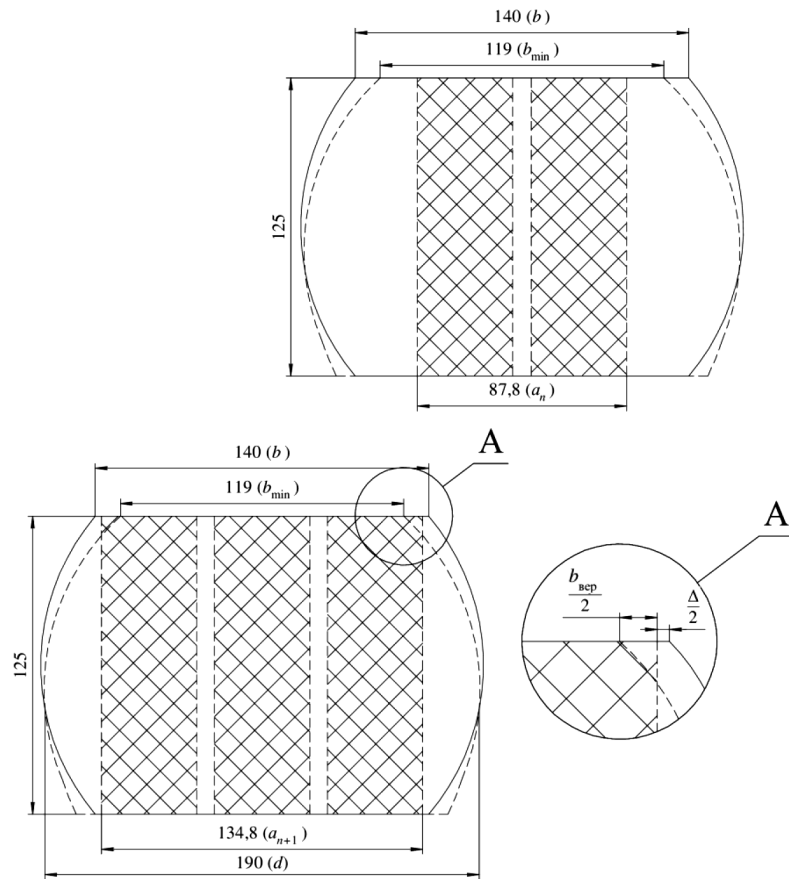


Рис. 4. Безусловная и вероятностная зоны в двухкантном бруске (d – диаметр круглого лесоматериала; b , b_{\min} – расчетная и минимальная ширина пласти двухкантного бруска в верхнем отрезе соответственно; a_n , a_{n+1} – расход ширины постова для получения n и $n+1$ досок соответственно; Δ – ширина вероятностной зоны)

Fig. 4. The unconditional and probabilistic zones in a two-edged cant (d – diameter of roundwood; b , b_{\min} – calculated and minimum widths of the face of a two-edged cant at the top end, correspondingly; a_n , a_{n+1} – rate of sawing pattern width for obtaining n and $n+1$ boards, correspondingly; Δ – width of the probabilistic zone)

Из формулы (3) устанавливается доверительный интервал σ :

$$\chi = \frac{\Delta}{\sigma};$$

$$\chi = \frac{5,4}{7} = 0,7714.$$

По табл. 3 количество $n+1$ досок из двухкантного бруска $\Phi(x) = 0,559$.

В табл. 6 представлен объемный выход обрезных досок в безусловной зоне.

Таблица 6

Объемный выход толстых обрезных досок в безусловной зоне с учетом изменения параметров круглых лесоматериалов и условий их распиловки

Volumetric yield of thick edged boards in the unconditional zone in view of the changes in the parameters of roundwood and sawing conditions

Диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, см	Толщина бруса, мм	Объемный выход (%) досок относительно объема бревна при толщине доски, мм		
		40	50	60
17	100	30,97	38,71	–
18		27,91	34,88	41,86
19		37,31	31,09	37,31
20		33,64	28,04	33,64
21		30,38	37,97	30,38
18	125	34,88	21,80	–
19		31,09	38,86	46,63
20		42,06	35,05	42,06
21		37,97	31,65	37,97
22		34,62	28,85	34,62
23		31,47	39,34	31,47
24		38,22	35,83	28,66
25		35,09	32,89	39,47
20	150	33,64	–	–
21		30,38	37,97	–
22		41,54	34,62	41,54
23		37,76	31,47	37,76
24		34,39	28,66	34,39
25		31,58	39,47	31,58
26		38,92	36,49	29,19
27		35,64	33,42	40,10
22	175	32,31	20,19	–
23		29,37	36,71	22,03
24		26,75	33,44	40,13
25		36,84	30,70	36,84
26		34,05	42,57	34,05
27		41,58	38,99	31,19
28		38,18	35,80	28,64
29		35,74	33,51	40,21

В диапазоне диаметров круглых лесоматериалов 17...29 см только из лесоматериалов с диаметрами 21 и 25 см получились брусья максимального объема, но объемный выход центральных обрезных пиломатериалов для этих диаметров не является максимальным.

Выводы

1. Брус максимального объема не гарантирует получение максимального суммарного объема досок.
2. Двухкантные брусья толщиной 100 и 125 мм не являются брусьями максимального объема, т. к. ширина пласти бруса меньше, чем требуется для получения 2 обрезных досок.
3. Двухкантные брусья толщиной 150 мм и более могут быть брусьями максимального объема.
4. В пласти двухкантного бруса можно выделить 2 зоны получения обрезных центральных пиломатериалов: безусловную и вероятностную.
5. Получение из двухкантных брусьев обрезных досок, представленных нецелым числом, возможно реализовать с использованием сменных или смежных поставов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агеев С.П., Мелехов В.И., Рыкунин С.Н. Вероятностное моделирование процесса производства пилопродукции // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2015. Т. 19, № 2. С. 89–95.
Ageev S.P., Melekhov V.I., Rykunin S.N. Probabilistic Modeling of the Sawed Timber Production Process. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 89–95 p. (In Russ.).
2. Аксенов П.П. Теоретические основы раскроя пиловочного сырья. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1960. 216 с.
Aksenov P.P. *Theoretical Basis for Cutting Sawlogs*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1960. 216 p. (In Russ.).
3. Залгаллер В.А. Новое в составлении поставов для распиловки бревен // Тр. Ин-та ЦНИИЛ. Л.: Севзаплес, 1956. Вып. 67. С. 32–67.
Zalgaller V.A. Innovations in Compilation of Sawing Patterns. *Proceedings of the Central Research Institute of Forestry*. Leningrad, Sevzaples Publ., 1956, iss. 67, pp. 32–67. (In Russ.).
4. Калитеевский Р.Е. Лесопиление в XXI веке. Технология, оборудование, менеджмент. СПб.: Профи-информ, 2005. 480 с.
Kaliteevskiy R.E. *Sawmill in the 21st Century. Technology, Equipment, Management*. St. Petersburg, PROFI-INFORM Publ., 2005. 480 p. (In Russ.).
5. Кантарович Л.В. Подбор поставов, обеспечивающих максимальный выход пилопродукции в заданном ассортименте // Лесн. пром-сть. 1949. № 7. С. 15–17; № 8. С. 17–19.
Kantorovich L.V. *Selection of Sawing Patterns Ensuring Maximum Sawed Timber Yield at a Given Range*. *Lesnaya promyshlennost'* Publ., 1949, no. 7, pp. 15–17; no. 8, pp. 17–19. (In Russ.).
6. Каптелкин А.А., Куликова Н.В., Новоселов Н.А., Рыкунин С.Н. Переработка тонкомерных березовых круглых лесоматериалов в условиях ограниченного спроса на технологическую щепу // Предиктивный характер научных исследований и практика их реализации в условиях глобального кризиса в экономике и обществе: сб. науч. ст. по итогам междунар. науч.-практ. конф. СПбГЭУ, 2020. С. 7–11.
Kartelkin A.A., Kulikova N.V., Novoselov N.A., Rykunin S.N. Processing Small Birch Roundwood in the Conditions of Limited Demand for Technological Chips. *Predictive Nature of Scientific Research and the Practice of Its Implementation in the Conditions of Global Crisis in the Economy and Society: Collection of Scientific Articles Based on the Results*

of the International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg State University of Economics Publ., 2020, pp. 7–11. (In Russ.).

7. Куликова Н.В., Каптелкин А.А., Рыкунин С.Н. О технологии производства пиломатериалов из мелких круглых лесоматериалов // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Кострома, 2021. С. 142–144.

Kulikova N.V., Kaptelkin A.A., Rykunin S.N. About the Technology of Production of Sawn Timber from Small Round Timber. *Current Issues and Prospects for the Development of the Forest Industry Complex: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference*. Kostroma, 2021, pp. 142–144 p. (In Russ.).

8. Огурцов В.В. Теория брусо-развальной распиловки бревен: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2011. 230 с.

Ogurtsov V.V. *Cant Sawing Theory of Logs: Monograph*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2011. 230 p. (In Russ.).

9. Песоцкий А.Н., Ясинский В.С. Рациональное использование древесины в лесопилении. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 128 с.

Pesotskiy A.N., Yasinskiy V.S. *Rational Use of Wood in Sawmilling*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 128 p. (In Russ.).

10. Рыкунин С.Н., Куликова Н.В., Каптелкин А.А. Влияние движения капитала на востребованность живого труда в сфере материального производства // Постнеклассическая наука: междисциплинарность, проблемно-ориентированность и прикладной характер: сб. науч. ст. по итогам междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 29–30 июня 2021 г. СПб.: СПбГЭУ, 2021. С. 12–14.

Rykunin S.N., Kulikova N.V., Kaptelkin A.A. The Influence of Capital Movement on the Demand for Direct Labor in the Material Production Sphere. *Post-non-Classical Science: Interdisciplinarity, Problem Orientation, and Applied Nature: Collection of Scientific Articles Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg, June 29–30, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Economics Publ., 2021, pp. 12–14. (In Russ.).

11. Рыкунин С.Н., Куликова Н.В., Каптелкин А.А. Изменения востребованности живого труда при реализации стратегий развития отраслей в Российской Федерации // Современные научные гипотезы и прогнозы: от теории к практике: сб. науч. ст. по итогам междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 30–31 авг. 2021 г. СПб.: СПбГЭУ, 2021. С. 7–9.

Rykunin S.N., Kulikova N.V., Kaptelkin A.A. Changes in the Demand for Direct Labor in the Implementation of Development Strategies for Industries in the Russian Federation. *Current scientific Hypotheses and Predictions: from Theory to Practice: Collection of Scientific Articles Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg, August 30–31, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Economics Publ., 2021, pp. 7–9. (In Russ.).

12. Рыкунин С.Н., Куликова Н.В., Каптелкин А.А. Инновации в инвестициях в условиях международного разделения труда на предприятиях по производству строительных материалов из древесины // Инновационно-инвестиционный фундамент развития экономики общества и государства: от научных разработок к практике: сб. науч. ст. по итогам междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 27–28 дек. 2021 г. СПб.: СПбГЭУ, 2021. С. 11–13.

Rykunin S.N., Kulikova N.V., Kaptelkin A.A. Innovations in Investments in the Conditions of International Labor Division in the Enterprises Producing Construction Materials from Wood. *Innovation and Investment Foundation for the Development of the Economy of the Society and State: from Scientific Development to Practice: Collection of Scientific Articles Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg, December 27–28, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Economics Publ., 2021, pp. 11–13. (In Russ.).

13. *Титков Г.Г.* Краткое руководство по составлению и расчету поставов. М.; Л.: Гослесбуиздат, 1955. 50 с.
- Titkov G.G. *Summary Guide on Compiling and Calculation of Sawing Patterns*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1955. 50 p. (In Russ.).
14. *Торопов А.С., Шаранов Е.С.* Исследование плотности древесины березы, пораженной сердцевинной гнилью // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 6. С. 72–79.
- Toropov A.S., Sharapov E.S. Study of Birch Wood Density Affected by Firm Red Heart. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2006, no. 6, pp. 72–79. (In Russ.).
15. *Торопов А.С., Шаранов Е.С.* Исследование технологии получения однородных заготовок из березы, пораженной сердцевинной гнилью // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. / под ред. Е.А. Панфилова. Брянск: Брянск. гос. инж.-техн. акад., 2006. Вып. 14. С. 164–167.
- Toropov A.S., Sharapov E.S. Study of the Technology of Obtaining Homogeneous Blanks from Birch Wood Affected by Firm Red Heart. *Current Problems of the Timber Complex: Collection of Scientific Works Based on the Results of the International Scientific and Technical Conference*. Bryansk, Bryansk State Engineering and Technological Academy, 2006, iss. 14, pp. 164–167. (In Russ.).
16. *Торопов А.С., Шаранов Е.С.* Новые технологии раскроя древесины, пораженной сердцевинной гнилью // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2008. № 6(63). С. 59–62.
- Toropov A.S., Sharapov E.S. New Technologies for Cutting of Wood Affected by Firm Red Heart. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2008, no. 6(63), pp. 59–62. (In Russ.).
17. *Турушев В.Г.* Обрезка пиломатериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 56 с.
- Turushev V.G. *Sawn Timber Edging*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1970. 56 p. (In Russ.).
18. *Фельдман Х.Л.* Система максимальных поставов на распиловку. М.: Гослестехиздат, 1932. 276 с.
- Fel'dman Kh.L. *System of Maximum Sawing Pattern for Cutting*. Moscow, Gosl'estekhizdat Publ., 1932. 276 p. (In Russ.).
19. *Фергин В.Р.* Развитие теории раскроя пиловочного сырья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 4. С. 107–117.
- Fergin V.R. Development Development of the Sawing Process Theory. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 107–117. (In Russ.).
20. *Чубинский А.Н., Тамби А.А., Швец В.Л.* Анализ влияния качественных характеристик круглых лесоматериалов на выбор бревнопильного оборудования // Изв. СПбЛТА. 2014. Вып. 208. С. 63–72.
- Chubinskiy A.N., Tambi A.A., Shvets V.L. Analysis of Sawlogs Shape Influence on Sawmill Equipment Choice. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*, 2014, iss. 208, pp. 63–72. (In Russ.).
21. *Шторм Р.* Теория вероятности. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.: Мир, 1970. 368 с.
- Shtorm R. *Probability Theory. Mathematical Statistics. Statistical Quality Control*. Moscow, Mir Publ., 1970. 368 p. (In Russ.).
22. Brege S., Nord T., Sjoström R., Stehn L. Value-Added Strategies and Forward Integration in the Swedish Sawmill Industry: Positioning and Profitability in the High-Volume Segment. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, no. 25(5), pp. 482–493.
23. Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton, 1946. 575 p.
24. Johansson J. *Förutsättningar för Konkurrenskraftigt Utnyttjande av Svenskt Lövtimmer i Svenska Lövsågverk* [Requirements for Competitive Use of Swedish Hardwood in Swedish Hardwood Sawmills]. Växjö University, School of Industrial Engineering, 2003, report no. 5. 48 p.
25. Johansson J. *Mechanical Processing for Improved Products Made from Swedish Hardwood*. Växjö University, School of Technology and Design, 2008, no. 157. 140 p.

26. Johansson J. *Product Differentiation in the Swedish Hardwood Sawmill Industry*. Växjö University, School of Technology and Design, 2005, report no. 25. 41 p.

27. Makkonen M. *Renewing the Sawmill Industry: Studies on Innovation, Customer Value and Digitalization*. Dissertations Forestales, 2019. 65 p. <https://doi.org/10.14214/df.269>

28. Makkonen M. Stakeholder Perspectives on the Business Potential of Digitalization in the Wood Products Industry. *BioProducts Business*, 2018, vol. 3, no. 6, pp. 63–80. <https://doi.org/10.22382/bpb-2018-006>

29. Makkonen M., Sundqvist-Andberg H. Customer Value Creation in B2B Relationships: Sawn Timber Value Chain Perspective. *Journal of Forest Economics*, 2017, vol. 29, part B, pp. 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.08.007>

30. The Ministry of Industry, Employment and Communications. *Mer Trä i Bygandet: Underlag för en Nationell Strategi att Främja Användning av Trä i Bygandet*. Stockholm, 2004, DS 2004:1.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 691.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-168-181

Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях

В.А. Мартынов, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

М.С. Лисятников, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [V-6057-2018](https://orcid.org/0000-0002-5262-6609),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

А.В. Лукина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

С.И. Рощина[✉], д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия, 600000; martinov3369@gmail.com, mlisyatnikov@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 11.06.23 / Одобрена после рецензирования 10.09.23 / Принята к печати 15.09.23

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований деревоклееных балочных конструкций, выполненных с применением ламелей, изготовленных из деревьев сосны, частично поврежденных в лесонасаждениях. Цель – изучение напряженно-деформированного состояния деревоклееных балочных конструкций с применением древесины, нарушенной термическим воздействием лесного пожара. Ранее авторами выполнен значительный объем исследований физико-механических и прочностных свойств термически поврежденной древесины сосны, установлены зависимости прочностных характеристик древесины от степени огневого повреждения, мест отбора древесины по высоте ствола. Перед началом описанного в статье эксперимента на крупномасштабных моделях в программном комплексе «Лири 10.12» проведены численные исследования 4 серий однопролетных балок пролетом 6,0 м и сечением 140×500 мм, изготовленных в верхней и нижней частях сечения из древесины сосны 1-го сорта, а в средней части – из термически поврежденной древесины сосны. Выполнен сопоставительный анализ балок с различной долей замещения здоровой древесины сосны на ослабленную огнем воздействием пожара по высоте сечения: 76, 62, 51 и 36 %. В результате численного расчета исследуемых балок с применением выведенного коэффициента запаса (1,136) определена их фактическая несущая способность. Установлено, что снижение несущей способности балок БК-2 составляет 12,2 кН, это 16,05 % относительно эталонной балки БК-5, выполненной полностью из древесины сосны 1-го сорта; балок БК-4 – 7,4 кН, 9,74 % относительно балки БК-5. Разница между расчетными и экспериментальными разрушающими нагрузками равняется 9,5...14,3 %. Введение коэффициента запаса 1,136 при численном расчете обеспечивает достаточную сходимость расчетных и экспериментальных данных – погрешность составляет 3 %. Несущая способность эталонной балки БК-5 – 12,38 кН/м, балок БК-1–БК-4 – 8,53...12,06 кН/м, относительное снижение несущей способности не превышало 31,1...32,5 %. Установлено, что балка БК-4 с 34 % термически поврежденной древесины сосны позволяет обеспечить несущую способность на 97,5 % относительно балок, полностью выполненных из древесины сосны 1-го сорта.

Ключевые слова: древесина сосны, термически поврежденная древесина сосны, моделирование, деревоклееная балочная конструкция, деревокомпозитная балка, прочность, ресурсосбережение, лесной пожар

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>, в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2972.2021.4).

Для цитирования: Мартынов В.А., Лисятников М.С., Лукина А.В., Рощина С.И. Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 168–181. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-168-181>

Original article

The Use of Thermally Damaged Wood in Laminated Wood Beam Structures

Vladislav A. Martynov, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Mikhail S. Lisyatnikov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [V-6057-2018](https://orcid.org/0000-0002-5262-6609), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

Anastasiya V. Lukina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Svetlana I. Roshchina[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, ul. Gor'kogo, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation; martynov3369@gmail.com, mlisyatnikov@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru[✉]

Received on June 11, 2023 / Approved after reviewing on September 10, 2023 / Accepted on September 15, 2023

Abstract. This paper deals with the experimental research results of laminated wood beam structures made using lamellas produced from the pine trees, partially damaged in forest plantations. The purpose of the research has been to study the stress-strain state of laminated wood beam structures utilizing the wood damaged by the thermal exposure caused by a forest fire. Previously, the authors have carried out a significant amount of research into the physical, mechanical and strength properties of thermally damaged pine wood. They have established the dependence of the strength properties of the wood on the degree of fire damage and the wood sampling points according to the height of the stem. Prior to the experiment on the large-scale models in the “Lira 10.12” software complex, numerical studies of four series of single beams with a span of 6.0 m and a section of 140×500 mm produced from the 1st grade pine wood in the upper and lower parts of the section and from thermally damaged pine wood in the middle part of the section. A comparative analysis of the beams has been performed with varying percentages of replacement of the healthy pine wood with the one weakened by the fire along the height of the section: 76, 62, 51 and 36 %. As a result of the numerical calculation of the beams under study using the derived safety factor equaling 1.136, their actual load-bearing capacity has been determined. It has been established that a decrease in the load-bearing capacity of the CB-2 beams equals 12.2 kN, which is 16.05 % relative to

the reference beam CB-5, made entirely of the 1st grade pine wood. For the CB-4 beams a decrease in the load-bearing capacity equals 7.4 kN, which is 9.74 % relative to the reference beam CB-5. The difference between the calculated and experimental breaking loads is 9.5 to 14.3 %. The introduction of the safety factor equaling 1.136 in the numerical calculation ensures sufficient convergence of the calculated and experimental data (the measurement error is 3 %). The load-bearing capacity of the reference beam CB-5, made entirely of the 1st grade pine wood, is 12.38 kN/m. For beams CB-1 to CB-4 it equals from 8.53 to 12.06 kN/m. The relative decrease in the load-bearing capacity did not exceed 31.1 to 32.5 %. It has been established that the CB-4 beam, made using 34 % of lamellas produced from thermally damaged pine wood, allows for the load-bearing capacity of 97.5 % relative to the beams made entirely of the 1st grade pine wood.

Keywords: pine wood, thermally damaged pine wood, modeling, laminated wood beam structure, wood composite beam, strength, resource saving, forest fire

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>, as part of the grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science (МК-2972.2021.4).

For citation: Martynov V.A., Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Roshchina S.I. The Use of Thermally Damaged Wood in Laminated Wood Beam Structures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 168–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-168-181>

Введение

В России расположены огромные территории лесов, простирающиеся от Западной Европы до тихоокеанского побережья, что составляет 1/4 всех мировых запасов древесины (1,019 млрд га по данным ФГБУ «Рослесинфорг»). Главной проблемой сохранения естественных лесных экосистем являются лесные пожары. Ежегодно в России регистрируется от 9 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 500 тыс. до нескольких миллионов гектаров [12].

Лесные пожары далеко не всегда приводят к полному уничтожению древесных насаждений. Степень повреждения деревьев напрямую зависит от вида пожара: низовой пожар с высотой пламени до 0,5 м, только снизу опаливший стволы деревьев, незначительно влияет на состояние древостоев, и при этом есть большая вероятность их сохранения. Где прошел сильный низовой пожар с высотой пламени свыше 1,5 м и протяженностью подгара на стволах деревьев от 6–8 до 18 м и более, древостои подвергаются значительным повреждениям, а следовательно, изменяется качество древесины. Подвергнувшееся негативному воздействию пожара дерево теряет иммунитет, становясь более уязвимым к биоповреждениям. Увеличивающиеся продолжительность и интенсивность последних сезонов лесных пожаров ежегодно вызывают массовое поражение деревьев, способствуя последующей вспышке массового размножения различных видов подкорковых насекомых, заражающих впоследствии также и деревья, не затронутые пожаром [8, 13, 20].

Древесина является возобновляемым природным ресурсом, но тенденция сохранения природных ресурсов в настоящее время остается актуальной. Применение термически поврежденной древесины возможно в де-

ревоклееных конструкциях [2, 3, 6, 7, 10, 11, 15]. Предполагается, что это позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала [10, 19, 21].

Ранее авторами выполнен значительный объем исследований физико-механических и прочностных свойств термически поврежденной древесины сосны, установлены зависимости прочностных характеристик древесины от степени огневого повреждения, мест отбора древесины по высоте ствола [4, 16, 17]. Установлено, что древесина сосны из комлевой части с огневым повреждением до 15 % поперечного сечения ствола сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства, что дает возможность использовать ее как конструкционный материал, например в производстве ревоклееных конструкций. В ходе испытаний стандартных образцов из древесины сосны было обнаружено, что наибольшее снижение прочности по всем видам проведенных испытаний наблюдается в образцах, взятых из верхней части ствола дерева. Так, при статическом изгибе относительно «эталонной» (здоровой) древесины уменьшение предела прочности составляет более 20 %, при сжатии вдоль волокон – до 28,8 %, при растяжении – 30,6 %, при скалывании вдоль волокон – 22,7 %. Минимальное снижение предела прочности во всех видах испытаний наблюдалось у образцов, отобранных из комлевой части ствола: при статическом изгибе – 6,0 %, при сжатии вдоль волокон – 15,0 %, при растяжении вдоль волокон – 8,4 %, при скалывании вдоль волокон – 10,0 %.

Цель данной работы – изучение напряженно-деформированного состояния ревоклееных балочных конструкций с применением древесины, поврежденной термическим воздействием лесного пожара. Исследование направлено на определение и научное обоснование несущей способности таких конструкций.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования приняты однопролетные балки пролетом 6,0 м и сечением 140×500 мм, изготовленные в верхней и нижней частях сечения из древесины сосны 1-го сорта, а в средней части – из термически поврежденной комлевой древесины сосны. Выбранная длина пролета обусловлена требованием нормативных документов. Согласно ГОСТ 20850, балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б [5], что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, как показали испытания стандартных образцов на сжатие, растяжение, скалывание и статический изгиб, можно отнести древесину сосны, поврежденную огнем.

В эксперименте принимали участие балочные конструкции со следующими долями замещения древесины 1-го сорта на термически поврежденную древесину для балок: БК-1 – 76 %, БК-2 – 62 %, БК-3 – 51 %, БК-4 – 36 %. Такие процентные соотношения приняты исходя из толщины ламелей (30...32 мм) и пропорционального замещения древесины в растянутой и сжатой зонах балочной конструкции. Эти сечения и обозначения для серии балочных конструкций показаны на рис. 1.

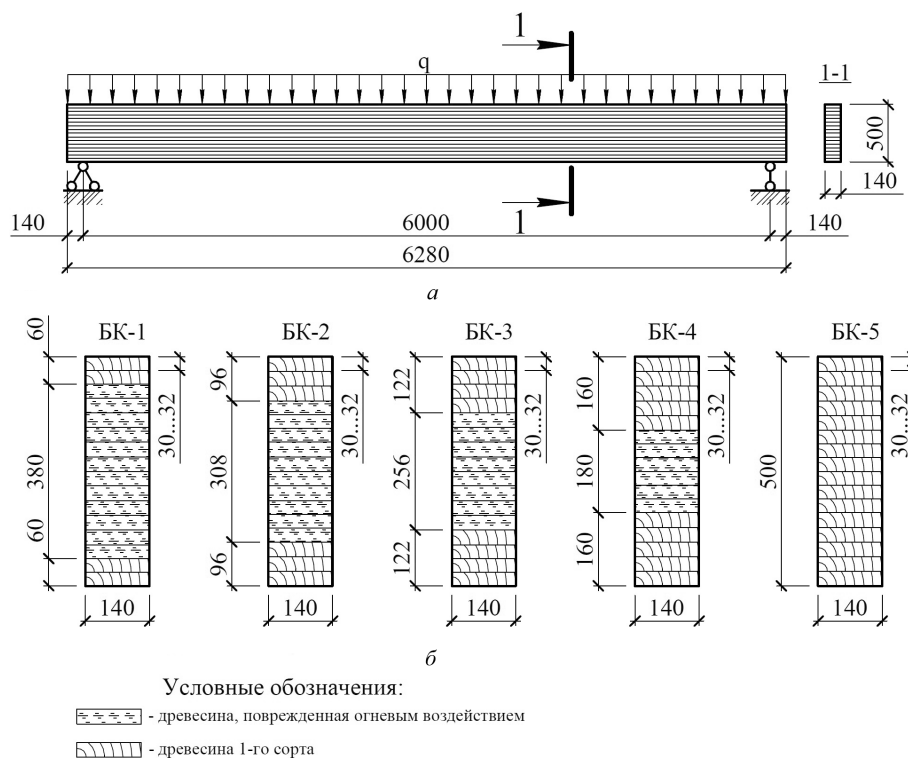


Рис. 1. Модель исследуемой деревоклееной конструкции: *a* – расчетная схема; *б* – сечения деревоклееной балки: БК-1–БК-4; БК-5 – «эталонная» балка из древесины 1-го сорта (*q* – равномерно распределенная нагрузка)

Fig. 1. Model of the laminated wood structure under study: *a* – design diagram; *б* – the sections of the laminated wood beams: CB-1 to CB-4; CB-5 – the reference beam made of the 1st grade pine wood (*q* – uniformly distributed load)

Для определения рациональных отношений массы термически поврежденной древесины сосны к общей массе поперечного сечения деревоклееной балки выполнены численные исследования в программном комплексе (ПК) «Лири 10.12». На 1-м этапе была сформирована линейная задача. Древесина в случае линейного расчета задана как универсальный пространственный 8-узловой изопараметрический конечный элемент. В параметрах данного элемента заданы плотность древесины (500 кг/м^3) и следующие жесткостные характеристики [3, 9, 14, 18]: модуль упругости для древесины сосны 1-го сорта – 400, 10 000 и снова 400 МПа; для древесины сосны, поврежденной огнем, – 320, 6400 и 320 МПа; коэффициент Пуассона для обоих видов древесины – 0,50 и 0,02; модуль сдвига, также для обоих видов древесины, – 500 МПа.

Нагружение балок в численном расчете осуществлялось равномерно распределенной нагрузкой с шагом 2,0 кН/м. Расчетные схемы исследуемых балок, деформированные схемы и характер распределения нормальных напряжений отражены на рис. 2. Результаты линейного расчета представлены значениями нормальных напряжений в табл. 1.

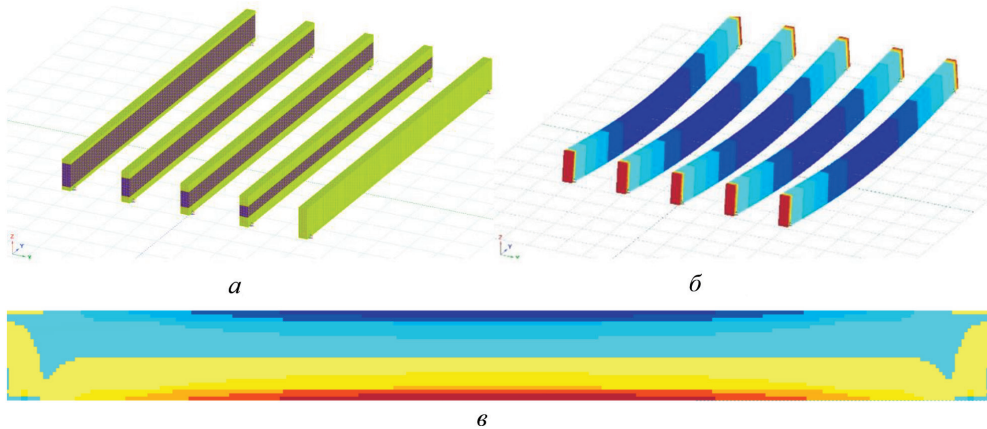


Рис. 2. Численные исследования балок БК-1–БК-5: *a* – расчетные схемы; *б* – деформированные схемы; *в* – характер распределения нормальных напряжений

Fig. 2. Numerical studies of the beams CB-1 to CB-5: *a* – design diagrams; *б* – deformed diagrams; *в* – the nature of the normal stress distribution

Таблица 1

Значения нормальных напряжений (МПа) для деревоклееных балок

Normal stress values (MPa) for laminated wood beams

Нагрузка, кН/м	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
22	<u>20,70</u> 8,71	<u>19,24</u> 5,75	<u>18,89</u> 4,63	<u>18,45</u> 2,81	<u>18,27</u> –
24	<u>22,58</u> 9,50	<u>20,99</u> 6,27	<u>20,57</u> 5,05	<u>20,12</u> 3,06	<u>19,93</u> –
26	<u>24,47</u> 10,29	<u>22,74</u> 6,79	<u>22,28</u> 5,47	<u>21,80</u> 3,32	<u>21,60</u> –
28	–	<u>24,49</u> 7,32	<u>24,00</u> 5,89	<u>23,48</u> 3,57	<u>23,26</u> –
30	–	–	–	<u>25,15</u> 3,83	<u>24,92</u> –
Разрушающая нагрузка, кН/м	7,51	9,44	10,00	10,62	10,90
Относительное снижение несущей способности, %	31,12	13,36	8,20	2,49	–

Примечание: Здесь и в табл. 2 в числителе приведены напряжения в древесине 1-го сорта, в знаменателе – 3-го.

Для сопоставления результатов численного расчета с фактической работой деревоклееных балочных конструкций выполнены экспериментальные исследования балок, изготовленных с применением термически поврежденной древесины сосны. Проведен численный расчет в нелинейной постановке

задачи с моделированием фактических физико-механических характеристик материалов, определенных по результатам ранее выполненных испытаний древесины сосны на стандартных образцах. Протестированы модели деревоклееных балок, выполненных в масштабе 1:2, с уменьшением всех геометрических параметров, в т. ч. толщины ламелей, в 2 раза. Для анализа сходимости результатов необходимо сравнение не менее 3 показателей разрушающей нагрузки, определенных численным расчетом и экспериментально. Было изготовлено 2 серии экспериментальных балок БК-2 и БК-4 пролетом 3,0 м и сечением 70×250 мм с частичным замещением ламелей на термически поврежденную древесину сосны и 1 серия эталонных балок БК-5. Результаты численных исследований балок БК-2 показывают, что применение термически поврежденной древесины позволяет уменьшить использование древесины 1-го сорта более чем в 1,6 раза, при этом снижение несущей способности балки составит всего 13,36 %. Для балок БК-4 установлено наименьшее снижение несущей способности по сравнению с эталонной – на 2,49 %. Балки БК-1, обладающие наименьшей несущей способностью, не были взяты для эксперимента, как и балки БК-3, целесообразность применения которых, исходя из расчетов, ниже по сравнению с БК-2 и БК-4.

Исследуемые деревоклееные балки изготовлены в производственных условиях на сертифицированном оборудовании. Толщина ламелей принята равной 15–16 мм исходя из требований СП 64.13330 и технологических особенностей производства. Склеивание ламелей осуществлялось с применением клеевой композиции раздельного нанесения клея с отвердителем ММФ 1255/7555 AkzoNobel Cascomin на основе меламина. Перед выполнением работ по производству экспериментальных балок клеевое соединение термически поврежденной древесины испытано на образцах в соответствии с ГОСТ 33121 в климатической камере КТХВ-1000. Образцы древесины последовательно подвергались замачиванию, замораживанию, оттаиванию и высушиванию [1]. Механические испытания на скалывание в клеевых соединениях образцов были проведены после 40 циклов температурно-влажностных воздействий. Установлено, что разрушение всех образцов произошло по древесине, т. е. имеет когезионный характер. Следовательно, можно сделать вывод о достаточной адгезии термически поврежденной древесины сосны, а также высоком качестве и прочности клеевого соединения.

Согласно рекомендациям [11], балки покрытий и перекрытий должны испытываться в условиях шарнирного опирания в опорных точках. Испытание крупномасштабных моделей балочных конструкций выполнено на экспериментальном испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 3.

Экспериментальная установка представляет собой каркас из двутавровых балок, к которому прикреплены стальные направляющие в виде труб сечением 120×120 мм. По данным направляющим перемещается траверса с подвижным роликом. За счет него обеспечивается переход нагрузки от домкрата к балке через шарнир. Боковые опоры воспринимают нагрузки от испытываемой балки и представляют собой направляющие из прямоугольных труб с подвижной траверсой, которая фиксируется на необходимой высоте. Источником силовых воздействий являются гидравлические домкраты, объединенные шлангами высокого давления с устройством создания давления – ручным гидравлическим насосом с контрольным манометром.

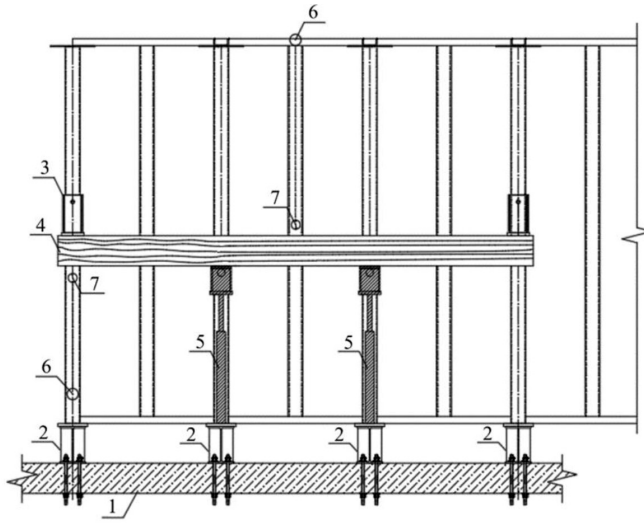


Рис. 3. Схема испытательного стенда и оборудования:
 1 – силовой пол; 2 – рама стенда; 3 – опора балки; 4 – балка; 5 – гидравлический домкрат, соединенный с динамометром; 6 – прогибомер (6-ПАО); 7 – индикаторы часового типа

Fig. 3. Diagram of the test bench and equipment:
 1 – force plate; 2 – stand structure; 3 – beam seat; 4 – beam; 5 – hydraulic jack connected to the dynamometer; 6 – deflectometer 6-PAO; 7 – dial indicators

Нагружение балки производили поэтапно с шагом 2,0 кН. Время выдержки после каждого этапа принимали равным 5–10 мин с целью стабилизации деформаций на каждом этапе нагружения.

Для экспериментальных исследований выбран тензометрический метод с использованием измерительного комплекса TDS-530 и тензорезисторов с основанием 20 мм. Тензорезисторы расположены в зоне действия максимального изгибающего момента по ширине сечения. Вертикальные перемещения и углы поворота устанавливались измерителями отклонения 6-ПАО.

Перед испытанием выполнен численный расчет балок в нелинейной постановке задачи в ПК «Лира 10.12». Это позволило предварительно оценить распределение напряжений в деревоклееных балках и установить разрушающую нагрузку. В качестве физической модели древесины сосны принята трансформная модель. Формирование типов жесткости для древесины происходит с помощью физически нелинейных универсальных пространственных 8-узловых изопараметрических конечных элементов. По результатам ранее выполненной серии испытаний термически поврежденной древесины и древесины сосны 1-го сорта на стандартных образцах были построены усредненные графики зависимости «напряжение – деформация». Задание фактических значений коэффициента Пуассона, объемного веса, напряжений и соответствующих им деформаций позволяет провести численный расчет с учетом действительной работы древесины сосны.

Нагружение балок в численном эксперименте в нелинейной постановке задачи осуществлялось 2 сосредоточенными нагрузками с шагом 2,0 кН. Расчетная схема исследуемых балок представлена на рис. 4, характер распределения нормальных напряжений в балках – на рис. 5.

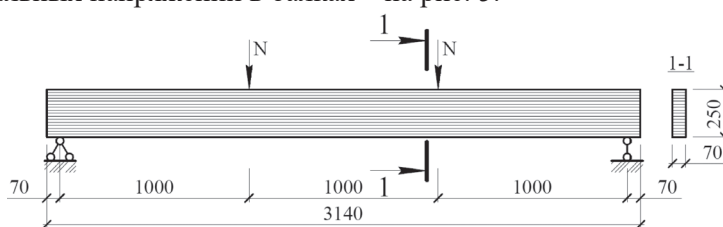


Рис. 4. Расчетная схема испытываемых балочных конструкций (N – напряжение)

Fig. 4. Design diagram of the tested beam structures (N – stress)

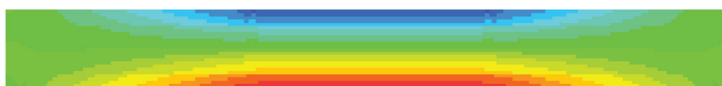


Рис. 5. Характер распределения нормальных напряжений балок БК-2, БК-4, БК-5, МПа

Fig. 5. The nature of the normal stress distribution for the CB-2, CB-4 and CB-5 beams, MPa

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка несущей способности экспериментальных крупномасштабных моделей балок выполнялась по предельным состояниям I и II группы методом сравнения максимальных нормальных напряжений в слоях древесины сосны 1-го сорта и термически поврежденной древесины с их расчетными сопротивлениями изгибу, при превышении которых произойдет разрушение. Расчетное сопротивление древесины сосны 1-го сорта составляет 39 МПа, древесины сосны 3-го сорта, которому соответствует термически поврежденная древесина, – 30 МПа. Значения нормальных напряжений приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения нормальных напряжений (МПа) крупномасштабных моделей
деревянных балок при нелинейном расчете**
**Normal stress values (MPa) of the large-scale models of laminated wood beams
in nonlinear calculations**

Сосредоточенная нагрузка, кН	БК-2	БК-4	БК-5
32	<u>23,81</u> 9,32	<u>22,78</u> 5,10	<u>22,04</u> –
34	<u>24,71</u> 9,86	<u>23,64</u> 5,42	<u>22,96</u> –
36	<u>25,64</u> 10,58	<u>24,50</u> 5,74	<u>23,79</u> –
38	<u>26,49</u> 11,33	<u>25,41</u> 6,06	<u>24,66</u> –
Суммарная разрушающая нагрузка, кН	66,12	70,48	73,30
Относительное снижение несущей способности, %	9,79	3,84	–

Рис. 6 иллюстрирует ход испытаний крупномасштабных моделей. По результатам данных работ построены диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений и прогибов от действующей нагрузки (рис. 7, см. с. 178). Результаты численного и экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

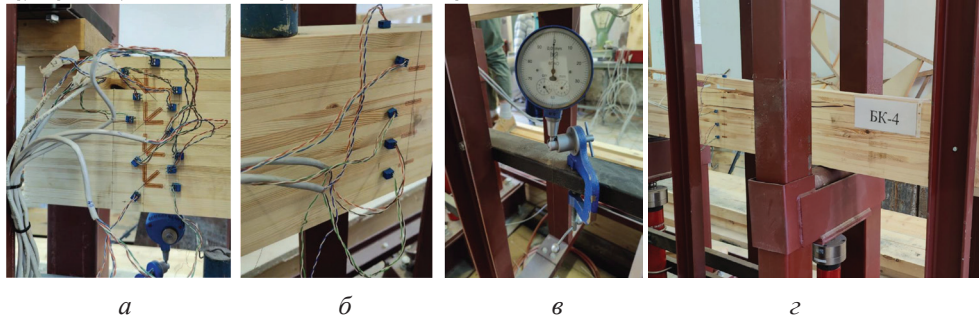


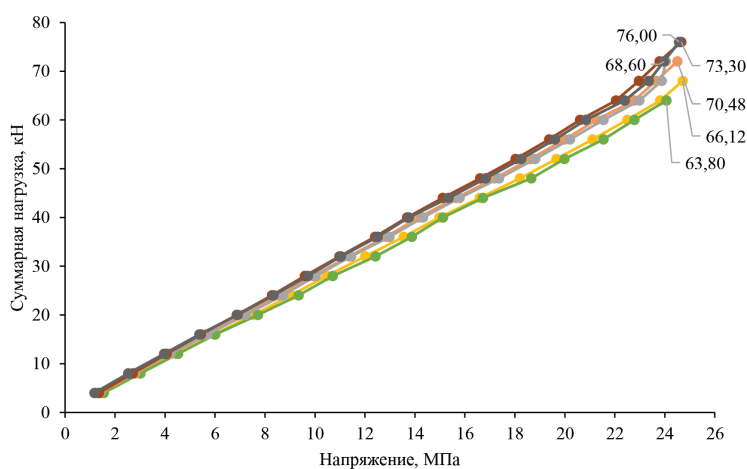
Рис. 6. Ход эксперимента: *а-в* – размещение измерительных приборов (*а, б* – тензорезисторы на опоре балки и в середине пролета соответственно; *в* – прогибомер); *з* – разрушение балки БК-4 в зоне растяжения

Fig. 6. The course of the experiment: *a-v* – placement of the measuring instruments (*a* – the strain gauges on the beam seat; *б* – the strain gauges in the middle of the span; *в* – deflectometer); *з* – the fracture of the CB-4 beam in the tension zone

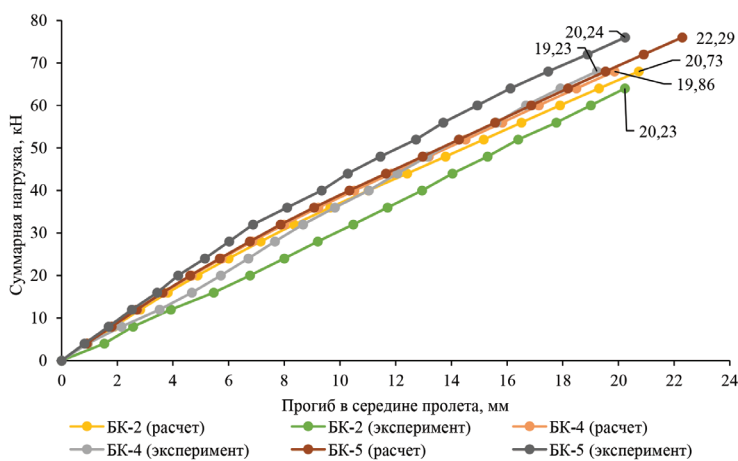
Таблица 3

Сопоставительный анализ результатов численного расчета и экспериментальных исследований крупномасштабных моделей деревоклееных балок
Comparative analysis of the results of the numerical calculations and the experimental research on the large-scale models of laminated wood beams

Источник данных	Суммарная разрушающая нагрузка, кН	Нормальные напряжения в ламелях, МПа				Прогиб, мм
		из древесины 1-го сорта		из термически поврежденной древесины		
		при сжатии	при растяжении	при сжатии	при растяжении	
<i>Балка БК-2</i>						
Нелинейный расчет в ПК «Лира 10.12»	66,12	23,99	17,32	9,61	8,98	19,54
Эксперимент	63,80	24,00	17,14	9,49	8,72	19,01
<i>Балка БК-4</i>						
Нелинейный расчет в ПК «Лира 10.12»	70,48	24,00	17,38	6,53	5,13	20,56
Эксперимент	68,60	23,90	17,20	6,38	4,78	19,23
<i>Балка БК-5</i>						
Нелинейный расчет в ПК «Лира 10.12»	73,30	24,00	17,32	–	–	21,36
Эксперимент	76,00	24,57	17,57	–	–	20,24



а



б

Рис. 7. Диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений (а) и прогибов (б) исследуемых балок от действующей нагрузки по результатам расчетов в сравнении с экспериментальными данными

Fig. 7. Diagrams of the dependence of the maximum normal stresses (а) and deflections (б) of the beams under study on the actual load according to the results of the calculations compared to the experimental data

Разница между расчетными и экспериментальными разрушающими нагрузками составляет 2,67...3,55 %, что подтверждает корректность выбора математической модели и расчетных характеристик материала. Разница разрушающих нагрузок натуральных деревоклееных балочных конструкций и крупномасштабных моделей балок составляет 9,5...14,3 %. Для учета фактического напряженно-деформированного состояния натуральных деревоклееных балочных конструкций при численном линейном расчете введен коэффициент 1,136, позволяющий обеспечить сходимость расчетных и определенных экспериментально значений несущей способности конструкции с погрешностью до 3 %.

Введенный коэффициент запаса дает возможность определить фактическую несущую способность исследуемых деревоклееных балок БК-1–БК-5 пролетом 6,0 м. Для этого выполнен расчет исследуемых балок в ПК «Лира 10.12» в нелинейной постановке задачи с использованием фактических характеристик материалов, примененных авторами для моделирования работы крупномасштабных моделей, и полученного коэффициента. Расчетная схема исследуемых балочных конструкций приведена на рис. 1, 2. Фактическая несущая способность балок БК-1–БК-5 равнялась 8,53; 10,72; 11,36; 12,06 и 12,38 кН/м соответственно. Снижение несущей способности относительно «эталонной» балки БК-5 составило (%): у БК-1 – 31,12; БК-2 – 13,36; БК-3 – 8,20 и БК-4 – 2,49.

Выводы

1. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность реального применения в деревоклееных балочных конструкциях термически поврежденной древесины сосны. Это позволяет расширить реальную базу пиломатериалов для производства деревоклееных конструкций.

2. Установлено, что разница между расчетными и экспериментальными разрушающими нагрузками составляет 9,5...14,3 %. Введение коэффициента запаса 1,136 при численном расчете обеспечивает достаточную сходимость расчетных и экспериментальных данных: погрешность – 3 %.

3. На крупномасштабных моделях установлено снижение несущей способности балок: БК-2 – на 12,20 кН, что составляет 16,05 % относительно данных эталонной балки БК-5 из древесины сосны 1-го сорта; балок БК-4 – на 7,4 кН, это 9,74 % от показателя балки БК-5.

4. Определена фактическая несущая способность деревоклееных балочных конструкций, частично выполненных из ламелей термически поврежденной сосны. Несущая способность балки БК-5 составила 12,38 кН/м, балок БК-1–БК-4 – 8,53...12,06 кН/м, снижение несущей способности по сравнению с показателем эталонной балки при этом равняется 31,12...32,49 %.

5. Установлено, что балка БК-4, выполненная с 34 % применением ламелей из термически поврежденной древесины сосны, позволяет обеспечить несущую способность на 97,5 % относительно балок, полностью выполненных из древесины сосны 1-го сорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баланцева Н.Б., Мелехов В.И., Калиничева О.А. Совершенствование метода расчета процесса конвективной сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 4. С. 132–139.

Balantseva N.B., Melekhov V.I., Kalinicheva O.A. Improvement of the Method for Calculating the Process of Convective Drying of Sawn Timber. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 132–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.132>

2. Губенко Л.А., Хандов М.Г. Возможность применения низкосортной древесины в клееных деревянных конструкциях // Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В.А. Лебедева, В.А. Трулля, Е.И. Светозаровой, Архангельск, 28–30 июня 2016 г. /

САФУ им. М.В. Ломоносова, СПбГАСУ, Ассоц. выпускников АГТУ, РААСН, М-во стр-ва Архангельской обл., Союз проф. строителей, Союз проектировщиков, Ассоц. инж. изыскания в стр-ве; отв. ред. Б.В. Лабудин. Архангельск: Агентство рекламы РАД, 2016. С. 64–68.

Gubenko L.A., Khandov M.G. The Possibility of Using Low-Grade Wood in Glued Wooden Structures. *Proc. of the VII Int. Sci-Tech Conf. dedicated to the 100th anniversary of the birth of SPbGASU (LISI) scientists V.A. Lebedev, V.A. Trull, E.I. Svetozarova "Construction Science – XXI century: Theory, Education, Practice, Innovations for the North Arctic Region"*, June 28–30, 2016. Arkhangelsk, RAD Advertising Agency LLC, 2016, pp. 64–68. (In Russ.)

3. Лабудин Б.В., Морозов В.С., Попов О.Н., Никитина Т.А., Орлов А.О. Сопrotивление клееной древесины растяжению под различными углами к направлению волокон // Строит. механика и расчет сооружений. 2019. № 3(284). С. 12–17.

Labudin B.V., Morozov V.S., Popov O.N., Nikitina T.A., Orlov A.O. The Resistance of Laminated Wood to Tension at Different Angles of the Orientation of the Fibers. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzheniy = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2019, no. 3(284), pp. 12–17. (In Russ.)

4. Лукина А.В., Лисятников М.С., Мартынов В.А., Рощина С.И. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия // Строительство и реконструкция. 2022. № 6(104). С. 40–49.

Lukina A.V., Lisyatnikov M.S., Martinov V.A., Roschina S.I. Strength and Deformability of Raw Wood after Fire Exposure. *Construction and Reconstruction*, 2022, no. 6(104), pp. 40–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49>

5. Найчук А.Я., Погорельцев А.А., Серов Е.Н. Теория и практика дальнейшего развития деревянных конструкций. Ч. 1. Нагрузки, расчетные сопротивления и длительная прочность древесины // Промышл. и гражд. строительство. 2018. № 6. С. 38–44.

Naichuk A.Ya., Pogorel'tsev A.A., Serov Ye.N. Theory and Practice of Further Development of Wooden Structures. Part 1: Loads, Design Resistance and Long-Term Strength of Timber. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2018, no. 6, pp. 38–44. (In Russ.)

6. Никитина А.В., Исакова В.В., Ашихмина А.А. Древесина и клеи, применяемые при изготовлении клееных деревянных конструкций // Интеграция наук. 2018. № 8(23). С. 431–433.

Nikitina A.V., Isakova V.V., Ashikhmina A.A. Wood and Adhesives Used in the Manufacture of Laminated Wood Structures. *Integratsiya Nauk = Integration of Sciences*, 2018, no. 8(23), pp. 431–433. (In Russ.)

7. Патент № 2587215 С1 РФ, МПК E04B 1/10 (2006.01), E04B 2/70 (2006.01). Деревянный клееный строительный элемент, способ возведения стеновых конструкций из деревянных клееных строительных элементов: № 2015103127/03; заявл. 30.01.2015; опубл. 20.06.2016 / К.В. Иванов.

Ivanov K.V. Wooden Glued Structural Element, Method of Erecting Wall Structures from Wooden Glued Structural Elements. Patent RF, no. RU 2587215 C1, 2016. (In Russ.)

8. Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Козловский Е.Е., Грищенко М.Ю. Защита еловых лесов от вспышек *Ips typographus* (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 55–67.

Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A., Kozlovski E.E., Grishchenko M.Yu. Protection of Spruce Forests from Outbreaks of *Ips Typographus* (Review). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 4, pp. 55–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-55-67>

9. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // Промышл. и гражд. строительство. 2019. № 3. С. 35–41.

Pogorel'tsev A.A., Pyatikrestovskiy K.P. Issues of Further Development and Improvement of Design Standards for Wood Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* = Industrial and Civil Engineering, 2019, no. 3, pp. 35–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.03.35-41>

10. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И., Погорельцев А.А., Клюкин А.А. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14, № 1. С. 145–154.

Pyatikrestovskiy K.P., Travush V.I., Pogorel'tsev A.A., Klukin A.A. Development of Structures from Solid Wood for Objects of Infrastructure. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 145–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154>

11. Тюрин О.Е. Повышение прочности и жесткости деревоклееных балочных элементов с армированием композитными стержнями: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2022. 128 с.

Tyurina O.E. *Increasing the Strength and Rigidity of Wood-Laminated Beam Elements Reinforced with Composite Rods*: Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2022. 128 p. (In Russ.).

12. Arefyev S.P. West Siberian Latitudinal Xylomycological Scale and Its Use for Indicating Forest Conditions. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, iss. 5, pp. 527–541. <https://doi.org/10.1134/S1995425518050037>

13. Castillo M.E., Garfias R., Plaza Á. Effects of Fire on Forest Communities and Sclerophyllous Scrubs in Central Chile as a Basis for the Formulation of Restoration Guidelines. *Forestist*, 2021, vol. 71, iss. 1, pp. 9–17. <https://doi.org/10.5152/forestist.2020.20042>

14. Lisyatnikov M., Lukina A., Chibrikov D., Labudin B. The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. *Proceedings of MPCPE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham, Springer, 2022, vol. 182, pp. 523–533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_46

15. Lukin M., Prusov E., Roshchina S., Karelina M., Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. *Buildings*, 2021, vol. 11, iss. 46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>

16. Lukina A., Lisyatnikov M., Lukin M., Vatin N., Roschina S. Strength Properties of Raw Wood after a Wildfire. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, iss. 3(119), art. no. 11907. <https://doi.org/10.34910/MCE.119.7>

17. Lukina A., Lisyatnikov M., Martinov V., Chernykh A., Roschina S. Mechanical and Microstructural Changes in Post-Fire Raw Wood. *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7, iss. 3, pp. 44–52. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52>

18. Scandelli H., Ahmadi-Senichault A., Richard F., Lachaud J. Simulation of Wood Combustion in PATO Using a Detailed Pyrolysis Model Coupled to fireFoam. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, iss. 22, art. no. 10570. <https://doi.org/10.3390/app112210570>

19. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, pp. 1015–1034. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>

20. Veselkin D., Kuyantseva N., Pustovalova L., Mumber A. Trends in Forest Fire Occurrence in the Ilmensky Nature Reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014. *Forests*, 2022, vol. 13, iss. 4, art. no. 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>

21. Yang Y., Hu X., Han M., He K., Liu B., Jin T., Cao X., Wang Y., Huang J. Post-Fire Temporal Trends in Soil Properties and Revegetation: Insights from Different Wildfire Severities in the Hengduan Mountains, Southwestern China. *Catena*, 2022, vol. 213, art. no. 106160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106160>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 66.021.3.001.57:532.529

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-182-194

Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства

С.В. Анискин[✉], *д-р техн. наук, проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

В.С. Куров, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; asv-47@mail.ru[✉], vskurov18@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.22 / Одобрена после рецензирования 20.02.23 / Принята к печати 22.02.23

Аннотация. Для производства целлюлозы построены крупномасштабные предприятия, к которым в процессе их эксплуатации предъявляются новые, отличающиеся от проектных, требования по экономической эффективности, безопасности труда, воздействию на местное население и окружающую среду. Значительный успех в этой работе достигнут изменением технологии регенерации щелока, переходом к сжиганию черного щелока повышенной концентрации, что позволяет практически полностью ликвидировать самый крупный источник выбросов сероводорода и метилмеркаптана с дымовыми газами, снизить потери серы и повысить энергетическую эффективность содорегенерационных котлов. Другим значимым источником выбросов содорегенерационного котла является труба бака растворителя плава. В баке происходит технологическая операция растворения расплавленных солей натрия слабым белым щелоком, который подается из цеха каустизации. Современное развитие технологии растворения плава связано с совершенствованием оборудования, совместимого с технологией регенерации химических реактивов производства целлюлозы. На вытяжной трубе бака плава устанавливают теплообменники и газоочистные аппараты систем «газ–жидкость», которые легче приспособить к технологическим требованиям по сравнению с другими системами. Установка такого оборудования приводит к изменению технологии растворения плава и затрагивает технологию каустизации и регенерации извести. Проведено исследование взаимосвязи технических решений по обеспечению безопасности персонала в помещении котельного цеха, по рекуперации тепла, химикатов и очистке газовых выбросов с изменениями технологии растворения плава содорегенерационного котла целлюлозного производства. На основе экспериментальных данных и математической модели движения парогазовой смеси в вытяжной трубе бака растворителя плава рассмотрена технологическая возможность установки теплообменников на разной высоте трубы и возможность эффективной очистки газовых выбросов с помощью прямоточного распылительного аппарата. Также изучены применяемость орошения парогазового потока

© Анискин С.В., Куров В.С., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

слабым белым щелоком, образующимся в цикле регенерации химикатов целлюлозного производства, и условия обеспечения надежной работы газоочистного оборудования. Получены количественные характеристики необходимого изменения потребления и состава слабого белого щелока, способы его подачи в бак плава.

Ключевые слова: плав, раствор, слабый белый щелок, пыль, сероводород, регенерация, рекуперация, конденсат, очистка, воздух, пар

Для цитирования: Анискин С.В., Куров В.С. Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 182–194. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-182-194>

Original article

Recovery and Purification of Gas Emissions from Pulp Production

Sergey V. Aniskin[✉], Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

Victor S. Kurov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; asv-47@mail.ru[✉], vskurov18@mail.ru

Received on November 24, 2022 / Approved after reviewing on February 20, 2023 / Accepted on February 22, 2023

Abstract. For pulp production, large-scale enterprises have been built which, while in operation, are subject to new requirements, different from the design ones, for economic efficiency, labour safety, as well as impact on the local population and the environment. Significant success in this work has been achieved by changing the liquor recovery technology, switching to burning black liquor of increased concentration, which makes it possible to almost completely eliminate the largest source of hydrogen sulfide and methyl mercaptan emissions with flue gases, reduce sulfur losses and improve energy efficiency of soda recovery boilers. Another significant source of soda recovery boiler emissions is a smelt dissolving tank vent. An important technological operation of dissolving molten sodium salts with weak white liquor supplied from the causticization shop takes place in the tank. The modern development of smelt leaching technology is related to the improvement of equipment compatible with the technology of regeneration of chemical reagents for pulp production. Heat exchangers and gas purifiers of “gas-liquid” systems, easier to adapt to technological requirements compared to other systems, are installed on the dissolving tank vent. The installation of such equipment provides the change in the smelt leaching technology, and affects the technology of causticization and lime recovery. This article covers the research of the relationship between the technical solutions ensuring the safety of personnel in the boiler shop, heat and chemicals recovery, as well as purification of gas emissions and the changes in the technology of smelt leaching in the soda recovery boiler of the pulp mill. On the basis of experimental data and a mathematical model of the movement of the vapour-gas mixture in the smelt dissolving tank vent, the technological feasibility of installing heat exchangers at different heights of the vent and the possibility of effective purification of gas emissions using a direct-flow sprayer have been considered. The applicability of the irrigation of the steam-gas flow with weak white liquor, which is formed during the cycle of chemical regeneration in pulp production, as well as the conditions for ensuring reliable operation of gas purification equipment, have been

investigated. The quantitative characteristics of the necessary change in consumption and composition of weak white liquor and the methods of its supply to the dissolving tank have been obtained.

Keywords: melt, solution, weak white liquor, dust, hydrogen sulfide, regeneration, recuperation, condensate, purification, air, vapour

For citation: Aniskin S.V., Kurov V.S. Recovery and Purification of Gas Emissions from Pulp Production. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 182–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-182-194>

Введение

Плава, образующийся в содорегенерационных котлах (СРК) сульфатного производства целлюлозы, необходим для создания замкнутого цикла регенерации варочного раствора [17, 18]. Плава является восстановленным расплавом солей натрия с температурой 850–900 °С. Он состоит в основном из соединений натрия: карбоната – 60–80 %, сульфида – 10–30 %, сульфата – 10–15 % и гидроксида – 2–4 % [9].

Плава растворяют в слабом белом щелоке с температурой 70–80 °С в специально оборудованном баке-растворителе. В результате образуется зеленый щелок с температурой 90 °С. Технология растворения плава включает мероприятия: для предотвращения взрывов, перемешивания зеленого щелока и снижения выбросов пара и вредных веществ в рабочее помещение [8, 11].

Для предотвращения взрывов при сливе внутри бака до контакта с раствором плава дробят на части с помощью струй пара. Растворение производят при перемешивании. Бак оборудован вытяжной трубой и крышкой с открытым окном у летки, в которое сливается плава. В настоящее время практически отсутствует понимание бака плава как устройства местной вентиляции с самотягой, предназначенного для снижения токсичных выбросов в рабочее помещение. Обычно ограничиваются представлением о необходимости отвода в атмосферу газов и паров, выделяющихся при растворении плава [5, 10]. Эта функция отражает лишь часть работы местной вентиляции. Труба должна обеспечивать не только выход парогазового потока, ее основная задача заключается в создании разрежения внутри бака, достаточного для засасывания воздуха из рабочего помещения через окно летки со скоростью, требуемой нормами безопасности противоточного проникновения токсичных веществ в помещение котельного цеха. Вентиляционная труба не является средством подавления или предотвращения взрыва. Внутри бака над поверхностью раствора образуется паровоздушная смесь, в которой содержатся мелкие частички плава в виде насыщенной парами воды пыли, брызги зеленого щелока, газы в виде сероводорода и метилмеркаптана, которые являются токсичными.

Наиболее токсичны сероводород и метилмеркаптан, которые относятся к высокоопасным газам (класс опасности – 2). Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны для сероводорода – 10 мг/м³, для метилмеркаптана – 0,8 мг/м³. В соответствии с требованиями безопасности для местной вытяжной вентиляции скорость подсоса воздуха из цеха в бак плава, по строительным правилам (СП 118.13330–2012 «Общественные здания и сооружения»), для общественных зданий и сооружений должна быть не менее 1 м/с. Для нефтехими-

ческих предприятий [2] по метилмеркаптану следует увеличивать предельную скорость до 1,3 м/с (ВНТП 3–85 «Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти», ВСН 21–77 «Инструкция по проектированию отопления и вентиляции нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий»).

По результатам измерений [6], на различных предприятиях отрасли паровоздушный поток в трубах бака плава состоит из воздуха на 20 % и из пара – на 80 %, т. е. из воздуха, насыщенного паром при температуре около 93 °С. Количество пылевого уноса в пересчете на карбонат натрия составляет 4,5 кг/т абсолютно сухой целлюлозы, количество сероводорода в пересчете на серу – 0,056 кг/т абсолютно сухой целлюлозы. С плавом теряется 4–5 % тепла в балансе СРК, которые можно частично вернуть, конденсируя парогазовые выбросы [9].

По этой причине возникают другие задачи, прямо не связанные с безопасностью персонала, – это задачи возврата (рекуперации) тепла и химикатов, а также снижения вредных выбросов в окружающую среду. Известно, что при установке теплообменников и скрубберов [3, 15] образуется значительное количество конденсата и изменяются тягодутьевые характеристики вытяжной трубы [6], что может приводить к изменению состава зеленого щелока и режима работы вытяжной вентиляции. Большое значение имеют способ подачи слабого белого щелока и содержание в нем извести, особенно для достижения высокой степени очистки газовых выбросов. Из этого следует, что решение обозначенных задач повлечет изменение технологии растворения плава.

Цель – исследование изменения технологического режима растворения плава при установке оборудования для рекуперации и очистки газовых выбросов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является изменение технологического режима растворения плава при установке теплообменного и газоочистного оборудования: количества образующегося конденсата, скорости и температуры парогазового потока, тягодутьевого давления, содержания извести в слабом белом щелоке и способа его подачи в бак плава.

Исследование проводили методом математического моделирования процессов массо- и теплообмена в парогазовых выбросах бака плава. Разработаны М-файлы в среде MatLab. Решение представлено в виде замкнутой системы уравнений и в виде графиков, отражающих численные взаимосвязи искомых параметров.

Анализ осадков в элементах оборудования струйного газопромывателя (СГП) выполнялся в заводской лаборатории Архангельского целлюлозно-бумажного комбината гравиметрическим методом с выпариванием фильтра и контролем кальция на пламенном фотометре.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим изменение режима транспортировки паровоздушной смеси в вытяжной трубе при установке теплообменника. Наиболее широко применяются трубчатые теплообменники различных фирм, располагаемые внутри вытяжной трубы на значительной высоте от крышки бака плава. Тепло парогазовых

выбросов используется для подогрева воды или воздуха, подаваемого в топку СРК. Трубчатый теплообменник одновременно используют для рекуперации натрия и серы, содержащихся в пылевых частицах, – на 60–70 %. Такое значительное улавливание мелкодисперсной пыли со средним весовым размером 5–10 мкм на трубах большого диаметра может происходить из-за возникновения стефановского движения парогазовой смеси к поверхности теплообменника при интенсивной конденсации пара. В г. Коряжма на целлюлозно-бумажном комбинате филиала АО «Группа Илим» установлен теплообменник, выполненный из отдельных сегментов, приваренных вертикально внутри цилиндрического корпуса газоочистной установки. По результатам измерений авторов, эффективность регенерации составила более 80 % без орошения слабым белым щелоком. Также высокая степень регенерации достигнута Л.В. Романовой с помощью теплообменника с наклонными трубками, который в отличие от предыдущих был установлен перед вытяжной трубой внутри бака плава [7].

Установка теплообменника в вытяжной трубе приводит к снижению температуры, образованию конденсата, уменьшению содержания пара. Как следствие, увеличивается плотность газа, снижается самотяга, что может, несмотря на снижение количества пара в трубе после прохождения им теплообменника, уменьшить или увеличить расход части парогазовой смеси – воздуха, подсаемого из помещения, и повысить выброс сероводорода и влажной содовой пыли в рабочее помещение.

Оценим изменение безопасности выбросов сероводорода в рабочем помещении в зависимости от места установки теплообменника. Самотяга возникает из-за разницы плотности газа в трубе и внешнего атмосферного воздуха [4], поэтому величина самотяги существенно варьирует в зависимости от места расположения теплообменника и количества возвращаемого тепла. При расчете самотяги [2] учитывают изменение погодных условий в течение года. По летней температуре воздуха в приземном слое атмосферы примем ее равной 20 °С.

При смешении большого количества пара с воздухом из помещения цеха, как было описано выше, образуется предельно насыщенный (на 80 %) паром воздух. Паровоздушная смесь такого состава при нормальном давлении существует при температуре около 93 °С. После теплообменника парогазы также находятся в насыщенном состоянии, но имеют меньшую температуру. Исчезнувший пар превращается в конденсат, который стекает в бак плава в дополнение к слабому белому щелоку.

Построим математическую модель движения парогазового потока. Пусть теплообменник установлен на определенной высоте вытяжной трубы и делит ее на 2 части с разными плотностью и температурой парогазовой смеси:

$$H = H_1 + H_2, \quad (1)$$

где H , H_1 , H_2 – высота трубы и участков 1 и 2 установки теплообменника соответственно, м.

Выталкивающее давление самотяги вытяжной трубы ΔP_T определяется силой Архимеда:

$$\Delta P_T = H_1 g (\rho_a - \rho_{T1}) + H_2 g (\rho_a - \rho_{T2}), \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_a – плотность атмосферного воздуха, кг/м³; ρ_{T1} , ρ_{T2} – плотность парогаса на участках H_1 и H_2 соответственно, кг/м³.

Определять плотность парогазовой смеси (мм рт. ст.) будем через парциальные давления, которые вычислим с помощью уравнения Антуана для паров воды [16]:

$$\ln P_{\text{п}} = A - \frac{B}{T_{\text{т}} + C}, \quad (3)$$

где A , B , C – константы (для пара $A = 18,3036$; $B = 3816,4400$; $C = -46,1300$); $T_{\text{т}}$ – температура парогазовой смеси в трубе, К.

Парциальное давление насыщенного пара зависит только от температуры. Запишем парциальные давления на участках H_1 и H_2 в паскалях:

$$P_{\text{п1}} = 133,3e^{\frac{A-B}{T_{\text{п1}}+C}}; \quad (4)$$

$$P_{\text{п2}} = 133,3e^{\frac{A-B}{T_{\text{п2}}+C}}. \quad (5)$$

Парциальное давление воздуха в трубе определяется разницей атмосферного давления и парциального давления пара. Используя уравнение состояния газа Менделеева – Клапейрона, запишем уравнения для плотности воздуха в трубе:

$$\rho_{\text{в.т1}} = \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п1}}}{R_{\text{в}}T_1}; \quad (6)$$

$$\rho_{\text{в.т2}} = \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п2}}}{R_{\text{в}}T_2}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{в.т}}$ – плотность воздуха в трубе, кг/м³; $R_{\text{в}}$ – удельная газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К) ($R_{\text{в}} = 281,5$ Дж/(кг·К)).

Уравнения для плотности насыщенного паром воздуха в трубе будут иметь вид:

$$\rho_{\text{т1}} = \frac{P_{\text{п1}}}{R_{\text{п}}T_1} + \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п1}}}{R_{\text{в}}T_1}; \quad (8)$$

$$\rho_{\text{т2}} = \frac{P_{\text{п2}}}{R_{\text{п}}T_2} + \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п2}}}{R_{\text{в}}T_2}, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность парогазовой смеси в трубе, кг/м³; $R_{\text{п}}$ – удельная газовая постоянная пара, Дж/(кг·К) ($R_{\text{п}} = 452,5$ Дж/(кг·К)).

Сопротивление парогазового потока в вытяжной трубе определяется через динамическое давление и коэффициенты сопротивления следующим уравнением:

$$\Delta P_R = \left(\lambda \frac{H_1}{D} + \xi_1 \right) \frac{\rho_{\text{т1}} v_{\text{т1}}^2}{2} + \left(\lambda \frac{H_2}{D} + \xi_2 \right) \frac{\rho_{\text{т2}} v_{\text{т2}}^2}{2}, \quad (10)$$

где λ – безразмерный коэффициент сопротивления поверхности газохода; ξ – местный коэффициент сопротивления элементов газохода; D – диаметр газохода; $v_{\text{т1}}$, $v_{\text{т2}}$ – скорость движения газа в первой и второй частях газохода соответственно.

При установившемся стационарном движении газа сопротивление движению газового потока всегда равно тягодутьевому напору:

$$\Delta P_T = \Delta P_R. \quad (11)$$

Связь между скоростями движения газа в первой и второй частях газохода определяется уравнением сохранения массового расхода воздуха:

$$G_B = \rho_{в.т} v_T S = \text{const}; \quad (12)$$

$$v_{T2} = \frac{\rho_{в.т1}}{\rho_{в.т2}} v_{T1}, \quad (13)$$

где S – площадь сечения трубы, м².

Скорость парогазового потока в трубе с учетом уравнений (10) – (13) можно записать в следующем виде:

$$\Delta P_R = \left[\left(\lambda \frac{H_1}{D} + \xi_1 \right) \frac{\rho_{T1}}{2} + \left(\lambda \frac{H_2}{D} + \xi_2 \right) \frac{\rho_{T2}}{2} \left(\frac{\rho_{в.т1}}{\rho_{в.т2}} \right)^2 \right] v_{T1}^2. \quad (14)$$

Введем для удобства записи функцию f :

$$P_R = f v_{T1}^2. \quad (15)$$

Из уравнений (2) и (14), (15) можно определить скорость движения газа в нижней части трубы:

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{\Delta P_T}{f}}. \quad (16)$$

Используя уравнение (13), установим скорость движения газа в верхней части трубы. Массовый расход пара в любой части трубы находится из следующего уравнения:

$$G_{п} = \frac{P_{п}}{R_{п} T} \pi \frac{D^2}{4} v_T. \quad (17)$$

Определим скорость воздуха, всасываемого в бак плава:

$$v_6 = v_{T1} \frac{\rho_{в.т1} S_T}{\rho_6 S_6} = k v_{T1} \frac{\rho_{в.т1}}{\rho_6}, \quad (18)$$

где ρ_6 – плотность воздуха в помещении цеха; S_T , S_6 – площадь вытяжной трубы и окна бака плава соответственно; k – коэффициент отношения S_T к S_6 .

На основе системы уравнений (1) – (18) была создана программа в среде MatLab, которая позволила получить функциональные характеристики влияния установки теплообменника на условия растворения плава. Расчеты проводились при следующих условиях: $H = 24$ м; $D = 1$ м; $\lambda = 0,02$; $\xi_1 = 1,5$; $\xi_2 = 1$; $k = 0,593$; вентиляция позволяет вывести весь пар при температуре 93 °С; летняя температура атмосферного воздуха и воздуха внутри цеха, как было отмечено выше, составляет 20 °С.

На рис. 1 представлена зависимость скорости всасывания воздуха в бак плава от изменяющейся в результате работы теплообменника, установленного перед вытяжной трубой, температуры насыщенного паром воздуха вытяжной трубы.

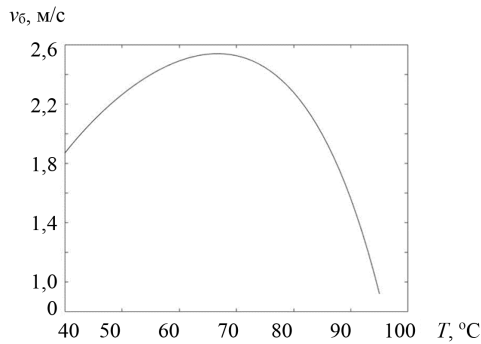


Рис. 1. Зависимость скорости всасывания воздуха в бак плава от температуры насыщенного паром воздуха вытяжной трубы
 Fig. 1. Dependence of the rate of air intake into the dissolving tank on the temperature of the air saturated with vapour in the vent

Из графика рис. 1 следует, что с увеличением рекуперации тепла скорость подсоса воздуха в бак плава возрастает при снижении температуры до 67 °С, а далее уменьшается. Тем не менее при снижении температуры до 40 °С скорость подсоса воздуха – 1,8 м/с, что больше начальной нормативной скорости при 93 °С в отсутствие рекуперации тепла, поэтому безопасность выбросов сероводорода в помещение цеха обеспечивается.

На рис. 2 представлена зависимость скорости движения насыщенной парогазовой смеси в вытяжной трубе от температуры насыщения. График имеет линейную и нелинейную части. Снижение скорости значительно. Переход совпадает с максимумом на рис. 1 и соответствует 67 °С. При высоких температурах скорость парогазового потока снижается более интенсивно. При 93 °С она составляет 11 м/с, при 70 °С – 7 м/с, а при 40 °С – до 3,5 м/с. Это позволяет, например, существенно уменьшить диаметр вытяжной трубы при условии надежной работы конденсатора, что делают для вытяжной вентиляции бумагоделательной машины.

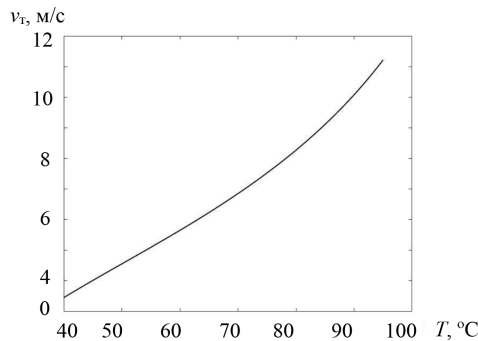


Рис. 2. Зависимость скорости движения насыщенной парогазовой смеси в вытяжной трубе от температуры насыщения
 Fig. 2. Dependence of the rate of movement of the saturated vapour-gas mixture in the vent on the saturation temperature

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчетов при установке конденсатора внутри трубы на разной высоте при условии, что он снижает температуру насыщенного паром воздуха с 93 до 75 °С. Из кривой 1 рис. 3 следует, что при установке конденсатора внутри трубы, так же как и для рассмотренного ранее варианта установки конденсатора – перед трубой, скорость всасывания воздуха обеспечивает безопасность персонала. Возрастание скорости всасывания с увеличением высоты расположения конденсатора связано с повышением самотяги трубы и скорости движения парогазовой смеси.

Кривая 2 рис. 3 показывает, что при снижении температуры парогазовой смеси до 75 °С образуется много конденсата, его количество может достигать 14 м³/ч.

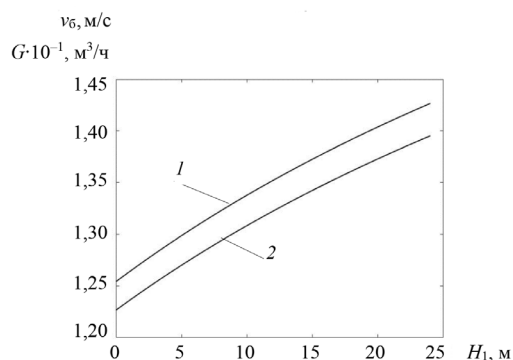


Рис. 3. Изменение характеристик вытяжной вентиляции при установке конденсатора на разной высоте трубы: 1 – скорость всасывания воздуха в бак плава; 2 – количество конденсата

Fig. 3. Change in the characteristics of exhaust ventilation when installing the condenser at different heights of the vent: 1 – the rate of air intake into the dissolving tank, 2 – the amount of condensate

При снижении температуры до 60 °С количество конденсата возрастает еще больше. Расход слабого белого щелока, необходимого для растворения плава СРК 725 т/сут. а.с.в., составляет 42 м³/ч [8]. Количество выбрасываемой пыли, большей частью состоящей из карбоната натрия, может быть 30 кг/ч. Таким образом, конденсат является слабым раствором, содержащим около 2 г/л карбоната натрия, в то время как слабый белый щелок содержит 90–150 г/л NaOH. При уменьшении подачи слабого белого щелока на величину объема конденсата возможно снижение концентрации первого на 33 %.

На рис. 4 представлены графики изменения скорости движения насыщенной паровоздушной смеси до и после прохождения конденсатора. Скорость снижается с 11–13 до 4 м/с. Разница немного возрастает с увеличением высоты установки конденсатора, что связано с повышением тягодутьевого давления. Снижение скорости в трубе может быть полезно для решения экологической задачи.

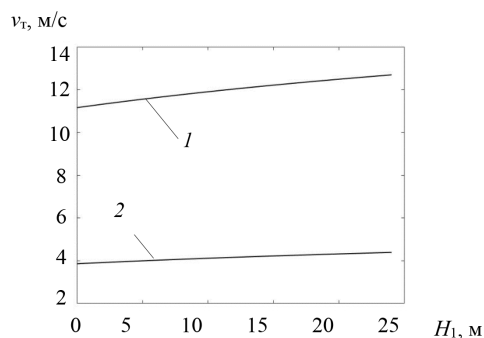


Рис. 4. Изменение скорости движения насыщенной паровоздушной смеси в зависимости от высоты установки теплообменника: 1 – ниже теплообменника; 2 – выше

Fig. 4. Change in the rate of movement of the saturated air-vapour mixture depending on the installation height of the heat exchanger: 1 – below the heat exchanger; 2 – above the heat exchanger

При решении экологической задачи недостаточна эффективность улавливания пылегазовых выбросов теплообменниками – не более 80 % [13]. С целью повышения показателя для очистки вентиляционных выбросов из бака плава авторами [6] были разработаны и испытаны СГП, которые являются прямоточными распылительными аппаратами. Предложенная схема очистки газов вентиляции бака растворителя плава на основе СГП представлена на рис. 5.

Основное преимущество СГП по отношению к другим скрубберам заключается, наряду с высокой эффективностью и простотой, в создании тягодутьевого эффекта [12, 14], который компенсирует сопротивления поворотов газохода и каплеуловителя, не требует установки вентилятора в насыщенный

паром воздушный поток. Производственные испытания показали высокую эффективность очистки парогазовых выбросов от пыли, сероводорода и метилмеркаптана – более 95 %.

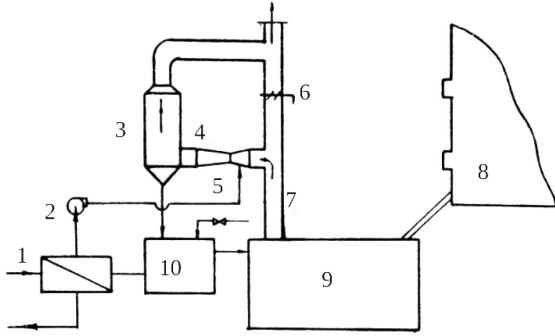


Рис. 5. Схема очистки газов вентиляции бака растворителя плава: 1 – теплообменник; 2 – насос; 3 – каплеуловитель; 4 – СГП; 5 – форсунки; 6 – шибер; 7 – вытяжная труба; 8 – СРК; 9 – бак плава; 10 – сливной бак
Fig. 5. Scheme of purification of the gases from the smelt dissolving tank ventilation system: 1 – heat exchanger; 2 – pump; 3 – drop catcher; 4 – SGW; 5 – nozzles; 6 – gate; 7 – vent; 8 – SRB; 9 – dissolving tank; 10 – drain tank

Однако использование СГП не получило широкого распространения для очистки газовых выбросов из бака плава. Главный недостаток очистки газов по такой схеме заключается в том, что работа СГП со временем прекращается. Причина – в высоком содержании извести в слабом белом щелоке, поступающем для растворения плава. Этот же щелок частично подается для орошения СГП. Как оборудование, так и схема с циркуляцией через теплообменник были предложены к эксплуатации без учета возможности образования известковых отложений. Исследования СГП на Архангельском целлюлозно-бумажном комбинате показали, что известь, которая осаждается на внутренних поверхностях системы орошения, приводит к забиванию форсунок, трубопроводов, насоса и теплообменника. Известь попадает в зеленый щелок и содержится в пылевых выбросах бака плава. Химический состав осадков циркулирующего раствора в контуре без теплообменника и с подпиткой технической водой (без подачи слабого белого щелока) представлен в таблице. Результаты опытов показали, что известь находится в растворе для орошения в виде взвеси, которая осаждается в насосах, сливных трубах, форсунках, баке орошающего раствора и теплообменнике. Накопление осадка парализует работу газоочистного оборудования.

Химический анализ осадков в элементах оборудования СГП

Chemical analysis of the sediments in the elements of the SGW equipment

Параметр	Осадок		Фильтрат из бака
	из сливной трубы	из форсунок	
Растворимость в воде, %	3,71	5,41	–
pH	7,20	7,30	9,55
Потери при прокаливании (900 °С), %	45,50	40,38	52,96
Органическая часть, %	10,27	7,59	25,86
SiO ₂ , %	0,59	5,14	1,92
Fe ₂ O ₃ , %	5,32	9,62	4,64
CaCO ₃ , %	78,46	74,30	61,41
<i>Итого</i> , %	94,64	96,66	93,83

Содержание извести в слабом белом щелоке зависит от используемых на предприятии технологий ее регенерации, которые можно условно разделить на технологию с отстойниками-осветлителями и технологию с фильтрами для слабого белого щелока, такими же, как при «шлифовании» крепкого белого щелока [5]. Для решения экологической задачи очистки газовых выбросов из бака плава преимущественной является технология регенерации извести с фильтрацией слабого белого щелока.

При отсутствии фильтрации необходимо использовать оборудование СГП, подобное оборудованию цеха регенерации извести, предназначенное для работы в условиях осаждения извести. Необходимо исключить циркуляцию орошающего раствора и теплообменник в предложенной схеме. При отказе от циркуляции требуется практически весь слабый белый щелок направлять в бак плава, предварительно пропуская его через форсунки. Любое решение при установке СГП по схеме с циркуляцией, и тем более без нее, приводит к изменению технологии подачи слабого белого щелока в бак плава.

Рассмотрим возможность решения экологической задачи при последовательной установке теплообменника и СГП в парогазовом потоке. Как показано на рис. 4, после конденсации пара скорость парогазового потока может быть снижена в 3 раза. Это означает, что во столько же раз уменьшается очищаемый объем газа и расход орошающего раствора для СГП. На этой основе в отраслевой лаборатории был разработан регламент для проектирования очистки газопылевых выбросов из бака растворителя плава СРК.

К настоящему времени нами предложен ряд конструкций прямоточных распылительных аппаратов, которые обладают повышенной надежностью контроля качества распыливания раствора форсунками и прошли практические испытания [1]. Это является основой создания нового оборудования для растворения плава, полностью соответствующего технологическим требованиям, обеспечивающего безопасность, позволяющего в значительной степени возвращать в производственный цикл тепло, натрий и серу, а также снижать выбросы в атмосферу до нормативных значений без сброса сточных вод в канализацию.

Выводы

1. Построена математическая модель системы местной вентиляции растворения плава с возможностью установки теплообменника.

2. Определено, что установка теплообменника перед вытяжной трубой или в вытяжной трубе на любой высоте не приводит к увеличению токсичных выбросов из бака плава в помещение цеха.

3. Работа теплообменника обуславливает образование конденсата, снижение потребления слабого белого щелока и необходимости увеличения его концентрации.

4. Применение теплообменника позволяет в несколько раз снизить объемный расход парогазового потока, за счет чего существенно улучшаются условия для очистки газовых выбросов.

5. Значительное содержание извести в слабом белом щелоке снижает надежность оборудования очистки газовых выбросов и требует подачи большей части слабого белого щелока в бак плава через струйный газопромыватель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анишкин С.В., Куров В.С. Разработка прямоточных распылительных аппаратов повышенной надежности, совместимых с технологией целлюлозно-бумажного производства // Вестн. СПбГТУД. Сер. 4: Промышл. технологии. 2022. № 1. С. 90–94.
Aniskin S.V., Kurov V.S. Development of High-Reliability Direct-Flow Spray Devices Compatible with Pulp and Paper Production Technology. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*, 2022, no. 1, pp. 90–94. (In Russ.). https://doi.org/10.46418/2619-0729_2022_1_13
2. Баркалов Б.В., Павлов Н.Н., Амирджанов С.С., Гримитлин М.И., Моор Л.Ф., Позин Г.М., Креймер Б.Н., Рубчинский В.М., Садовская Т.И., Березина Н.И., Бычкова Л.А., Ушомирская А.И., Финкельштейн С.М., Пирумов А.И. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика: в 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / под ред. Н.Н. Павлова, Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1992. 416 с.
Barkalov B.V., Pavlov N.N., Amirdzhanov S.S., Gritmitlin M.I., Moor L.F., Pozin G.M., Kreymmer B.N., Rubchinskiy V.M., Sadovskaya T.I., Berezina N.I., Bychkova L.A., Ushomirskaya A.I., Finkel'tein S.M., Pirumov A.I. *Internal Sanitary Equipment: in 3 Parts. Part 3. Ventilation and Air Conditioning. Book 2*. Edited by N.N. Pavlov and Yu.I. Shiller. 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Stroyizdat Publ., 1992. 416 p. (In Russ.).
3. Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Теплообменное оборудование предприятий. СПб., 2016. 184 с.
Ivanov A.N., Belousov V.N., Smorodin S.N. *Heat Exchange Equipment for Industrial Enterprises*. St. Petersburg, 2016. 184 p. (In Russ.).
4. Кочев А.Г., Сергиенко А.С. Аэродинамический расчет механических и гравитационных систем вентиляции. Н. Новгород: ННГАСУ, Деловая Полиграфия, 2015. 25 с.
Kochev A.G., Sergienko A.S. *Aerodynamic Calculation of Mechanical and Gravitational Ventilation Systems*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Delovaya Poligraphiya Publ., 2015. 25 p. (In Russ.).
5. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы: в 3 т. Т. II. Производство сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 600 с.
Nepenin Yu.N. *Cellulose Technology: in 3 vol. Vol. II: Production of Sulphate Cellulose*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 600 p. (In Russ.).
6. Пасечник С.П., Торф А.И. Газоочистные установки растворителей плава содорегенерационных котлоагрегатов. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1977. 30 с.
Pasechnik S.P., Torf A.I. *Gas Cleaning Units for Smelt Dissolving Tanks in Soda Recovery Boilers*. Moscow, VNIPIEIllesprom Publ., 1977. 30 p. (In Russ.).
7. Патент № 2043444 РФ, МПК D21C 11/06. Устройство для регенерации тепла и химикатов из парогазовых выбросов растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата: № 5056154/12: заявл. 29.07.1992; опубл. 10.09.1995 / Л.В. Романова, Е.А. Стасюк, В.Г. Родионов, И.И. Гогонин.
Romanova L.V., Stasyuk E.A., Rodionov V.G., Gogonin I.I. *A Device for the Regeneration of Heat and Chemicals from Steam-Gas Emissions of a Smelt Dissolving Tank in a Soda Recovery Boiler*. Patent RF, no. RU 2043444 B1, 1995. (In Russ.).
8. Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И. Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 141 с.
Sivakov V.P., Vurasko A.V., Muzykantova V.I. *Regeneration of Chemicals and Heat in Soda Recovery Boilers. Device and Diagnostics*. Yekaterinburg, Ural State Forestry University, 2015. 141 p. (In Russ.).

9. Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н. Содорегенерационные котлоагрегаты. СПб., 2010. 164 с.
Smorodin S.N., Ivanov A.N., Belousov V.N. *Soda Recovery Boilers*. St. Petersburg, 2010. 164 p. (In Russ.).
10. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2003. 663 с.
Technology of Pulp and Paper Production. In 3 volumes. Volume 1. Production of Semi-Finished Products. Part 2. Production of Semi-Finished Products. St. Petersburg, Politekhnika Publ., 2003. 663 p. (In Russ.).
11. Ahtila P., Ruohola T., Tamminen A. *Method and Apparatus for Preparing Green Liquor*. Patent no. Europäisches patentament EP 1 193 341 B1. 2005.
12. Das S.K., Biswas M.N. Studies on Ejector-Venturi Fume Scrubber. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 119, iss. 2–3, pp. 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.03.019>
13. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. *Official Journal of the European Union*, L 152, 11.06.2008, pp.1–44.
14. Gamisans X., Sarra M., Lafuente F.J., Azzopardi B.J. The Hydrodynamics of Ejector-Venturi Scrubbers and Their Modelling by an Annular Flow/Boundary Layer Model. *Chemical Engineering Science*, 2002, vol. 57, iss. 14, pp. 2707–2718. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00171-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00171-9)
15. Harry-Ngei N., Ubong I., Ede P.N. A Review of the Scrubber as a Tool for the Control of Flue Gas Emissions in a Combustion System. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2019, vol. 4, iss. 11, pp. 1–4. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2019.4.11.1561>
16. Poling B.E., Prausnitz J.M., O’Connell J.P. *The Properties of Gases and Liquids*. New York, McGRAW-HILL, 2001. 803 p.
17. Sittig M. *Pulp and Paper Manufacture: Energy Conservation and Pollution Prevention (Pollution Technology Preview)*. Park Ridge, NJ, Noyes Data Corp. / Noyes Publ., 1977. 430 p.
18. Smook G.A. *Handbook for Pulp and Paper Technologists*. TAPPI Press, 2016. 438 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 678.031:54-112

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-195-207

Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы

А.В. Сафина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [CAA-1333-2022](https://orcid.org/0000-0002-7344-9242),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>

Д.Ф. Зиятдинова, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Л.Р. Назипова, инженер; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0009-0003-9918-0397),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9918-0397>

Р.Г. Сафин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

К.В. Валеев[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; alb_saf@mail.ru, Ziatdinova2804@gmail.com, lnazipova@internet.ru, safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 20.03.23 / Одобрена после рецензирования 23.06.23 / Принята к печати 26.06.23

Аннотация. Анализ современного состояния процесса извлечения бетулина из бересты березы показал актуальность внедрения на малых предприятиях лесопромышленного комплекса периодической технологии экстрагирования с применением в качестве растворителя толуола. Приведены схема экстракционной установки, состоящей из экстрактора, испарителя, конденсатора, флорентины, сборника экстракта, а также принцип работы этой установки. Процесс имеет 2 стадии: при нахождении сырья по отношению к толуолу в состоянии покоя и при экстрагировании сырья непрерывной подачей свежего экстрагента. Разработана инженерная методика расчета экстрактора, позволяющая определить его габаритные размеры (диаметр, высоту) и длительность отдельных стадий процесса экстракции. Продолжительность 1-й стадии рассчитывается решением дифференциального уравнения массопроводности Фика при граничных условиях I рода; 2-й – с учетом того, что из экстрактора непрерывно отводят экстракт бетулина и вводят свежий экстрагент. В последнем случае содержание бетулина в экстрагенте изменяется не только во времени, но и по высоте экстрактора. Разработанное математическое описание и последующее моделирование позволило получить расчетные кривые распределения бетулина в бересте в разные моменты времени, а также сопоставить экспериментальные и расчетные данные по кинетике среднего содержания бетулина в бересте и толуоле для каждой стадии. При этом кинетические кривые среднего содержания бетулина в бересте на 2-й стадии приведены для различных высот экстрактора. Установлено, что оптимальная продолжительность 1-й стадии составляет 20 мин, а при непрерывной подаче свежего экстрагента с расходом 22,5 кг/ч на 2-й стадии скорость процесса увеличивается в 6 раз. Это значительно сокращает общую продолжительность экстракции при заданных параметрах процесса. Показана необходимость ввода 3-й стадии – стабилизации содержания бетулина по высоте слоя и по сечению частиц.

© Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Назипова Л.Р., Сафин Р.Г., Валеев К.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: бетулин, экстракция, береста, инженерная методика, математическая модель

Для цитирования: Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Назипова Л.Р., Сафин Р.Г., Валеев К.В. Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 195–207. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-195-207>

Original article

The Engineering Procedure for Calculating the Plant for Betulin Extraction from Birch Bark

Al'bina V. Safina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [CAA-1333-2022](https://orcid.org/0000-0002-7344-9242), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>

Dilara F. Ziatdinova, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Leysan R. Nazipova, Engineer; ResearcherID: [HPC-5155-2023](https://orcid.org/0009-0003-9918-0397), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9918-0397>

Rushan G. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Kirill V. Valeev[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; alb_saf@mail.ru, Ziatdinova2804@gmail.com, lnazipova@internet.ru, safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉]

Received on March 20, 2023 / Approved after reviewing on June 23, 2023 / Accepted on June 26, 2023

Abstract. The analysis of the current state of the process of betulin extraction from birch bark has shown the relevance of the implementation of periodic extraction technology using toluene as a solvent at small enterprises of the timber industry complex. This article presents the scheme of an extraction plant consisting of an extractor, an evaporator, a condenser, a florentine flask, an extract collector, as well as the principle of the plant operation. The extraction process is carried out in two stages: when the raw material is at rest in relation to toluene and when the raw material is extracted by continuous feeding of fresh extractant. The engineering procedure for calculating the extractor has been developed, allowing to determine its overall dimensions (diameter and height) and the duration of individual stages of the extraction process. The duration of the first stage has been calculated by solving Fick's differential equation of mass conductivity under boundary conditions of the first kind. The duration of the second stage has been calculated considering the fact that betulin extract is continuously withdrawn from the extractor and fresh extractant is injected. In the latter case, the betulin content in the extractant varies not only in time, but also with the height of the extractor. The developed mathematical description and subsequent modeling made it possible to obtain the calculated curves of betulin distribution in birch bark at different points in time, as well as to compare the experimental and calculated data on the kinetics of the average betulin content in birch bark and toluene for each stage. Meanwhile, the kinetic curves of the average betulin content in birch bark at the second stage are presented for different heights of the extractor. It has been established that the optimal duration of the first stage is 20 min,



and with the continuous feeding of fresh extractant with a flow rate of 22.5 kg/h at the second stage, the process speed increases by 6 times. This significantly reduces the total extraction time under the specified process parameters. The necessity for the introduction of the third stage (the stabilization period of the betulin content over the layer height and the cross-section of particles) has been shown.

Keywords: betulin, extraction, birch bark, engineering procedure, mathematical model

For citation: Safina A.V., Ziatdinova D.F., Nazipova L.R., Safin R.G., Valeev K.V. The Engineering Procedure for Calculating the Plant for Betulin Extraction from Birch Bark. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 195–207. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-195-207>

Введение

В настоящее время бетулин, извлекаемый из бересты березы, нашел применение в различных отраслях промышленности в качестве ценного компонента лекарственных средств и биологически активных добавок, обладающих противовирусными, антиоксидантными и антибактериальными свойствами [3, 4, 15–17, 20]. Стоимость бетулина на рынке варьирует от 30 до 60 тыс. р./кг в зависимости от чистоты продукта. При этом основная доля поставки бетулина приходится на зарубежные страны. Сложившиеся современные экономические и производственные условия диктуют необходимость разработки отечественных экстракционных технологий получения бетулина.

Исследование процесса извлечения бетулина из бересты березы базируется на классических положениях теории диффузионного извлечения из пористых тел [1], а вопросам технологического и аппаратного обеспечения процесса посвящено множество работ. Анатомическое строение, химический состав и основные направления химической переработки коры березы, практические рекомендации и способы интенсификации процесса экстракции бетулина из бересты березы отражены в монографии С.И. Третьякова и др. [13]. Кинетические закономерности диффузионных процессов при экстракции коры березы изучены в работах [2, 18].

Значительное количество исследований посвящено различным способам получения бетулина с использованием растворителей. Так, А.Н. Кислицын с соавторами [9] рассмотрел метод извлечения бетулина с помощью органического растворителя – уайт-спирита. Экстракцию вели в течение 2 ч при температуре 150–155 °С. Далее экстракт обрабатывали щелочью, отфильтровывали, высушивали и дополнительно перекристаллизовывали. Выход бетулина составил 21 %.

Способ получения бетулина из измельченной коры экстракцией метил-трет-бутиловым эфиром представлен в патенте М.С. Юнусова и др. [8]. Процесс экстракции состоял из 3 стадий. На 1-й стадии смесь кипятили в течение 2 ч. На 2-й проводили фильтрацию экстракта от остатков исходного сырья, добавляли новую порцию метил-трет-бутилового эфира и кипятили смесь в течение еще 40 мин. Этот этап повторяли 4 раза. На 3-м этапе экстракт обрабатывали щелочью для удаления натриевых солей кислотных компонентов экстракта, затем промывали водой и сушили безводным раствором сульфата магния. Далее продукт очищали кипячением с добавлением гексана. Нерастворимую в гексане часть отфильтровывали, высушивали на воздухе и получали бетулин с выходом 16 % от сухой массы коры.

В статье Б.Н. Кузнецова и др. [5] описан способ получения бетулина посредством гидролиза коры. Смесь, состоящую из измельченной коры, гидроксида натрия и воды, нагревали при температуре 95–100 °С в течение 3–6 ч при постоянном перемешивании, затем снижали температуру до 70–75 °С и добавляли этиловый спирт. После этого смесь доводили до кипения при перемешивании в течение 30–40 мин. Горячую реакцию массу фильтровали с дальнейшим упариванием фильтрата. На последнем этапе экстракт просушивали при комнатной температуре. Выход экстракта бетулина в результате составил 20–30 % от массы сухой коры.

В статье [14] описан способ получения бетулина в аппарате Сокслета с использованием водного раствора изопропилового спирта в соотношении 9:1. После проведения 3-часовой экстракции экстракт охлаждали. Выпавший осадок отфильтровывали и высушивали на воздухе. Выход бетулина – 13 % от массы сухой коры.

В работе [11] рассмотрен способ извлечения бетулина посредством гидролиза щелочью. Процесс экстракции состоял из 3 этапов. На 1-м этапе происходило измельчение сырья и осуществлялся его гидролиз в водном растворе 15–25%-й щелочи при интенсивном перемешивании. На 2-м этапе проводили осаждение бетулина выпариванием при давлении 110–120 кПа. На 3-м этапе экстракт фильтровали, осадок промывали водой и сушили. Выход бетулина составил 35 % от массы сухой коры.

В патенте [10] описан способ получения бетулина в экстракторе проточного типа при непрерывном противоточном движении бересты и растворителя, не смешивающегося с водой. Процесс экстракции состоял из нескольких этапов. На 1-м проводили экстракцию толуолом. При достижении давления в экстракторе 120–130 кПа сбрасывали давление до атмосферного и отбирали экстракт в выдувной резервуар, в котором осуществлялось испарение растворителя. На 2-м этапе пар конденсировался, конденсат во флорентине разделялся на толуол и воду, которые использовали повторно. На 3-м этапе сгущенный экстракт промывали и высушивали. Заявляемый способ позволял получать бетулин высокой чистоты (до 99 %) с минимальными энергозатратами.

Проведенный анализ существующих исследований показал, что в процессах извлечения бетулина используются различные подходы к подбору экстрагентов. В настоящее время многие работы посвящены организации способов экстрагирования с использованием толуола.

В.И. Рощин с соавторами [6] предложил способ получения бетулина с применением смеси толуола и петролейного эфира. Экстракцию проводили в течение 5 ч. После извлечения горячий экстракт сливали, фильтровали, кристаллизовали и высушивали. Выход экстракта составил от 16 до 25 %.

Ю.И. Стернин разработал способ получения бетулина [7], предусматривающий измельчение коры, разделение ее на бересту и луб и последующую экстракцию бересты толуолом. Измельченную бересту перемешивали с толуолом в течение 1,5–3,0 ч при температуре 90–110 °С. Затем раствор фильтровали при температуре 40–50 °С и охлаждали в течение 6–10 ч до температуры менее 15 °С, но не ниже 5 °С. Выпавшие кристаллы бетулина перемешивали с маточным раствором, фильтровали, промывали чистым толуолом, снова фильтровали и сушили. Выход бетулина составил до 30 % от массы сухой коры.

Представленные способы извлечения бетулина толуолом довольно разнообразны. Однако для принятия технических решений и успешной промышленной реализации экстракционной технологии необходимо создать инженерную методику расчета, которая позволит с допустимой точностью произвести оптимизацию и построение статических и динамических характеристик процесса.

Существующие теоретические основы ресурсосберегающих технологий и результаты проведенных на кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета научных работ показали перспективность периодической технологии экстрагирования бетулина из бересты березы с помощью толуола [12, 19]. Цель – предложить инженерную методику расчета данного способа на основе ранее представленных исследований.

Объекты и методы исследования

Разработка инженерной методики расчета основывается на теоретических положениях и лабораторных исследованиях с использованием математического описания и последующего моделирования.

Для исследования процесса периодической экстракции бетулина из бересты была создана пилотная установка, принципиальная схема и внешний вид которой представлены на рис. 1.

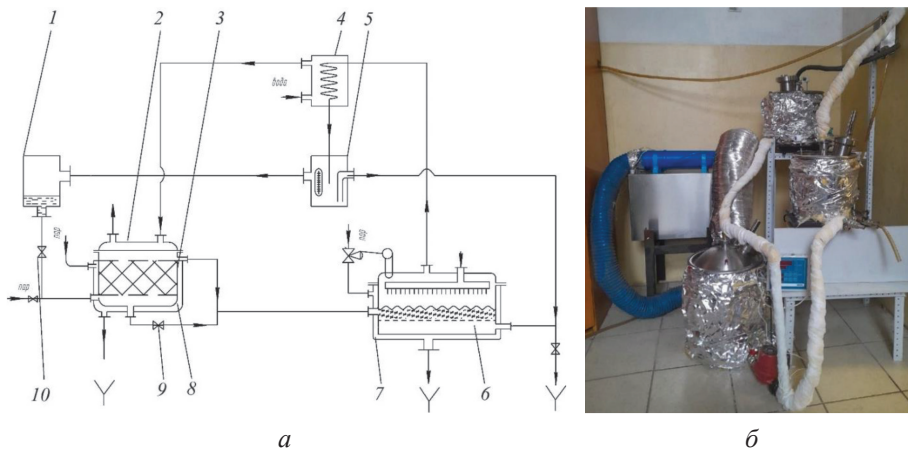


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) установки для экстракции бетулина: 1 – сборник экстрагента; 2 – охлаждаемая крышка экстрактора; 3 – экстрактор; 4 – конденсатор; 5 – флорентина; 6 – испаритель; 7, 8 – рубашка; 9 – вентиль отвода экстрагента; 10 – вентиль подвода экстрагента

Fig. 1. Schematic diagram (a) and external appearance (b) of the betulin extraction plant: 1 – extractant collector; 2 – cooled extractor cover; 3 – extractor; 4 – condenser; 5 – florentine flask; 6 – evaporator; 7, 8 – jacket; 9 – extractant withdrawal valve; 10 – extractant feed valve

Экстракция бетулина из бересты осуществляется в 2 стадии: при нахождении сырья по отношению к толуолу в состоянии покоя и при экстрагировании сырья непрерывной подачей свежего экстрагента. На 1-й стадии в экстрактор загружают измельченную бересту березы, туда же заливают заданный объем толуола, нагретого в сборнике экстракта до температуры кипения, в заданном

соотношении с берестой. В процессе экстрагирования происходит повышение концентрации бетулина в толуоле, ведущее к снижению скорости экстракции. Поэтому на 2-й стадии процесса из экстрактора непрерывно отводят экстракт бетулина и вводят свежий экстрагент. Для этого в нижнюю часть экстрактора постоянно подают свежий экстрагент с одинаковой скоростью, вытесняя тем самым экстракт с верхней части в испаритель. В испарителе вода кипит, а образующиеся пары проходят через слой экстракта и испаряют экстрагент. Пары экстрагента и воды поступают по трубопроводу в конденсатор и конденсируются. Конденсат стекает во флорентину, в которой происходит сепарация воды и толуола. Тoluол из флорентины перетекает через сборник экстрагента в экстрактор. После завершения экстракции оставшийся в экстракторе экстракт переводят в испаритель, где происходит полное выпаривание толуола.

Удаление экстрагента из проэкстрагированной бересты осуществляют десорбцией водяным паром (на схеме не показано). Таким образом, экстрагент и флорентинная вода циркулируют в замкнутой системе и не попадают в окружающую среду.

Трехкратный отбор частиц бересты по высоте слоя в процессе эксперимента производили через 3 пробоотборника, установленных в верхней части экстрактора. Содержание бетулина в экстракте определяли удалением экстрагента путем вакуумирования.

Задачей инженерной методики расчета процесса экстракции является установление габаритных размеров экстрактора, а именно диаметра и высоты.

При цилиндрическом оформлении экстрактора, приняв его высоту равной:

$$H = 2d, \quad (1)$$

где d – диаметр экстрактора, м,

получаем соотношение для расчета рабочего объема аппарата:

$$V = \frac{\pi d^3}{2}. \quad (2)$$

С другой стороны, требуемый рабочий объем экстрактора определяется заданной производительностью Q и продолжительностью экстракции τ :

$$V = Q\tau. \quad (3)$$

Из совместного решения уравнений (2) и (3) получаем соотношение для расчета диаметра аппарата:

$$d = \sqrt[3]{\frac{2Q\tau}{\pi}}. \quad (4)$$

Продолжительность процесса экстракции задается формулой

$$\tau = \tau_I + \tau_{II},$$

где τ_I , τ_{II} – продолжительность 1-й и 2-й стадий экстракции соответственно, с.

На 1-й стадии экстракция идет в толуоле без его обновления, все частицы находятся в одинаковых условиях, поэтому процесс извлечения бетулина из бересты можно рассматривать на примере одной частицы. Скорость локального изменения содержания бетулина в бересте определяется законом Фика. Бересту в первом приближении можно представить в виде бесконечной пластины, поэтому дифференциальное уравнение массопроводности Фика запишем так:

$$\frac{\partial C_W}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C_W}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где C_W – содержание бетулина в бересте, кг/кг; a_m – массопроводность бересты, м²/с; x – координата локальной точки в частице бересты, м.

Содержание бетулина в бересте определяется из выражения

$$C_W = \frac{m_6}{m_c}, \quad (6)$$

где m_6 – масса бетулина, кг; m_c – масса сырья, кг.

Начальное условие для уравнения (5) находим через начальное содержание бетулина в бересте:

$$C_W(x; \tau) \Big|_{\tau=0} = C_W(x; 0) = C_{WH}. \quad (7)$$

Граничное условие для дифференциального уравнения (5) определяется текущим содержанием бетулина в толуоле:

$$C_W(x; \tau) \Big|_{x=0} = C_W(0; \tau) = \frac{1}{K} C_D(\tau), \quad (8)$$

где K – коэффициент распределения бетулина между берестой и толуолом; C_D – содержание бетулина в толуоле,

$$C_D = \frac{m_6}{m_t},$$

m_t – масса толуола, кг.

Скорость изменения текущего содержания бетулина в толуоле

$$\frac{\partial C_D}{\partial \tau} = \frac{a_m f}{C_W + M} \frac{\partial C_W}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (9)$$

где f – удельная поверхность, м²/г; M – модуль процесса экстракции.

Совместное решение дифференциальных уравнений (5), (9) определяет локальное изменение содержания бетулина на 1-й стадии экстракции при краевых условиях (7), (8) и позволяет установить продолжительность 1-й стадии.

На 2-й стадии процесса из экстрактора непрерывно отводят экстракт бетулина и вводят свежий экстрагент. В этом случае содержание бетулина в толуоле изменяется не только во времени, но и по высоте экстрактора.

Локальное изменение содержания бетулина в экстрагенте на 2-й стадии при применении идеальной модели вытеснения будет описываться дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial C_D}{\partial \tau} = W \frac{\partial C_D}{\partial h} + \frac{a_m f}{C_W + M} \frac{\partial C_W}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (10)$$

где W – скорость прохождения экстрагента через слой материала, м²/с; h – координата высоты экстрактора, м.

Первый член в правой части уравнения отражает изменение локального содержания бетулина в экстрагенте за счет конвективного переноса экстракта со скоростью, определяемой по формуле

$$W = \frac{4Q_D}{\varepsilon \pi d^2},$$

где Q_D – расход свежего экстрагента, кг/с; ε – порозность слоя.

Второй член уравнения (10) отражает изменение локального содержания бетулина в экстрагенте за счет стока массы бетулина из бересты в экстракт.

Начальное условие определяется концентрацией бетулина в экстрагенте в конце 1-й стадии экстракции $C_{D_{\text{кон}}}(\tau_1)$:

$$C_D(h; \tau) \Big|_{\tau=0} = C_D(h; 0) = C_{D_{\text{кон}}}(\tau_1). \quad (11)$$

Граничное условие дифференциального уравнения (10) зависит от содержания бетулина в свежем экстрагенте:

$$C_D(h; \tau)_{h=0} = D(0, \tau) = 0. \quad (12)$$

Текущие продолжительность и координаты высоты экстрактора, на которой рассматривается процесс, связаны соотношением

$$\tau = \frac{h}{W}. \quad (13)$$

Зная продолжительность 2-й стадии процесса экстракции, по (13) можно рассчитать диаметр и высоту экстрактора:

$$H = \tau_{II} W.$$

Подставив (13) в дифференциальное уравнение (5), получим локальные изменения содержания бетулина в бересте по высоте:

$$\frac{\partial C_W}{\partial h} = W a_m \frac{\partial^2 C_W}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Из этого уравнения видим, что локальное содержание бетулина в бересте меняется как по сечению, так и по высоте – $C_W(x; h)$.

Начальное распределение бетулина в бересте равномерно по всей высоте, а его величина определяется конечным значением после 1-й стадии экстракции:

$$C_W(x; h) = C_W(x; \tau_1). \quad (15)$$

Граничное условие $C_W(0; h)$ связано с содержанием бетулина в толуоле:

$$C_W(0; h) \Big| = \frac{1}{K} C_D(h; \tau_{II}). \quad (16)$$

Совместное решение уравнений (10), (14) при краевых условиях (11), (12), (15) и (16) определяет динамические кривые бетулина в бересте и экстракте на 2-й стадии экстракции.

Последующая обработка результатов моделирования позволит рекомендовать рациональные режимные параметры процесса экстракции бетулина из бересты березы, а именно гидромодуль и скорость экстрагента, продолжительность отдельных стадий и геометрические размеры экстрактора.

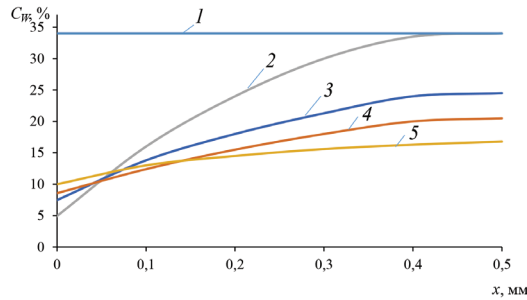
Результаты исследования и их обсуждение

Данные для моделирования: толщина частиц бересты $S = 1$ мм; $m_c = 1$ кг; исходное содержание бетулина в бересте – 0,34 кг/кг; исходная масса бетулина – 0,340 кг; температура экстракции – 110 °С; $M = 2,5$; начальная масса толуола – 2,5 кг; $a_m = 7,8 \cdot 10^{-11}$ м²/с; $K = 0,9$.

На рис. 2 приведены расчетные кривые распределения бетулина в частице бересты в различные моменты времени. Зависимости получены моделированием процесса с помощью дифференциальных уравнений (5) и (9) при краевых условиях (7) и (8). Анализ кривых показывает, что расчетное содержание бетулина по толщине частицы со временем падает, но на ее поверхности ($x = 0$) возрастает. Это объясняется насыщением толуола бетулином.

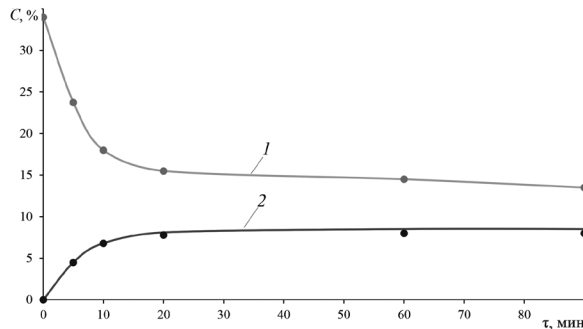
Рис. 2. Распределение бетулина в бересте по сечению частицы при продолжительности экстракции, мин: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 90

Fig. 2. Distribution of betulin in birch bark over the cross-section of particles, with the extraction duration of, min: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 90



На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные данные по кинетике среднего содержания бетулина в бересте и толуоле. Для оценки воспроизводимости экспериментальных данных опыты повторялись 3-кратно (на графиках приведены средние арифметические значения). Из анализа кривых рис. 3 видно, что за первые 20 мин из бересты уходит 23 % бетулина, а в течение следующих 70 мин – лишь 2,5 %, что говорит о резком падении скорости процесса экстракции на этом участке. Данный факт объясняется, как видно из рис. 2, уменьшением градиента содержания бетулина по сечению бересты вследствие увеличения его начальной концентрации на поверхности при $x = 0$. Поэтому продолжительность 1-й стадии экстракции при гидромодуле $M = 2,5$ целесообразно ограничить 20 мин.

Рис. 3. Кинетические кривые средних значений: содержания бетулина в бересте (1) и в толуоле (2)
Fig. 3. Kinetic curves of the average betulin content values in birch bark (1) and in toluene (2)



Средняя скорость процесса экстракции на 1-й стадии определяется так:

$$N_1 = \frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \frac{39 - 16}{20} = 1,15 \text{ %/мин.}$$

В следующие 20 мин скорость процесса составляет

$$N_1 = \frac{16 - 14,5}{20} = 0,075 \text{ %/мин.} \tag{17}$$

На 2-й стадии экстракцию ведут с подачей свежего экстрагента, поэтому концентрация экстракта, в отличие от 1-й стадии, зависит не только от продолжительности, но и от текущей высоты аппарата, на которой идет процесс экстрагирования.

На рис. 4 представлены динамические кривые содержания бетулина в бересте, полученные при подаче свежего экстрагента с расходом 22,5 кг/ч, рассчитанные на текущих высотах: $h_1 = 0$; $h_2 = 1/2H$; $h_3 = H$. Анализ кривых рис. 4 показывает, что локальные концентрации бетулина в исходной бересте (после 1-й стадии экстракции) одинаковы на разных высотах экстрактора. С увеличением текущей высоты экстрактора скорость удаления бетулина замедляется. Это связано с повышением локальной концентрации бетулина в толуоле с увеличением высоты.

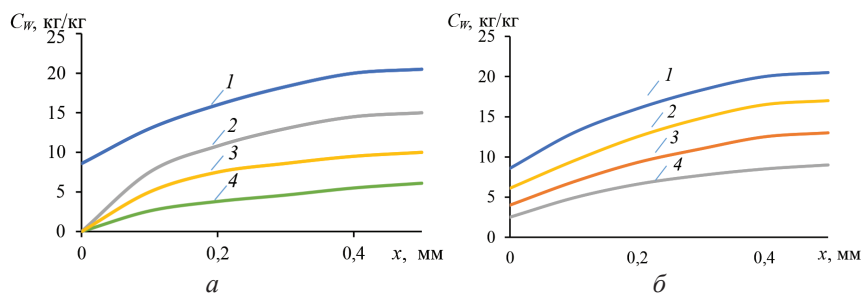
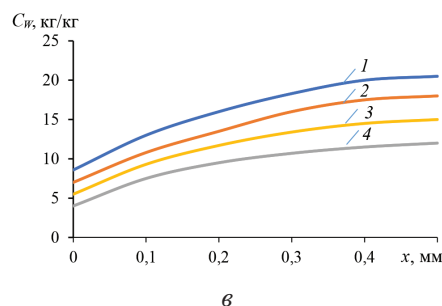


Рис. 4. Динамика локальных значений содержания бетулина в бересте на разных высотах экстрактора: a – 0 м; b – $1/2H$; $в$ – H (обозначения 1–4 – см. рис. 2)

Fig. 4. Dynamics of the local betulin content values in birch bark at different heights of the extractor: a – 0 m; b – $1/2H$; $в$ – H (figures 1–4 correspond to figures 1–4 in fig. 2)



На рис. 5 приведены экспериментальные и расчетные данные по изменению среднего содержания бетулина в бересте на разных высотах экстрактора (рис. 5, a) и по всему аппарату (рис. 5, b) с течением времени. Анализ кривых рис. 5, a показывает, что расхождение между расчетными и экспериментальными результатами по высоте аппарата возрастает с 15 до 20 %. Экспериментальные данные говорят о более низком содержании бетулина в бересте с увеличением высоты отбора проб. Это объясняется тем, что начальные условия выбраны без учета продолжительности 1-й стадии процесса экстракции, до момента достижения свежим растворителем моделируемой высоты.

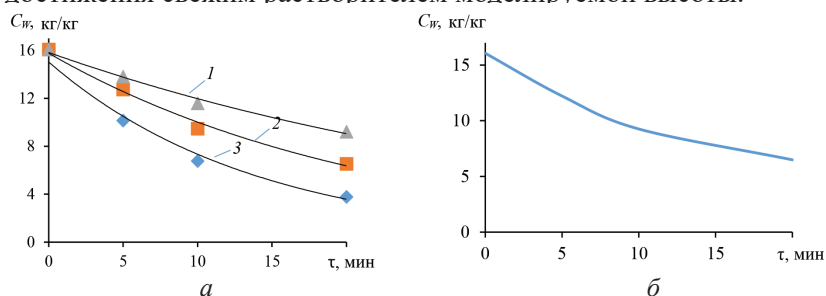


Рис. 5. Зависимость среднего содержания бетулина в бересте от продолжительности процесса экстракции: a – на высотах экстрактора: 1 – 0 м; 2 – $1/2H$; 3 – H ; b – по всему аппарату

Fig. 5. Dependence of the average betulin content in birch bark on the duration of the extraction process: a – at the heights of: 1 – 0 m; 2 – $1/2H$; 3 – H ; b – throughout the device

Общий анализ кривых на рис. 4 и 5 свидетельствует о том, что в конце 2-й стадии экстракции содержание бетулина в бересте разное по сечению частиц и по высоте экстрактора. Поэтому при организации процесса экстракции следует предусмотреть 3-ю стадию – стабилизацию содержания бетулина по высоте и по сечению частиц.

По результатам обработки кинетической зависимости, представленной на рис. 5, б, определена средняя скорость экстракции на 2-й стадии:

$$N_{II} = \frac{\Delta C}{\Delta \tau} = \frac{16 - 6,5}{20} = 0,45\%/\text{мин.} \quad (18)$$

Из данных (17), (18) можно рассчитать увеличение скорости процесса за счет подачи свежего толуола:

$$n = \frac{N_{II}}{N_I} = \frac{0,450}{0,075} = 6.$$

Таким образом, организация процесса в 2 стадии с введением свежего толуола на 2-м этапе увеличивает скорость экстракции в 6 раз и сокращает, тем самым, общее время экстракции при заданных исходных данных. При этом, в соответствии с формулами (1) и (4), появляется возможность сократить габариты экстрактора.

Заключение

Приведенная инженерная методика расчета позволяет рекомендовать рациональные технологические параметры экстрагирования бересты толуолом и определить основные конструктивные размеры экстрактора. Анализ результатов моделирования процесса экстракции доказал целесообразность ведения процесса в 2 последовательные стадии: при нахождении сырья по отношению к толуолу в состоянии покоя и при экстрагировании сырья непрерывной подачей свежего экстрагента. Благодаря наличию 2 стадий значительно повышается скорость извлечения бетулина. Однако, как показали исследования, к концу 2-го периода содержание бетулина в бересте и в экстрагенте как по сечению частиц, так и по высоте экстрактора становится неравномерным. Поэтому предлагаем дополнить процесс экстракции 3-й стадией с целью выравнивания содержания бетулина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аксельруд Г.А. Теория диффузионного извлечения веществ из пористых тел. Львов: Львов. политехн. ин-т, 1959. 234 с.

Aksel'rud G.A. *The Theory of Diffusion Extraction of Materials from Porous Bodies*. Lviv, Lviv Polytechnic Institute Publ., 1959. 234 p. (In Russ.).

2. Бадогина А.И., Третьяков С.И., Кутакова Н.А., Коптелова Е.Н. Исследование кинетических закономерностей процесса СВЧ-экстракции луба в сравнении с березовой корой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 164–175.

Badogina A.I., Tret'yakov S.I., Kutakova N.A., Koptelova E.N. The Comparison of Kinetics of Microwave-Assisted Extraction of Bast and Birch Bark. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 3, pp. 164–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.164>

3. Ивахнюк Г.К., Скрипник И.Л., Воронин С.В. Исследование возможности применения бетулина для очистки воды от вредных примесей // Вестн. МАНЭБ. 2020. Т. 25, № 1. С. 55–61.

Ivakhnyuk G.K., Skripnik I.L., Voronin S.V. Investigation of the Possibility of Using Betulin for Purification from Water Impurities. *Vestnik IAELPS*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.).

4. Исаева А.Ю., Гребенщиков А.В. Использование бетулина в технологии пищевых продуктов // Успехи соврем. естествознания. 2012. № 6. 133 с.

Isaeva A.Yu., Grebenshchikov A.V. The Use of Betulin in Food Technology. *Advances in Current Natural Sciences*, 2012, no. 6. 133 p. (In Russ.).

5. Кузнецов Б.Н., Кузнецова С.А., Левданский В.А., Судакова И.Г., Веселова О.Ф. Совершенствование методов выделения, изучение состава и свойств экстрактов березовой коры // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13, № 3. С. 391–400.

Kuznetsov B.N., Kuznetsova S.A., Levdansky V.A., Sudakova I.G., Veselova O.F. Improvement of Excretion Methods and Studying the Composition and Properties of Birch Bark Extracts. *Chemistry for Sustainable Development*, 2005, vol. 13, no. 3, pp. 391–400. (In Russ.).

6. Патент № 2184120 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00. Способ получения бетулина: № 2001103062/04: заявл. 02.02.2001: опубл. 27.06.2002 / В.И. Рошин, Н.Ю. Шабанова, Д.Н. Ведерников.

Roshchin V.I., Shabanova N.Yu., Vedernikov D.N. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2184120 C1, 2002. (In Russ.).

7. Патент № 2192879 С1 РФ, МПК А61К 36/185, А61К 129/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2002101403/14: заявл. 04.01.2002: опубл. 20.11.2002 / Ю.И. Стернин; заявитель ЗАО «СНС – фарма».

Sternin Yu.I. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2192879 C1, 2002. (In Russ.).

8. Патент № 2270201 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00. Способ получения бетулина: № 2004122278/04: заявл. 19.07.2004: опубл. 20.02.2006 / М.С. Юнусов, Н.Г. Комиссарова, Н.Г. Беленкова; заявитель Ин-т органич. химии Уфим. ИЦ РАН.

Yunusov M.S., Komissarova N.G., Belenkova N.G. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2270201 C1, 2006. (In Russ.).

9. Патент № 2306318 С2 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, С08Н 5/04. Способ химической переработки бересты: № 2005127381/04: заявл. 31.08.2005: опубл. 20.09.2007 / А.Н. Кислицын, И.Н. Клабукова, А.Н. Трофимов; заявитель ООО «Береста-ЭкоДом».

Kislitsyn A.N., Klabukova I.N., Trofimov A.N. *The Method of Birch Bark Chemical Processing*. Patent RF, no. RU 2306318 C2, 2007. (In Russ.).

10. Патент № 2683634 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2018116921: заявл. 07.05.2018: опубл. 29.03.2019 / А.В. Сафина, Д.Ф. Зиятдинова, Н.Ф. Тимербаев, Д.М. Сайфутдинов, Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Г.Р. Арсланова, Д.А. Шайхутдинова, Д.Р. Абдуллина; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Safina A.V., Ziatzinova D.F., Timerbayev N.F., Sayfutdinov D.M., Safin R.R., Safin R.G., Arslanova G.R., Shaykhutdinova D.S., Abdullina D.R. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2683634 C1, 2019. (In Russ.).

11. Патент № 2767041 С1 РФ, МПК С07J 53/00, С07J 63/00, В01D 11/04. Способ получения бетулина: № 2021117895: заявл. 21.06.2021: опубл. 16.03.2022 / Р.Г. Сафин, Д.Р. Абдуллина, Д.Ф. Зиятдинова, А.В. Сафина; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Safin R.G., Abdullina D.R., Ziatdinova D.F., Safina A.V. *The Method of Betulin Extraction*. Patent RF, no. RU 2767041 C1, 2022. (In Russ.).

12. Сафина А.В., Абдуллина Д.Р., Сафин Р.Г., Арсланова Г.Р., Валеев К.В. Энерго- и ресурсосберегающая технология экстрагирования бетулина из отходов бересты березы // Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 4. С. 99–106.

Safina A.V., Abdullina D.R., Safin R.G., Arslanova G.R., Valeev K.V. Energy-Saving Technology for Betulin Extraction from Birch Bark Waste. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 99–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-99-106>

13. Третьяков С.И., Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Владимиров Т.М., Богданович Н.И. Бетулин: получение, применение, контроль качества: моногр. Архангельск: САФУ, 2015. 180 с.

Tret'yakov S.I., Koptelova E.N., Kutakova N.A., Vladimirova T.M., Bogdanovich N.I. *Betulin: Extraction, Application, Quality Control*: Monograph. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 180 p. (In Russ.).

14. Хлебникова Т.Б., Пай З.П., Кузнецов Б.Н., Матцата Ю.В., Кузнецова С.А., Бердникова П.В., Скворцова Г.П. Каталитическое окисление бетулина и диацетата бетулина с использованием экологически благоприятного окислителя // Журн. СФУ. Сер.: Химия. 2008. Т. 1, № 3. С. 277–285.

Khlebnikova T.B., Pai Z.P., Kuznetsov B.N., Matcata Yu.V., Kuznetsova S.A., Berdnikova P.V., Skvortsova G.P. Catalytic Oxidation of Betulin and Betulin Diacetate with Ecology Friendly Reagents. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2008, vol. 1, no. 3, pp. 277–285. (In Russ.).

15. Alakurtti S., Mäkelä T., Koskimies S., Yli-Kauhaluoma J. Pharmacological Properties of the Ubiquitous Natural Product Betulin. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2006, vol. 29, iss. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2006.04.006>

16. Grymel M., Lalik A., Kazek-Kęsik A., Szewczyk M., Grabiec P., Erfurt K. Design, Synthesis and Preliminary Evaluation of the Cytotoxicity and Antibacterial Activity of Novel Triphenylphosphonium Derivatives of Betulin. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 16, art. no. 5156. <https://doi.org/10.3390/molecules27165156>

17. Hordyjewska A., Ostapiuk A., Horecka A. Betulin and Betulinic Acid in Cancer Research. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 72–75. <https://doi.org/10.26444/jpccr/92743>

18. Makarevich N.A., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I. Kinetic Model of Mass Transfer at Interfaces with Components of Plant Products. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2019, vol. 55, pp. 1063–1070. <https://doi.org/10.1134/S2070205119050162>

19. Safina A.V., Valeev K.V., Safin R.G. Mathematical Description of the Process of Extraction of Biologically Active Substances from Larch Wood. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2767, iss. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0127439>

20. Scheffler A. The Wound Healing Properties of Betulin from Birch Bark from Bench to Bedside. *Planta Medica*, 2019, vol. 85, iss. 7, pp. 524–527. <https://doi.org/10.1055/a-0850-0224>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest