

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

1/379

2021

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
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)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф., акад. РАЕ (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
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)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёрensen У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Тельшева Г.М., д-р хим. наук, проф. (Латвия, Рига)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
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)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

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 6 times a year

1/379

2021

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
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)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof., Academician of the Russian Academy of Natural History (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
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 Sciences, 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)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Telysheva G.M., Doctor of Chemistry, Prof. (Latvia, Riga)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
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)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>С.В. Залесов, Л.А. Белов, А.С. Оплетаев, А.Г. Магасумова, Т.Ю. Карташова, Н.М. Дебков.</i> Формирование кедровников рубками ухода на бывших сельскохозяйственных угодьях.....	9
<i>Т.С. Станкевич.</i> Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса.....	20
<i>V.A. Savchenkova, S.B. Vasilyev, V.F. Nikitin, P.A. Aksenov.</i> Productivity of Forest Plantation Crops.....	35
<i>Е.Н. Наквасина, Ю.Н. Шумилова.</i> Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях.....	46
<i>Н.В. Примаков.</i> Изменчивость лесоводственных характеристик полезащитных лесных насаждений Краснодарского края.....	60
<i>В.П. Иванов, С.И. Марченко, Д.И. Нартов, Л.П. Балухта.</i> Радиальный прирост сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) при ингибировании.....	69
<i>О.Н. Тюкавина, Д.Н. Клевцов, Д.М. Адаи.</i> Теплотворная способность древесины сосны в культурах северотаежного лесного региона.....	82
<i>А.Л. Федорков.</i> Объем и качество ствола гибридной и обычной осины в клоновом архиве.....	92
<i>О.Ю. Кошелева.</i> Районирование водосборов малых рек юга Приволжской возвышенности по водоохранно-защитной роли лесов.....	99
<i>А.В. Скок, В.Н. Сорокопудов, И.Н. Глазун.</i> Влияние хронического ионизирующего излучения на вариабельность митотической активности тканей <i>Pinus sylvestris</i> L.	112

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>И.Р. Шегельман, П.В. Будник.</i> Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа.....	120
<i>Э.Ф. Герц, А.В. Мехренцев, В.В. Побединский, Н.Н. Теринов, А.Ф. Уразова.</i> Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства.....	138

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>В.В. Огурцов, Е.В. Каргина, И.С. Матвеева.</i> Оптимизация дробности сортировки бревен по диаметру.....	150
--	-----

-
- В.К. Любов, А.М. Владимиров.* Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках..... 159

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- G.A. Sabirova, R.R. Safin, N.R. Galyavetdinov, A.R. Shaikhutdinova, R.Z. Khayrullin.* Studying the Rheological Properties of a Polylactide Melt Mixed with Wood Filler..... 173
- Р.А. Смит, Е.Ю. Демьянцева, О.С. Андранович, А.П. Филиппов.* Особенности солюбилизирующего действия амфифильных соединений при обессмоливании целлюлозы..... 180
- Ю.В. Севастьянова, Е.А. Топтунов, Н.В. Щербак, П.В. Солнцев.* Определение математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ (хвойная ЦВВ)..... 192
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>S.V. Zalesov, L.A. Belov, A.S. Opletaev, A.G. Magasumova, T.Yu. Kartashova, N.M. Debkov.</i> Formation of Siberian Pine Forests by Improvement Felling on Former Agricultural Lands.....	9
<i>T.S. Stankevich.</i> Forecasting the Spatial Behavior of a Forest Fire at Uncertainty and Instability of the Process.....	20
<i>V.A. Savchenkova, S.B. Vasilyev, V.F. Nikitin, P.A. Aksenov.</i> Productivity of Forest Plantation Crops.....	35
<i>E.N. Nakvasina, Yu.N. Shumilova.</i> Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands.....	46
<i>N.V. Primakov.</i> Variability of Silvicultural Characteristics of Forest Shelterbelts in Krasnodar Krai.....	60
<i>V.P. Ivanov, S.I. Marchenko, D.I. Nartov, L.P. Balukhta.</i> Radial Growth of Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) under Inhibition.....	69
<i>O.N. Tyukavina, D.N. Klevtsov, D.M. Adaj.</i> Calorific Value of Pine Wood in Crops of the Northern Taiga Forest Area.....	82
<i>A.L. Fedorkov.</i> Stem Volume and Quality of Hybrid and Common Aspen in the Clonal Archive.....	92
<i>O.Yu. Kosheleva.</i> Zoning of Catchments of Small Rivers in the South of the Volga Upland by the Water Protection Role of Forests.....	99
<i>A.V. Skok, V.N. Sorokopudov, I.N. Glazun.</i> Influence of Chronic Ionizing Radiation on the Variability of Mitotic Activity of <i>Pinus sylvestris</i> L. Tissues.....	112

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>I.R. Shegelman, P.V. Budnik.</i> Typification of Forest Areas by Natural-Production Conditions Based on Cluster Analysis.....	120
<i>E.F. Gerts, A.V. Mekhrentsev, V.V. Pobedinsky, N.N. Terinov, A.F. Urazova.</i> Improving the Efficiency of Multifunctional Machines for Intensive Forestry.....	138

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>V.V. Ogurtsov, E.V. Kargina, I.S. Matveeva.</i> Optimization of Log Sorting by Diameter..	150
<i>V.K. Lyubov, A.M. Vladimirov.</i> Complex Efficiency of Using Wood Pellets in Power Plants.....	159

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- G.A. Sabirova, R.R. Safin, N.R. Galyavetdinov, A.R. Shaikhutdinova, R.Z. Khayrullin.* Studying the Rheological Properties of a Polylactide Melt Mixed with Wood Filler..... 173
- R.A. Smit, E.Yu. Demiantseva, O.S. Andranovich, A.P. Filippov.* Features of Solubilizing Effect of Amphiphilic Compounds during Pulp Deresination..... 180
- Yu.V. Sevastyanova, E.A. Toptunov, N.V. Shcherbak, P.V. Solntsev.* Determination of the Mathematical Dependence of the Black Liquor Density on the Dry Matter Content (High Yield Softwood Pulp)..... 192
-



УДК 630*24:630*174.758+631.61

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-9-19

ФОРМИРОВАНИЕ КЕДРОВНИКОВ РУБКАМИ УХОДА НА БЫВШИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЯХ

С.В. Залесов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Л.А. Белов¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4813-2020](https://orcid.org/0000-0002-6397-3681),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6397-3681>

А.С. Оплетаев¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [P-5640-2017](https://orcid.org/0000-0003-2602-6527),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2602-6527>

А.Г. Магасумова¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-1607-2019](https://orcid.org/0000-0002-1727-2008),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1727-2008>

Т.Ю. Карташова¹, аспирант; ResearcherID: [ABE-4769-2020](https://orcid.org/0000-0002-1830-2125),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1830-2125>

Н.М. Дебков^{2,3}, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: zalesov@usfeu.ru, bla1983@yandex.ru, opletaev@el.ru, alfyam@rambler.ru, kartashova_t@mail.ru

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, просп. Ленина, д. 36, г. Томск, Россия, 634050; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

³Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

Аннотация. По материалам исследований, выполненных на постоянной пробной площади, проанализирована лесоводственным методом эффективность рубок ухода в мягколиственных насаждениях, сформировавшихся на бывших сельскохозяйственных угодьях в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре. Экспериментально установлено, что в составе 25–30-летних мягколиственных насаждений имеет место сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour.), кроме того, под пологом древостоев присутствует «условный подрост» данной породы. Проведением рубок ухода можно обеспечить увеличение доли сосны кедровой сибирской в составе формирующихся насаждений и даже ее доминирование в древостоях. Рубки ухода рекомендуется проводить полосным способом. При первом приеме производится вырубка деревьев мягколиственных пород в полосах шириной 10 м при оставлении без ухода полос аналогичной ширины, при втором приеме (через 10 лет после первого) деревья мягколиственных пород вырубается в тех полосах, где ухода не было. Вырубка всех деревьев, сопутствующих сосне кедровой сибирской, за один прием недопустима, поскольку приводит к интенсивному разрастанию травянистой растительности, задержанию и исключению появления подроста сосны кедровой сибирской, а также резко повышает пожарную опасность весной и осенью. Кроме того, при указанной интенсивности оставляемые для выращивания экземпляры сосны кедровой сибирской поражаются хермесом сибирским (*Pineus cembrae* Cholodkovsky, 1988).

Для цитирования: Залесов С.В., Белов Л.А., Оплетаев А.С., Магасумова А.Г., Карташова Т.Ю., Дебков Н.М. Формирование кедровников рубками ухода на бывших сельскохозяйственных угодьях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 9–19. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-9-19

Ключевые слова: Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, сельскохозяйственные угодья, залежи, лесовосстановление, сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour.), рубки ухода.

Введение

Общеизвестно [2, 6–8, 10–14], что сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour.) является одной из наиболее ценных пород-лесообразователей, произрастающих на территории Российской Федерации. Не случайно, уже многие десятилетия производятся попытки увеличения доли кедровников в лесном фонде. К сожалению, несмотря на предпринимаемые усилия, существенных сдвигов в данном направлении до настоящего времени получить не удалось. Доминирование сплошнолесосечных рубок и лесные пожары в сочетании с изъятием значительной площади покрытых лесной растительностью земель под строительство линейных и площадных объектов нефтегазодобычи не способствуют увеличению доли насаждений с преобладанием сосны кедровой сибирской в составе древостоев на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО – Югры).

В последние десятилетия в России прослеживается четкая тенденция сокращения площадей сельхозугодий [3, 4, 9]. Это относится и к ХМАО – Югре. Исключенные из сельскохозяйственного использования земли интенсивно зарастают древесно-кустарниковой растительностью. В составе молодняков, формирующихся на бывших пашнях и сенокосах, присутствует и сосна кедровая сибирская. Однако нам неизвестны работы, посвященные вопросам увеличения доли сосны кедровой сибирской в формирующихся на бывших сельскохозяйственных угодьях молодняках. Последнее определило направление наших исследований.

Цель работы – установление возможности увеличения доли сосны кедровой сибирской в составе молодняков, формирующихся на бывшей пашне рубками ухода.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служили естественно сформировавшиеся мягколиственные молодняки на бывшей пашне вблизи д. Тренька на о-ве Большой Чухтинский. Указанная территория, в соответствии с действующими нормативными документами [5], относится к Западно-Сибирскому среднетаежному равнинному лесному району.

Прекращение сельскохозяйственного использования произошло 29 лет назад, и пашня начала интенсивно зарастать древесно-кустарниковой растительностью, преимущественно березой семенного происхождения.

В основу исследований положен метод постоянных пробных площадей (ППП), при закладке которых использовались широко апробированные методики [1]. Объектом наших исследований выступила ППП, состоящая из четырех секций площадью по 0,5 га. Координаты секций: А – N61°13,0787' и E69°04,0863'; Б – N61°13,0576' и E69°04,1275'; В – N61°13,0359' и E69°04,1610';

Г – N61°13,1029' и E69°03,8031'. Секция А являлась контрольной, рубки ухода на ней не проводились. На остальных рабочих секциях выполнялись рубки ухода разными способами: на секции Б – полосным способом с шириной полос 10 м и вырубкой всех деревьев мягколиственных пород, при этом полосы, пройденные рубкой, чередовались с полосами аналогичной ширины, где рубка не проводилась; на секции В – окнами вокруг всех экземпляров сосны кедровой сибирской, при этом вырубались мягколиственные породы в радиусе 1,5 м; на секции Г – равномерным изреживанием по верховому методу с практически полным удалением крупных экземпляров березы.

В процессе исследования выполнен сплошной перебор и установлены основные таксационные показатели древостоев: до проведения рубок ухода, сразу после проведения, спустя 3 и 11 лет после ухода.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что до проведения рубок ухода таксационные показатели сформировавшихся на бывшей пашне молодняков различались довольно существенно (табл. 1).

Таблица 1

Таксационные показатели древостоев на секциях ППП до проведения рубок ухода

Индекс секции	Состав*	Порода	Возраст, лет	Средние		Густота, шт./га	Класс бонитета	Относительная полнота	Запас, м ³ /га
				диаметр, см	высота, м				
А (контроль)	5БЗИв2Ос ед. К, Е	Б	25	5,3	8,0	3291	II	0,6	32
		Ив	20	5,6	8,8	1036			19
		Ос	20	7,6	8,3	55			13
		К	15	2,0	2,1	145			–
		Е	13	2,0	1,6	180			–
		<i>Итого</i>							4707
Б	5БЗИв2Ос+С ед. К, Е	Б	25	5,3	8,0	3305	II	0,6	31
		Ив	20	5,5	8,9	1028			19
		Ос	20	7,8	8,5	60			12
		С	17	8,1	7,9	73			3
		К	15	1,8	2,1	150			–
		Е	13	2,0	1,8	170			–
<i>Итого</i>					4786			65	
В	8Ив2Б ед. К, П, Ос, С	Ив	20	9,2	8,9	2568	II	0,5	58
		Б	25	6,2	8,0	452			16
		К	15	2,0	2,5	188			–
		П	10	2,0	1,8	28			–
		Ос	12	7,5	10,2	35			–
		С	9	2,0	3,0	10			–
<i>Итого</i>					3281			74	
Г	9Б1С+К ед. Е, П, Ос	Б	13	4,7	5,8	2901	II	0,65	25
		С	15	6,2	5,8	22			2
		К	8	2,1	2,0	530			1
		Е	8	2,0	1,8	13			–
		Ос	5	2,0	3,2	13			–
		<i>Итого</i>							3479

*Здесь и далее, в табл. 2, 3, 5, 6: Б – береза; Ив – ива козья; Ос – осина; К – сосна кедровая сибирская; Е – ель; П – пихта; С – сосна обыкновенная.

Общим на всех секциях является абсолютное доминирование мягколиственных древесных пород при незначительном участии сосны кедровой сибирской в составе древостоев. Густота последней варьируется по секциям от 145 до 530 шт./га при существенном отставании ее по высоте от мягколиственных пород.

Проведение рубок ухода существенно изменило таксационные показатели древостоев на секциях ППП (табл. 2).

Таблица 2

**Таксационные показатели древостоев на секциях ППП
после проведения рубок ухода**

Индекс секции	Состав	Порода	Средние		Густота, шт./га	Класс бонитета	Относительная полнота	Запас, м ³ /га
			диаметр, см	высота, м				
Б (вырубленные полосы)	8К2С	К	1,8	2,1	150	II	0,11	18,0
		Е	2,0	1,8	170			0,4
		С	8,1	7,9	70			2,9
		<i>Итого</i>			390			21,3
В	7Ив3Б ед. К, П, Ос	Ив	11,2	11,8	1367	I	0,35	37,0
		Б	7,3	8,1	440			15,0
		К	3,1	2,3	167			0
		П	2,0	0,0	27			0
		Ос	7,5	10,1	20			0
		С	2,0	3,0	10			0
<i>Итого</i>			2031	52,0				
Г	8Б2К	Б	5,5	6,7	457	I	0,13	4,0
		К	2,1	2,0	530			1,0
		<i>Итого</i>			987			5,0

Как видно из табл. 2, все рабочие секции пройдены рубками ухода достаточно высокой интенсивности. Последнее, в частности, подтверждается снижением относительной полноты древостоев. Удаление конкуренции со стороны мягколиственных пород увеличило приросты хвойных видов уже в первые годы после рубок ухода. Однако положительный эффект на рабочей секции В, где уход заключался в уборке лиственных пород вокруг экземпляров сосны кедровой сибирской, был кратковременным, поскольку лиственные породы резко увеличили прирост в высоту и диаметр кроны. Практически полное удаление лиственных пород также имело отрицательные последствия. В частности, на пройденной рубками ухода секции Г резко увеличились высота и масса живого напочвенного покрова, что привело к угнетению экземпляров сосны кедровой сибирской и повреждению их хермесом сибирским (*Pineus cembrae* Cholodkovsky, 1988). В результате, спустя 11 лет после ухода количество экземпляров сосны кедровой сибирской составило лишь 231 шт./га (табл. 3).

Таблица 3

**Таксационные показатели древостоев на секциях ППП
спустя 11 лет после проведения рубок ухода**

Индекс секции	Состав	Порода	Возраст, лет	Средние		Густота, шт./га	Класс бонитета	Относительная полнота	Запас, м ³ /га
				диаметр, см	высота, м				
А (контроль)	6Б2Ос2Ив ед. К, Е	Б	35	10,4	12,5	3415	II	0,8	46
		Ив	30	10,1	11,4	1100			15
		Ос	30	10,7	11,8	72			17
		К	25	4,0	4,0	141			2
		Е	25	3,2	3,4	130			1
	<i>Итого</i>					4858			81
А (не-вырубленные полосы)	6Б2Ос2Ив+К ед. Е	Б	35	10,3	12,3	3231	II	0,8	51
		Ив	30	10,5	11,9	1235			12
		Ос	30	10,1	11,3	65			16
		К	25	4,5	4,8	163			4
		Е	23	4,0	3,8	150			2
	<i>Итого</i>					4844			85
Б (вырубленные полосы)	4К3Б1С1 Ив1Е+П, Ос	К	25	5,9	5,8	194	II	0,34	19
		Б	28	5,6	7,1	150			11
		С	22	10,7	11,1	80			5
		Ив	36	4,9	5,1	130			4
		Е	23	9,1	8,9	121			3
		П	21	4,0	3,8	19			1
		Ос	23	4,0	4,2	25			1
	<i>Итого</i>					719			44
В	5Ив2Б2К1Ос ед. П, Е	Ив	38	10,9	11,2	1231	I	0,54	32
		Б	20	6,1	7,2	362			16
		К	27	5,3	4,9	159			12
		П	23	3,9	4,1	10			1
		Ос	25	13,6	12,8	48			8
		Е	13	4,1	4,0	27			1
	<i>Итого</i>					1837			70
Г	8К2Б	К	23	5,2	3,9	231	II	0,10	22
		Б	23	7,9	8,3	101			5
	<i>Итого</i>					332			27

Изменение экологической обстановки, вызванное проведением рубок ухода, обусловило увеличение среднего прироста по высоте на всех рабочих секциях (табл. 4).

Данные табл. 4 свидетельствуют, что при проведении рубок ухода полосным способом (секция Б) и окнами (секция В) различия в величине среднего прироста по высоте на рабочих секциях и на контроле (секция А) статистически достоверны на 95 %-м уровне значимости уже через год после рубок ухода.

Таблица 4

Статистические показатели средних приростов (см) центрального побега сосны кедровой сибирской на секциях ППП после проведения рубок ухода

Индекс секции	Год прироста									
	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009
А (контроль)	8,1 ± ±0,98	7,2 ± ±1,01	8,3 ± ±0,87	7,9 ± ±0,95	7,0 ± ±1,00	8,2 ± ±0,78	8,2 ± ±0,69	9,3 ± ±1,03	11,2 ± ±0,98	13,1 ± ±1,01
Б (оставленные полосы)	8,3 ± ±1,15	7,7 ± ±1,09	8,5 ± ±0,97	8,3 ± ±1,05	7,2 ± ±1,11	8,3 ± ±0,91	8,5 ± ±1,12	9,6 ± ±1,11	12,1 ± ±0,97	13,2 ± ±1,07
Б (вырубленные полосы)	21,8 ± ±1,28	24,4 ± ±1,21	25,2 ± ±1,29	30,4 ± ±1,85	34,4 ± ±2,31	30,8 ± ±2,21	24,6 ± ±1,67	11,8 ± ±0,99	19,2 ± ±1,09	26,6 ± ±2,16
В	13,6 ± ±1,08	16,0 ± ±1,15	24,0 ± ±1,85	27,0 ± ±2,13	24,4 ± ±1,83	17,8 ± ±1,54	22,4 ± ±2,01	21,4 ± ±1,61	19,2 ± ±1,32	18,9 ± ±1,25
Г	34,0 ± ±2,31	35,0 ± ±2,11	30,6 ± ±1,98	36,8 ± ±2,36	27,6 ± ±2,54	28,4 ± ±1,49	21,3 ± ±1,33	10,0 ± ±1,11	9,8 ± ±0,88	10,2 ± ±1,03

При удалении практически всех сопутствующих пород (секция Г) прирост центрального побега сосны кедровой сибирской в первые годы после ухода меньше, чем на контроле. Однако в последующие годы он также увеличивается, статистически достоверно превышая таковой на контрольной секции.

Материалы исследований показали положительное влияние рубок ухода на рост подроста сосны кедровой сибирской. Однако ее экземпляры существенно уступают другим древесным породам по высоте, а главное, их недостаточно для формирования полноценного кедрового насаждения. Так, спустя 11 лет после рубок ухода густота сосны кедровой сибирской варьирует от 159 до 231 шт./га. В то же время на всех секциях ППП имеется подрост сосны сибирской – «условный подрост». Под этим термином нами понимаются экземпляры пород лесообразователей, не достигшие высоты 1,3 м и, следовательно, не вошедшие в состав формирующихся молодняков. В отличие от подроста в классическом понимании экземпляры условного подроста имеют близкий возраст с экземплярами, формирующими молодняк. Различие в возрасте между ними не превышает одного класса возраста.

Установлено, что количество жизнеспособных экземпляров подроста сосны кедровой сибирской после проведения рубок ухода в пределах секций ППП варьировалось от 65 до 780 шт./га (табл. 5). Логично предположить, что при надлежащем уходе часть подроста сосны кедровой сибирской в будущем перейдет в состав древостоя.

Из табл. 5 видно, что густота подроста сосны кедровой сибирской на период рубки относительно невелика, однако проведение рубок оказало влияние на его накопление, что четко прослеживается по данным табл. 6.

Таблица 5

**Густота и встречаемость жизнеспособного условного подроста
сосны кедровой сибирской на секциях ППП сразу после проведения рубок ухода**

Индекс секции	Состав подроста	Густота подроста, шт./га	Встречаемость, %
А (контроль)	6Б	1035	95,0
	3К	515	60,0
	1П	160	15,0
	+ Е	125	15,0
	<i>Итого</i>	1835	–
Б (вырубленные полосы)	4К	780	40,0
	4Б	965	65,0
	1П	250	10,0
	1Е	210	10,0
	<i>Итого</i>	2205	–
В	5Б	1381	85,0
	3Е	785	60,0
	2К	510	50,0
	+ П	120	20,0
	<i>Итого</i>	2796	–
Г	6Б	196	20,0
	2К	65	10,0
	2Е	45	10,0
	<i>Итого</i>	306	–

Таблица 6

**Густота и встречаемость жизнеспособного условного подроста сосны кедровой
сибирской на секциях ППП спустя 11 лет после проведения рубок ухода**

Индекс секции	Состав подроста	Густота подроста, шт./га	Встречаемость, %
А (контроль)	5Б	840	65
	3К	620	50
	1П	180	20
	1Е	150	15
	<i>Итого</i>	1790	–
Б (оставленные полосы)	7К	2425	90,0
	2Е	525	30,0
	1П	375	30,0
	<i>Итого</i>	3325	–
Б (вырубленные полосы)	5Б	2125	50,0
	3К	1150	50,0
	1Е	575	20,0
	1П	650	20,0
	<i>Итого</i>	4500	–
В	4Б	1490	85,0
	3Е	1050	70,0
	2К	820	50,0
	1П	253	25,0
	<i>Итого</i>	361	–

Примечание. На секции Г подрост отсутствует.

Данные о количестве подроста сосны кедровой сибирской показали, что однократное удаление всех сопутствующих ей древесных пород (секция Г) привело к резкому увеличению освещенности, разрастанию травянистой, преимущественно злаковой, растительности и задернению. Высокий травостой, сформировавшийся на бывшей пашне, не только стал причиной недостатка элементов питания и света для сосны кедровой сибирской, но и создал благоприятные микроклиматические условия для развития хермеса сибирского (*Pineus cembrae* Cholodkovsky, 1988), что привело к гибели мелкого и среднего подроста сосны кедровой сибирской. Сохранившиеся ее экземпляры в количестве 231 шт./га имеют хороший прирост в высоту, превышающий таковой на контроле, но слабая очищенность от сучьев в сочетании со значительной массой живого напочвенного покрова делает данный древостой неустойчивым против лесных пожаров. Кроме того, на этой секции нет подроста сосны кедровой сибирской, что исключает формирование сомкнутого кедровника в ближайшем будущем.

Проведение рубок ухода с образованием окон (секция В) вокруг экземпляров сосны кедровой сибирской дает очень кратковременный эффект, поскольку кроны мягколиственных пород быстро разрастаются и уже через 5–7 лет требуется проведение повторных рубок ухода. При этом на данной секции идет интенсивное накопление подроста ели.

Лучший результат ухода достигнут на секциях, пройденных полосными рубками ухода (секция Б). Ширина полос 10 м не позволяет существенно снизить освещенность в вырубаемых полосах примыкающими к ним деревьями. Спустя 11 лет после рубок ухода в изреженных полосах имеется 194 шт./га сосны кедровой сибирской, а также подрост указанной породы в количестве 1150 шт./га с показателем встречаемости 50 %. Кроме того, подрост сосны кедровой сибирской в количестве около 2500 шт./га и встречаемостью 90 % имеется в полосах, где уход не производился. Другими словами, спустя 10 лет после первого приема рубок ухода на секции Б необходимо провести аналогичный уход в оставленных, не тронутых рубками ухода, полосах. При условии сохранения деревьев сосны кедровой сибирской и условного подроста при проведении второго приема рубки, на секции Б будет сформирован молодняк с преобладанием сосны кедровой сибирской в составе древостоев.

Выводы

1. Зарастающие древесно-кустарниковой растительностью бывшие сельскохозяйственные угодья на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры могут быть использованы для увеличения доли кедровых насаждений в лесном фонде.

2. Формирование кедровников можно осуществлять рубками ухода, выполняемыми полосным способом. При этом в полосах шириной 10 м при первом приеме рубки удаляются все деревья мягколиственных пород, а в полосах аналогичной ширины уход не проводится. Второй прием рубок ухода осуществляется через 10 лет после первого, т. е. после накопления условного подроста сосны кедровой сибирской и адаптации к новым условиям ее экземпляров, входящих в древостой. При этом вырубаются деревья мягколиственных пород в ранее оставленных без ухода полосах.

3. Рубки ухода путем рубки окон вокруг экземпляров сосны кедровой сибирской могут быть рекомендованы только при условии повторяемости уходов через 5–7 лет, поскольку разрастание крон соседних деревьев быстро начинает угнетать имеющиеся экземпляры этой ценной породы.

4. Полное удаление всех сопутствующих сосне кедровой сибирской древесных пород недопустимо, потому что приводит к формированию на бывшей пашне мощного травяного покрова и задернению. В результате сохранные экземпляры сосны кедровой сибирской поражаются хермесом сибирским (*Pineus cembrae* Cholodkovsky, 1988), формирование подроста прекращается, резко повышается пожарная опасность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 152 с. [Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Environmental Monitoring of Recreational Forest Plantations*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2015. 152 p.]

2. Дебков Н.М., Залесов С.В., Оплетев А.С. Орехово-промысловые зоны и их современное состояние (на примере Томской области) // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2016. Т. 20, № 6. С. 22–31. [Debkov N.M., Zalesov S.V., Opletaev A.S. Nut-Business Zones and Their Up-to-Date State (on the Example of the Tomsk Region). *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2016, vol. 20, no. 6, pp. 22–31].

3. Морозов А.М. Формирование насаждений на землях, исключенных из сельскохозяйственного оборота, в подзоне предлесостепных сосново-березовых лесов Свердловской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2008. 20 с. [Morozov A.M. *Formation of Plantations on the Lands Excluded from the Agricultural Turnover in the Subzone of Pre-Forest-Steppe Pine-Birch Forests of the Sverdlovsk Region: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs.* Yekaterinburg, USFEU Publ., 2008. 20 p.]

4. Новоселова Н.Н., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Формирование древесной растительности на бывших сельскохозяйственных угодьях: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 106 с. [Novoselova N.N., Zalesov S.V., Magasumova A.G. *Formation of Woody Vegetation on Former Agricultural Lands: Monograph*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2016. 106 p.]

5. Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации: утв. приказом Минприроды России от 18.08.2014 г. № 367. Режим доступа: www.consultant.ru (дата обращения: 24.10.19). [On Approval of the List of Forest Growing Zones of the Russian Federation and the List of Forest Areas of the Russian Federation: Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 367 Dated August 18, 2014].

6. Перекальский В.В., Креснов В.Г., Манович В.Н., Махонин А.С., Буторина Т.М. О характеристике кедровых лесов Сибири // Кедровые леса в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре: состояние, проблемы, повышение их продуктивности. Ханты-Мансийск: ИД «Югорский», 2007. С. 4–8. [Perekal'skiy V.V., Kresnov V.G., Manovich V.N., Makhonin A.S., Butorina T.M. On the Characteristic of Siberian Pine Forests. *Siberian Pine Forests in Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra: State, Problems, and Improvement of Their Productivity*. Khanty-Mansiysk, Yugorskiy Publ., 2007, pp. 4–8].

7. Смолоногов Е.П., Залесов С.В. Эколого-лесоводственные основы организации и ведения хозяйства в кедровых лесах Урала и Западно-Сибирской равнины. Екате-

ринбург: УГЛТУ, 2002. 186 с. [Smolonogov E.P., Zalesov S.V. *Ecological and Forestry Principles of Organization and Management in Siberian Pine Forests of the Urals and West Siberian Plain*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2002. 186 p.]

8. Чижов Б.Е., Бех И.А. Кедровые леса Западно-Сибирской равнины, хозяйство в них. Пушкино: ВНИИЛМ, 2014. 164 с. [Chizhov B.E., Bekh I.A. *Siberian Pine Forests of the West Siberian Plain and Their Management*. Pushkino, VNIILM Publ., 2014. 164 p.]

9. Юровских Е.В. Формирование молодняков на бывших пашнях подзоны южной тайги Урала: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2018. 18 с. [Yurovskikh E.V. *Formation of Young Growth on Former Arable Lands of the Southern Taiga Subzone of the Urals*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2018. 18 p.]

10. Farjon A. *A Handbook of the World's Conifers*. Leiden, Brill, 2010, vol. II. 1111 p.

11. Politov D.V., Belokon Yu.S., Belokon M.M., Mudrik E.A., Petrova E.A., Goroshkevich S.N. Genetic Differentiation of Eurasian Stone Pines: Comparative Analysis of Patterns and Factors. *The 4th Conference on Breeding and Genetic Resources of Five-Needle Pines, Tomsk, Russia, August 9–19, 2011*. Tomsk, IMCES SB RAS, 2011, pp. 26–27.

12. Pravdin L.F., Iroshnikov A.I. Genetic of *Pinus sibirica* Du Tour, *P. koraiensis* Sieb. et Zucc. and *P. pumila* Regel. *Annales forestales*, 1982, no. 9/3, pp. 79–123.

13. Zhao G., Hou A. Determination about Northwestern Area Limit of *Pinus koraiensis* and the Geographic Occurrence of *Pinus sibirica*. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, vol. 2, iss. 1, pp. 42–47.

14. Zhao X., Wang C., Li S., Hou W., Zhang S., Han G., Pan D., Wang P., Cheng Y., Liu G. Genetic Variation and Selection of Introduced Provenances of Siberian Pine (*Pinus sibirica*) in Frigid Regions of the Greater Xing'an Range, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, vol. 25, no. 3, pp. 549–556. DOI: [10.1007/s11676-014-0494-6](https://doi.org/10.1007/s11676-014-0494-6)

FORMATION OF SIBERIAN PINE FORESTS BY IMPROVEMENT FELLING ON FORMER AGRICULTURAL LANDS

Sergey V. Zalesov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Leonid A. Belov¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABE-4813-2020](https://orcid.org/0000-0002-6397-3681),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6397-3681>

Anton S. Opletaev¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-5640-2017](https://orcid.org/0000-0003-2602-6527),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2602-6527>

Alfia G. Magasumova¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-1607-2019](https://orcid.org/0000-0002-1727-2008),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1727-2008>

Tatyana Yu. Kartashova¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABE-4769-2020](https://orcid.org/0000-0002-1830-2125),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1830-2125>

Nikita M. Debkov^{2,3}, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

¹Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: zalesov@usfeu.ru, bla1983@yandex.ru, opletaev@e1.ru, alfyam@rambler.ru, kartashova_t@mail.ru

²National Research Tomsk State University, prosp. Lenina, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

³All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow region, 141202, Russian Federation; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

Abstract. On the base of the researches carried out on the permanent study area silvicultural effectiveness of improvement felling was analyzed in soft-leaved plantations formed on the former agricultural lands in Khanty-Mansi Autonomons Okrug – Yugra. It was experimentally found that among 25–30-year-old soft-leaved stands there is Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour); besides this, nominal undergrowth of this species can be found under the canopy. Improvement felling can provide an increase in the share of Siberian pine in the composition of the forming plantations and even its dominance in stands. It is recommended to carry out improvement felling by the strip method. On the first-stage the felling of soft-leaved species in strips of 10 m wide is carried out, while leaving strips of similar width without care. On the second stage in 10 years soft-leaved trees are cut down in those strips where care was not taken. Felling of all the accompanying Siberian pine trees in a single shot is inadmissible, since it leads to intensive growth of herbaceous vegetation, sodding and exclusion of the Siberian pine undergrowth as well as dramatically increases the fire danger in spring and autumn. In addition, at the indicated intensity, the specimens of Siberian pine left for cultivation are affected by *Pineus cembrae* (Cholodovsky, 1988).

For citation: Zalesov S.V., Belov L.A., Opletaev A.S., Magasumova A.G., Kartashova T.Yu., Debkov N.M. Formation of Siberian Pine Forests by Improvement Felling on Former Agricultural Lands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 9–19. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-9-19

Keywords: Khanty-Mansi Autonomons Okrug – Yugra, agricultural lands, fallows, reforestation, Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour), improvement felling.

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

Поступила 24.10.19 / Received on October 24, 2019

УДК 614.841.42

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА

Т.С. Станкевич, канд. техн. наук; ResearcherID: [O-7418-2017](https://orcid.org/0000-0002-8707-7187)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8707-7187>

Калининградский государственный технический университет, Советский просп., д. 1,
г. Калининград, Россия, 236022; e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Аннотация. Лесной фонд России, являясь достоянием народа и федеральной собственностью особого рода, требует устойчивого управления на национальном уровне. Один из ключевых принципов управления лесами – это обеспечение охраны и защиты лесов от угроз, в первую очередь от лесных пожаров. Хотя лесные пожары являются естественным компонентом лесных экосистем и не могут быть полностью устранены, в настоящее время выявлено снижение регулирующей функции лесного пожара и рост деструктивной. Понимание взаимосвязей факторов природной среды и динамики развития лесного пожара необходимо для разработки эффективных и научно обоснованных планов обеспечения безопасности лесов. Основной целью исследования является повышение эффективности формирования оперативного прогноза лесного пожара в сложных реальных условиях (при нестационарности и неопределенности). Проанализированы статистические данные о лесных пожарах в США, Канаде, России и пяти южных государствах – членах Европейского союза (Португалии, Испании, Франции, Италии и Греции) и подтвержден вывод об увеличении частоты возникновения крупных лесных пожаров. Представлены наиболее широко применяемые на практике модели прогнозирования динамики лесных пожаров (Van Wagner, Rothermel, Finney, Cruz и др.) и их компьютерные реализации (Prometheus, FlamMap, FARSITE, VISUAL-SEVEIF, WILDFIRE ANALYST). Предложена интеллектуальная система, предназначенная для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN. Описана структура данной системы, включающая три основных подсистемы: информационную, интеллектуальную и пользовательского интерфейса. Ключевой элемент интеллектуальной подсистемы – это модель распространения лесных пожаров, которая распознает данные из последовательных изображений, прогнозирует динамику развития лесного пожара и генерирует изображение с прогнозом его распространения. Описана схема предлагаемой модели, включающая следующие этапы: ввод входных данных; предобработка входных данных; распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей; прогнозирование динамики развития лесного пожара; вывод оперативного прогноза. Подробно представлены особенности реализации этапа «распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей»: размер ядра для каждого сверточного слоя 3×3, функция активации ReLu(x), фильтр в слоях пулинга 2×2 с шагом 2, метод пулинга – max-pooling, на выходе сетей – методы Object recognition и Semantic segmentation.

Для цитирования: Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-37-00035 «мол_а».

Ключевые слова: лес, лесной пожар, оперативный прогноз, неопределенность, нестационарность, сверточные нейронные сети, интеллектуальная система.

Введение

Понятие «лес» в Лесном кодексе Российской Федерации (РФ) имеет два значения: с одной стороны [8], лес – это один из важнейших возобновляемых природных ресурсов страны, реализующий удовлетворение потребностей общества при условии обеспечения многоцелевого, рационального, непрерывного, неистощительного его использования, с другой – это естественные экологические системы, реализующие средообразующие и средозащитные функции. При этом лесной фонд страны, как выполняющий критически важную и разностороннюю роль для населения, что указано в нормах действующего российского законодательства [7, 8], подлежит охране и требует обеспечения устойчивого развития и рационального использования.

Россия, являясь страной-участницей Монреальского процесса [10], реализует политику по сохранению и устойчивому управлению бореальными лесами и лесами умеренного пояса. Для оценки и анализа национальных трендов в области устойчивого управления лесами в России применяется ряд критериев и соответствующих им индикаторов – количественных и качественных характеристик оценки степени выполнения указных критериев. При этом устойчивое управление лесами включает в себя задачу обеспечения охраны и защиты лесов от широкого перечня угроз, в том числе и от лесных пожаров.

Согласно законодательству РФ [1, 2], под лесным пожаром понимается неконтролируемое горение, развивающееся во времени и пространстве и распространяющееся по лесной площади. Лесные пожары представляют собой неконтролируемое движение огня по территории леса и относятся к наиболее разрушительным стихийным бедствиям [43].

Как указано в [25], на земном шаре в течение последних двух столетий около 6 млн км² лесов погибли по различным причинам, основная из них – лесные пожары, которые являются естественным компонентом лесных экосистем и не могут быть полностью устранены [24].

В последние десятилетия во всем мире лесные пожары из эффективного эволюционно-экологического фактора, регулирующего структуру и динамику лесов, превращаются в катастрофическое явление, приносящее значительный ущерб [20]. Так, авторы [23] указывают, что в случае продолжения процесса изменения климата в соответствии с прогнозом возрастет частота появления крупных лесных пожаров. При этом, как считают ученые, увеличение частоты возникновения этих пожаров повлечет за собой рост ежегодных затрат на обеспечение пожарной безопасности лесов и борьбу с пожарами. Исследователи [32] отмечают, что частота лесных пожаров значительно возросла во всем мире за последние десятилетия. Кроме того, ученые [31] утверждают, что лесные пожары становятся все более распространенными, отчасти из-за глобального потепления. Как отмечено в работе [31], летние периоды стали жарче и суше, чем раньше, ветры усиливаются и стабильность дождливых периодов нарушается, но прежде всего эти изменения являются результатом влияния человеческого фактора.

Статистические данные Рослесхоза [5], EFFIS [26], US Wildfires [45] и National Forestry Database [30], представленные в табл. 1, 2, подтверждают сформулированные выше выводы. Как видно из табл. 1, с 2009 по 2018 г. площадь лесных земель, пострадавших в результате лесных пожаров, в РФ увеличилась приблизительно в 3 раза. В тот же период зарегистрировано снижение количества пожаров на территории России более чем на 50 % (табл. 2).

Согласно табл. 1 и 2, общероссийский тренд соответствует ситуации, сложившейся в США, Европе и Канаде: в США с 2009 по 2018 г. площадь земель, уничтоженных в результате лесных пожаров, увеличилась примерно в 1,5 раза, а их количество с 2000 по 2018 г. сократилось в 1,7 раза; в странах Европейского Союза (ЕС) (Португалия, Испания, Франция, Италия и Греция) с 2009 по 2018 г. площадь уничтоженных земель выросла в 2,7 раза, а их количество с 1992 по 2017 г. снизилось в 2 раза; в Канаде с 2009 по 2018 г. площадь лесных пожаров возросла в 2,9 раза, а их количество с 1992 по 2018 г. сократилось в 1,3 раза.

Таблица 1

Площадь лесных земель (га), уничтоженная пожарами с 2009 по 2018 г.

Год	РФ [5]	США [45]	Канада [30]	ЕС* [26]
2009	2 565 765	2 393 643	775 025	333 207
2010	1 962 333	1 385 167	3 052 473	253 664
2011	1 367 467	3 525 365	2 428 798	286 522
2012	2 054 025	3 731 865	2 003 270	535 694
2013	1 158 024	1 743 052	4 210 137	291 101
2014	3 190 697	1 451 834	4 563 327	136 114
2015	2 748 920	4 097 502	3 861 647	227 410
2016	2 508 264	2 204 128	1 416 034	317 989
2017	3 282 089	3 958 255	3 419 856	895 738
2018	7 408 409	3 473 259	2 272 274	109 808

*Здесь и далее, в табл. 2: Португалия, Испания, Франция, Италия, Греция.

Согласно [11, 26], социальный ущерб от лесных пожаров также значителен. Так, на территории РФ от лесных пожаров в период с 2016 по 2018 г. погибло 14 человек, 31 человек пострадал при тушении лесных пожаров; в пяти южных государствах – членах ЕС (Португалии, Испании, Франции, Италии и Греции) с 2016 по 2017 г. погибло 88 человек, при тушении пострадало 84 человека.

Хотя возникновение и развитие лесных пожаров обусловлено региональными метеорологическими и климатическими особенностями и типом региональной лесной растительности, в настоящее время глобальная статистика лесных пожаров позволяет проследить тенденцию к сокращению количества пожаров при параллельном росте ущерба. Таким образом, вывод исследователей об увеличении частоты возникновения крупных лесных пожаров, озвученный в статьях [20, 23, 31, 32], подтверждается.

Хотя усилия по предотвращению лесных пожаров являются основной задачей охраны и защиты лесов и играют критически важную роль в устойчивом управлении лесным фондом [35], необходимо иметь инструменты по подготовке эффективных управленческих решений, направленных на сдерживание уже начавшегося пожара [36]. Понимание взаимосвязей основополагающих факторов природной среды и пространственного поведения лесного пожара имеет решающее значение для разработки эффективных и научно обоснованных планов борьбы с лесными пожарами.

Таблица 2

Число случаев лесных пожаров с 1992 по 2018 г.

Год	РФ [5]	США [45]	Канада [30]	ЕС* [26]
1992	25 777	–	9 068	52 134
1993	18 428	–	6 043	51 942
1994	20 287	–	9 763	57 215
1995	25 951	–	8 486	75 322
1996	32 834	–	6 349	62 399
1997	31 300	–	6 148	67 707
1998	26 663	–	10 723	74 793
1999	36 673	–	7 633	57 092
2000	22 421	92 250	5 349	74 006
2001	23 700	83 996	7 753	60 058
2002	43 418	73 423	7 861	56 256
2003	33 050	63 269	8 230	62 983
2004	27 171	65 878	6 680	55 217
2005	19 249	66 546	7 542	75 382
2006	32 524	96 326	9 820	47 942
2007	17 812	85 583	6 917	45 644
2008	26 285	76 753	6 278	36 235
2009	23 245	79 513	7 210	53 047
2010	34 812	71 839	7 291	43 583
2011	21 074	74 126	4 723	55 926
2012	20 238	67 265	7 956	52 595
2013	9 991	46 615	6 264	35 938
2014	16 865	63 345	5 158	23 425
2015	12 337	61 922	7 140	38 171
2016	11 025	65 575	5 203	31 933
2017	10 922	66 131	5 652	48 136
2018	12 125	55 911	7 067	26 434

Цель исследования – повышение эффективности формирования оперативного прогноза лесного пожара в условиях нестационарности и неопределенности. Для этого предложено разработать интеллектуальную систему, предназначенную для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN.

Объекты и методы исследования

Лесные пожары, как указано в [44], являются результатом взаимодействия различных элементов социально-экономического, политического и культурного характера, при этом масштаб и интенсивность пожаров определяют климатические факторы.

Прогнозирование возникновения и распространения лесных пожаров – ключевая проблема для разработки стратегий управления ими. Основные исследования ученых сосредоточены на построении моделей прогнозирования возникновения пожаров. В последнее десятилетие для этого активно используются современные информационные технологии. Для оценки вероятности возникновения лесных пожаров предлагается применять технологии географической информационной системы (ГИС) и дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) [17, 21, 42], а также искусственные нейронные сети [34], нечеткую логику [18] и адаптивную нейро-нечеткую систему логического вывода [19].

Однако необходимо иметь инструменты прогнозирования поведения лесного пожара в зависимости от факторов среды, что позволит принимать эффективные решения при борьбе с огнем. Понимание пространственных закономерностей распространения пожаров в сложных условиях (при неопределенности, нестационарности и ограниченности временных ресурсов) является ключевым для совершенствования управления лесной безопасностью, особенно в ситуации глобальных изменений климата.

К наиболее широко используемым моделям инициирования и распространения пожара относятся следующие: Van Wagner, 1977 [46]; Rothermel, 1991 [41]; Finney, 1998 [28]; Cruz, 2005 [22]. В последние годы ученые предлагают новые модели. Например, в работах [12, 38] рассматривается математическая модель распространения и воздействия поверхностных и кроновых лесных пожаров на базе 3-мерной многофазной физической модели. В публикации [4] описаны новые подходы к моделированию лесных пожаров и предложены новые способы их тушения, в [6] изучены процессы инициирования и пространственного распространения пожара в условиях многослойности и двухтемпературности для гористой местности. Особенности моделирования распространения лучистого теплового потока в случае лесного пожара при неоднородном рельефе местности исследованы в работе [9].

В последнее десятилетие широкое распространение получила интеграция моделей прогнозирования распространения лесного пожара в компьютерные системы для упрощения их использования в практической деятельности различных служб. К наиболее популярным компьютерным системам относятся: Prometheus [39]; FlamMap [29]; FARSITE [27]; VISUAL-SEVEIF [40] и WILDFIRE ANALYST [48].

Существующие традиционные модели прогнозирования лесного пожара имеют ряд существенных недостатков: ограниченную функциональность в условиях нестационарности и неопределенности; низкую точность прогноза; значительные временные и вычислительные затраты, что делает их малоприменимыми в условиях оперативного прогнозирования; возможность учета только ограниченного набора факторов окружающей среды [16], что обуславливает определенные ограничения при их применении.

Прорыв в области информационных технологий стал причиной активного использования элементов AI, Big Data и Deep machine learning для решения разнообразных задач и в области обеспечения пожарной безопасности. В работе

[16] обоснована возможность применения сверточных нейронных сетей CNN в качестве эффективного инструмента формирования оперативного прогноза пространственного распространения лесного пожара в реальных условиях (при неопределенности и нестационарности).

Результаты исследования и их обсуждение

Предложено разработать интеллектуальную систему прогнозирования динамики развития лесного пожара, состоящую из следующих подсистем: информационной, интеллектуальной и пользовательского интерфейса.

Для эффективного функционирования информационной подсистемы по выполнению задач сбора и хранения данных, вывода в удобном виде требуемых данных для пользователя и обмена данными между подсистемами системы построена база визуальных данных [15]. Визуальные данные получены следующим образом: данные о распространении пожара – через систему управления ресурсами FIRMS NASA [37], содержащую сведения от 36-канального спектрорадиометра с умеренным спектральным разрешением MODIS и 22-канального радиометра VIIRS; данные о характере лесных насаждений – из глобальной годовой карты Land Cover Map Европейского космического агентства European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) [33], построенной благодаря 15-канальному спектрометру со средним спектральным разрешением MERIS (с полным разрешением FR и уменьшенным разрешением RR), 6-канальному радиометру с высоким спектральным разрешением AVHRR, системе визуализации, работающей в четырех спектральных диапазонах (синем, красном, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном), SPOT-Vegetation на спутнике PROBA-V; данные о факторах окружающей среды (о температуре воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли, относительной влажности воздуха, скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли) – с использованием Ventusky InMeteo [47], применяющим основные глобальные и региональные метеорологические модели погоды (глобальные модели – ICON, GFS и GEM; региональные модели – ICON, HRRR и COSMO). Пример расчетных параметров приведен на рис. 1.

Планируется, что в процессе реализации подсистемы пользовательского интерфейса будет осуществляться взаимодействие между пользователем и элементами системы через диалоговые окна при решении управленческих задач, в процессе приобретения знаний и объяснения результатов.

Интеллектуальная подсистема – это рабочий модуль всей системы, содержащий соответствующую модель динамики развития лесного пожара и блок построения сетей CNN.

На рис. 2 представлена модель пространственного развития лесного пожара, включающая следующие этапы.

Ввод входных данных в виде изображений в формате JPEG.

Этап 1 – Предобработка входных данных.

Этап 2 – Распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей.

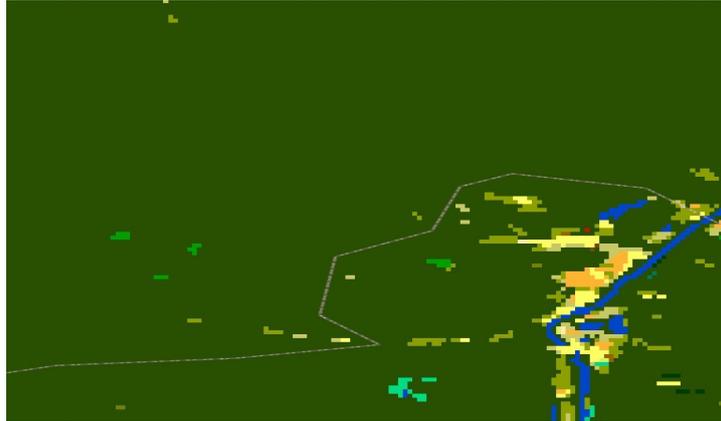
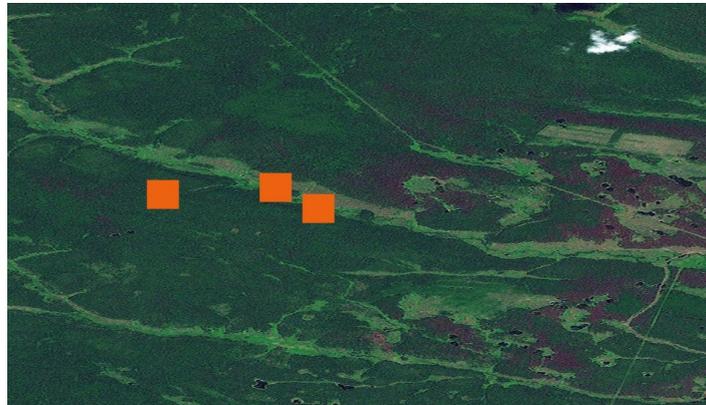
*a**б*

Рис. 1. Расчетные параметры прогнозирования динамики развития лесного пожара: *a* – данные о характере лесных насаждений из глобальной годовой карты Land Cover Map; *б* – данные о распространении лесного пожара через систему управления ресурсами FIRMS NASA (при температуре воздуха 5 °С на высоте 2 м над поверхностью земли, относительной влажности воздуха 70 % и скорости ветра 4 м/с на высоте 10 м над поверхностью земли)

Fig. 1. Calculated parameters for forecasting the forest fire dynamics: *a* – data on the nature of forest plantations from the annual global Land Cover Map; *б* – data on the spread of forest fire through the NASA's Fire Information for Resource Management System (at an air temperature of 5 °C and 2 m above the ground, relative humidity of 70 % and wind speed of 4 m/s at 10 m above the ground)

2.1. Распознавание данных о пожаре: на вход подается преобработанное цветное 3-канальное изображение разрешением 400×400 пикселей. Сверточная нейронная сеть для распознавания объектов на изображении (данных о лесном пожаре) содержит вход, сверточные слои, слои пулинга, полносвязные слои, выход. При этом размер ядра для каждого сверточного слоя равен 3×3, а в качестве функции активации применена функция ReLu(x). В слоях пулинга использован фильтр 2×2 с шагом 2, в качестве метода пулинга выбран метод max-pooling. На выходе сверточной нейронной сети использован метод Object recognition.

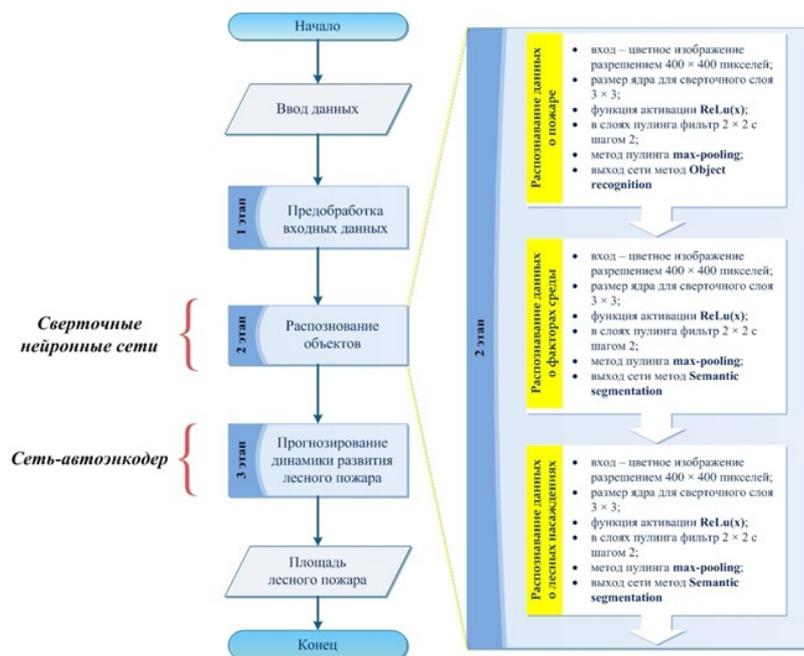


Рис. 2. Блок-схема прогнозирования динамики развития лесного пожара с использованием сверточных нейронных сетей и сети-автоэнкодера

Fig. 2. Flowchart of forecasting the forest fire dynamics using convolutional neural networks and an autoencoder

В сверточных слоях выполняется операция свертки, где на вход подается изображение, а вывод представляет собой карту признаков. Выбор функции $\text{ReLU}(x)$ в сверточных слоях обусловлен тем, что функция $\text{ReLU}(x)$ устраняет проблему крайне малого градиента при больших значениях x , увеличивает разреженность значений у внутренних слоев сети для обеспечения нелинейности. Слои пулинга выполняют операцию уменьшения размера карты признаков и ориентированы на поиск более глобальных признаков в изображении. Выбор метода max-pooling в слоях пулинга обеспечивает ускорение сходимости во время обучения параметров сети. Полносвязная нейронная сеть типа персептрон используется для вывода результата распознавания объекта – лесного пожара. Метод обучения – метод обратного распространения ошибки, в качестве обучающего и тестового набора применены данные из визуальной базы данных [15].

2.2. Распознавание данных о факторах окружающей среды (температуре воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли, относительной влажности воздуха, скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли). Содержание пункта 2.2 соответствует пункту 2.1, однако цель распознавания – решение задачи определения цвета фона (а не объекта, как для описанной выше сверточной нейронной сети). Для этого разрабатывается сверточная нейронная сеть, схожая с сетью из пункта 2.1, но ее отличительной особенностью является использование на выходе сети *Semantic segmentation* вместо *Object recognition*. Предложено выполнить построение ансамбля из трех сверточных нейронных сетей. Первая сеть выполняет распознавание фона для оценки температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные

о температуре воздуха: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – светло-серый, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – светло-сиреневый, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – фиолетовый, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – темно-синий, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – синий, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – голубой, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – бирюзовый, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – зеленый, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – светло-зеленый, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – желтый, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – песочный, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – оранжевый, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – лиловый, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – темно-фиолетовый, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – темно-коричневый. Вторая сверточная нейронная сеть выполняет распознавание фона для оценки скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные о скорости воздуха следующий: 0 м/с – серо-синий, 2 м/с – сине-фиолетовый, 4 м/с – синий, 6 м/с – светло-синий, 18 м/с – бирюзовый, 10 м/с – травяной, 12 м/с – зеленый, 14 м/с – светло-зеленый, 18 м/с – желтый, 22 м/с – песочный, 26 м/с – оранжевый, 30 м/с – лиловый, 34 м/с – фиолетовый, 38 м/с – темно-фиолетовый, 42 м/с – темно-коричневый. Третья сверточная нейронная сеть осуществляет распознавание фона для оценки относительной влажности воздуха. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные об относительной влажности воздуха: хаки соответствует значению от 0 до 40 %; серый хаки – 50 %; серый – 60 %; серебряный – 70 %; светло-серый – 80 %; циркон – 90 %; белый – 100 %.

2.3. Распознавание данных о характере лесных насаждений: содержание пункта 2.3 аналогично содержанию пункта 2.2. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные о характере лесных насаждений: светло-желтый, оранжевый, светло-оранжевый, армейский хаки, светло-голубой, темно-коричневый, коричневый соответствуют траве, лугу; желтый, ярко-желтый – кустарникам; зеленый, ярко-зеленый – деревьям лиственным, лесу лиственному; темно-зеленый – деревьям вечнозеленым, лесу хвойному; травяной – деревьям лиственным и вечнозеленым, смешанному лесу.

Этап 3 – Прогнозирование динамики развития лесного пожара.

Формирование оперативного прогноза в условиях неопределенности и нестационарности в зависимости от влияния параметров среды. Для построения прогноза разработана сеть, сходная по структуре с сетью-автоэнкодером (искусственной нейронной сетью, обеспечивающей воспроизведение на выходе входных данных) и содержащая сверточные и разверточные слои. Используемый метод обучения – обучение без учителя, в качестве обучающего и тестового набора применены данные из визуальной базы данных [15].

Вывод сгенерированного изображения с оперативным прогнозом (карта местности с выделенной областью с координатами области распространения пожара во времени).

В ходе оценки экономической эффективности интеллектуальной системы, предназначенной для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN, использована методика [3]. Она направлена на сравнение затрат на разработку / приобретение предлагаемой системы с последующим ее обслуживанием и ущерба, наносимого лесным пожаром. Входные параметры и полученные результаты представлены в табл. 3.

Выполнена оценка только прямого ущерба, без учета косвенного ущерба от лесного пожара. Затраты на функционирование системы составили 5 % от стоимости разработки/приобретения программного продукта, а дополнительные затраты на эксплуатацию системы – 3 %, как рекомендовано в [13]. Для оценки затрат на устранение негативного воздействия на окружающую природную среду, согласно [14], применено значение показателя 5,5 тыс. р./га, а на ликви-

дацию последствий пожара путем восстановления качества окружающей природной среды – 156 тыс. р./га. Расчет стоимости сохраненных материальных ценностей в результате использования программного продукта выполнен с учетом уменьшения времени тушения верхового пожара на 1 ч, что позволит сократить площадь уничтоженного леса при скорости ветра 4 м/с примерно на 3,5 га (при начальном периметре пожара 400 м и времени от возникновения до его ликвидации 1 сут). Снижение временных затрат обусловлено высокой производительностью предварительно обученной системы, поскольку пользователь не расходует время на обучение сетей, а сразу выполняет прогнозирование.

Таблица 3

Результаты оценки экономической эффективности интеллектуальной системы построения оперативного прогноза лесного пожара

Параметр	Значение, тыс. р.
Общие затраты на разработку / приобретение и эксплуатацию программы с учетом круглосуточной работы в течение 1-го года	730
В том числе:	
на разработку / приобретение программного продукта	300
на приобретение необходимого для функционирования программы оборудования	50
на установку программы	0
на эксплуатацию программы	0
на содержание персонала по обслуживанию программы	300
на функционирование программы	50
дополнительные – на эксплуатацию программы	30
Социально-экономический ущерб от 1-го лесного пожара	80 750
В том числе:	
на ликвидацию последствий негативного воздействия на окружающую природную среду	2 750
на восстановление качества окружающей природной среды	78 000
Затраты на тушение 1-го лесного пожара	1 000
В том числе:	
на эвакуацию людей из зоны поражения	0
на проведение работ по локализации и ликвидации пожара	1 000
Социально-экономический ущерб из-за поражения людей опасными факторами пожара	0
Общая сумма ущерба от 1-го лесного пожара	83 290
Стоимость сохраненных материальных ценностей в результате использования программного продукта	1 000
Прибыль от применения программы в течение 1-го года	270
Экономическая эффективность внедрения системы, %	+37

Заключение

Таким образом, для решения управленческой задачи локализации и ликвидации лесного пожара в сложных условиях предложено разработать и внедрить интеллектуальную систему прогнозирования динамики развития лесного пожара, базирующуюся на применении элементов искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения (сверточных нейронных сетей).

Выполнено построение структурной схемы такой системы. Согласно представленной схеме, в состав интеллектуальной системы, предназначенной для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN, входят информационная подсистема, интеллектуальная подсистема и подсистема пользовательского интерфейса.

Информационная подсистема базируется на визуальной базе данных, в которой содержатся данные о распространении пожара, характере лесных насаждений и факторах окружающей среды. Подсистема пользовательского интерфейса реализует взаимодействие с программой. Интеллектуальная подсистема системы включает разработку модели распространения лесных пожаров, которая распознает данные из последовательных изображений, прогнозирует динамику развития лесного пожара и генерирует изображение с прогнозом распространения пожара. Описана схема предлагаемой модели, включающая следующие этапы: ввод входных данных; предобработка входных данных; распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей; прогнозирование динамики развития лесного пожара; вывод оперативного прогноза. Подробно представлены особенности реализации этапа «распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей»: размер ядра для каждого сверточного слоя 3×3 , функция активации $\text{ReLu}(x)$, фильтр в слоях пулинга 2×2 с шагом 2, метод пулинга max-pooling , на выходе сетей методы Object recognition и Semantic segmentation.

В качестве конечной продукции, которая будет производиться с применением результатов научного исследования, рассматривается интеллектуальная система прогнозирования динамики развития лесного пожара. Она будет использоваться для предварительного планирования организации тактики тушения лесного пожара и в процессе координации действий соответствующих подразделений при тушении лесного пожара в режиме реального времени. Предусматривается возможность применения программного продукта в научных и образовательных целях.

В настоящее время планируются дополнительная настройка входящих в состав модели искусственных нейронных сетей и подача заявки на государственную регистрацию программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ГОСТ 17.6.1.01–83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения: дата введения 1985–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 6 с. [*State Standard. GOST 17.6.1.01–83. Nature Protection. Forest Protection and Preservation. Terms and Definitions.* Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002, 6 p.]
2. ГОСТ 12.3.046–91. Система стандартов безопасности труда. Установки пожаротушения автоматические. Общие технические требования: дата введения 1993–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с. [*State Standard. GOST 12.3.046–91. Occupational Safety Standards System. Automatic Fire Fighting Systems. General Technical Requirements.* Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 4 p.]
3. ГОСТ Р ИСО / МЭК 9126–93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению: дата введения 1994–07–01. М.: Изд-во стандартов, 2004. 10 с. [*State Standard RF ISO/IEC. GOST R ISO/IEC 9126–93. Information Technology. Software Product Evaluation. Quality Characteristics and Guidelines for Their Use.* Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2004. 10 p.]
4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1992. 405 с. [Grishin A.M. *Math-*

emational Modeling of Forest Fires and New Fire Fighting Techniques. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 405 p.].

5. ЕМИСС. Режим доступа: <https://fedstat.ru> (дата обращения: 06.11.19). [*Website of the Unified Interdepartmental Statistical Information System (UISIS)*].

6. Катаева Л.Ю. Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2009. 328 с. [Katayeva L.Yu. *Analysis of Dynamic Processes of Natural and Technogenic Emergency Situations*: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss. Nizhny Novgorod, 2009. 328 p.].

7. Конституция Российской Федерации: от 12.12.1993 г. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/ (дата обращения: 06.11.19). [*Constitution of the Russian Federation Dated December 12, 1993*].

8. Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ: принят Гос. Думой 08.11.2006 г. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения: 06.11.19). [*Forest Code of the Russian Federation Dated December 4, 2006: the Federal Law No. 200-FZ*].

9. Масленников Д.А. Особенности математического моделирования распространения лучистого теплового потока от очага горения при лесных пожарах на неоднородном рельефе: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2012. 109 с. [Maslennikov D.A. *Features of Mathematical Modeling of Radiant Heat Flux Propagation from Burning Source in Case of Forest Fires on Heterogeneous Relief*: Cand. Phys.-Math. Sci. Diss. Nizhny Novgorod, 2012. 109 p.].

10. Национальный доклад Российской Федерации по критериям и индикаторам сохранения и устойчивого управления умеренными и бореальными лесами (Монреальский процесс 2003 г.) // The Montreal Process. Режим доступа: https://www.montreal-process.org/documents/publications/general/2003/RussiaR/main.html#_Toc45611963 (дата обращения: 06.11.19). [*Russia's Report on the Montreal Process. Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests*. 2003].

11. Ответ Федерального агентства лесного хозяйства № НК-09-50/8211 от 13.05.2019 г. [*The Answer of the Federal Agency for Forestry No. NK-09-50/8211 Dated May 13, 2019*].

12. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2010. 282 с. [Perminov V.A. *Mathematical Modeling of the Occurrence of Crown and Large Forest Fires*: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss. Tomsk, 2010. 282 p.].

13. Поддубный А. Расчет экономического эффекта от внедрения системы автоматизации // Antegra consulting. Режим доступа: http://www.antegra.ru/news/experts/_det-experts/4/ (дата обращения: 06.11.19). [Poddubnyy A. Calculation of the Economic Effect from the Automation System Implementation. *Antegra Consulting*].

14. Порфирьев Б. Пожар по приказу // Эксперт. 2019. № 34(1130). Режим доступа: <https://expert.ru/expert/2019/34/pozhar-po-prikazu/> (дата обращения: 06.11.19). [Porfiriev B.N. Fire by Order. *Ekspert* [Expert], no. 34(1130)].

15. Свидетельство о регистрации базы данных «Лесные пожары» № 2019620918 от 30.05.2019 г. / Станкевич Т.С. № 2019620843: заявл. 13.05.2019: опубл. 30.05.2019 [Stankevich T.S. *Forest Fires*. Certificate of State Registration of the Database No. RU2019620918, 2019].

16. Станкевич Т.С. Применение сверточных нейронных сетей для решения задачи оперативного прогнозирования динамики распространения лесных пожаров // Бизнес-информатика. 2018. № 4(46). С. 17–27. [Stankevich T.S. The Use of Convolutional Neural Networks to Forecast the Dynamics of Spreading Forest Fires in Real Time. *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2018, vol. 4(46), pp. 17–27]. DOI: [10.17323/1998-0663.2018.4.17.27](https://doi.org/10.17323/1998-0663.2018.4.17.27)

17. Adab H., Kanniah K.D., Solaimani K. Modeling Forest Fire Risk in the North-east of Iran Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Natural Hazards*, 2013, vol. 65, pp. 1723–1743. DOI: [10.1007/s11069-012-0450-8](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8)
18. Agarwal P.K., Patil P.K., Mehal R. A Methodology for Ranking Road Safety Hazardous Locations Using Analytical Hierarchy Process. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2013, vol. 104, pp. 1030–1037. DOI: [10.1016/j.sbspro.2013.11.198](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.198)
19. Angayarkkani K., Radhakrishnan N. An Effective Technique to Detect Forest Fire Region through ANFIS with Spatial Data. *3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, April 8–10, 2011*. Kanyakumari, India, IEEE, 2011, pp. 24–30. DOI: [10.1109/ICECTECH.2011.5941794](https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941794)
20. Byram G.M. Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire: Control and Use*. Ed. by K.P. Davis. New York, McGraw-Hill, 1959, pp. 61–89.
21. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebra M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. et al. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58.
22. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Development and Testing of Models for Predicting Crown Fire Rate of Spread in Conifer Forest Stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 7, pp. 1626–1639. DOI: [10.1139/x05-085](https://doi.org/10.1139/x05-085)
23. Davis R., Yang Z., Yost A., Belongie C., Cohen W. The Normal Fire Environment – Modeling Environmental Suitability for Large Forest Wildfires Using Past, Present, and Future Climate Normals. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 390, pp. 173–186. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.01.027](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.027)
24. Dimopoulou M., Giannikos I. Spatial Optimization of Resources Deployment for Forest Fire Management. *International Transactions in Operational Research*, 2001, vol. 8, iss. 5, pp. 523–534. DOI: [10.1111/1475-3995.00330](https://doi.org/10.1111/1475-3995.00330)
25. Dimopoulou M., Giannikos I. Towards an Integrated Framework for Forest Fire Control. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 152, iss. 2, pp. 476–486. DOI: [10.1016/S0377-2217\(03\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00038-9)
26. *European Forest Fire Information System (EFFIS)*. Available at: <http://effis.jrc.ec.europa.eu> (accessed 06.11.19).
27. *FARSITE. Fire Area Simulator*. Available at: <https://www.firelab.org/project/farsite> (accessed 06.11.19).
28. Finney M.A. *FARSITE: Fire Area Simulator – Model Development and Evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4. Ogden, UT, Rocky Mountain Research Station, 1998. 47 p. DOI: [10.2737/RMRS-RP-4](https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4)
29. *FlamMap. Fire Analysis Desktop Application*. Available at: <https://www.firelab.org/project/flammap> (accessed 06.11.19).
30. Forest Fires Data. *National Forestry Database*. Available at: <http://nfdp.ccfm.org/en/data/fires.php#tab311> (accessed 06.11.19).
31. Gigović L., Pourghasemi H.R., Drobnjak S., Bai S. Testing a New Ensemble Model Based on SVM and Random Forest in Forest Fire Susceptibility Assessment and Its Mapping in Serbia's Tara National Park. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 5, art. 408. DOI: [10.3390/f10050408](https://doi.org/10.3390/f10050408)
32. Guo F., Selvaraj S., Lin F., Wang G., Wang W., Su Z., Liu A. Geospatial Information on Geographical and Human Factors Improved Anthropogenic Fire Occurrence Modeling in the Chinese Boreal Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 582–594. DOI: [10.1139/cjfr-2015-0373](https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0373)
33. *Land Cover Map ESA/CCI*. Available at: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/> (accessed 06.11.19).
34. Maeda E.E., Formaggio A.R., Shimabukuro Y.E., Arcoverde G.F.B, Hansen M.C. Predicting Forest Fire in the Brazilian Amazon Using MODIS Imagery and Artificial Neural

Networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, vol. 11, iss. 4, pp. 265–272. DOI: [10.1016/j.jag.2009.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.03.003)

35. Martínez J., Vega-García C., Chuvieco E. Human-Caused Wildfire Risk Rating for Prevention Planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90(2), pp. 1241–1252. DOI: [10.1016/j.jenvman.2008.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005)

36. Mavsar R., Cabán A.G., Varela E. The State of Development of Fire Management Decision Support Systems in America and Europe. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 29, pp. 45–55. DOI: [10.1016/j.forpol.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.009)

37. NASA's Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Available at: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#z:3.0;c:44.286,17.596> (accessed 06.11.19).

38. Perminov V., Goudov A. Mathematical Modeling of Forest Fires Initiation, Spread and Impact on Environment. *International Journal of GEOMATE*, 2017, vol. 13, iss. 35, pp. 93–99. DOI: [10.21660/2017.35.6704](https://doi.org/10.21660/2017.35.6704)

39. Prometheus. Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Available at: http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview_e.php (accessed 06.11.19).

40. Rodríguez y Silva F., Martínez J.R.M., Machuca M.Á.H., Leal J.M.R. VISUAL-SEVEIF, a Tool for Integrating the Behavior Simulation and Economic Evaluation of the Impacts of Wildfires. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires*. General Technical Report 245. Albany, CA, USDA, 2013, pp. 163–178. DOI: [10.2737/PSW-GTR-245](https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-245)

41. Rothermel R.C. *Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains*. Research Paper INT-438. Ogden, UT, Intermountain Forest Experiment Station, 1991. 46 p. DOI: [10.2737/INT-RP-438](https://doi.org/10.2737/INT-RP-438)

42. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. *Applied Mathematical Sciences*, 2013, vol. 7, no. 5-8, pp. 271–286. DOI: [10.12988/ams.2013.13025](https://doi.org/10.12988/ams.2013.13025)

43. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1645–1658. DOI: [10.1080/19475705.2015.1084541](https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541)

44. Sánchez J. *Los incendios forestales y las prioridades de investigación en México*. Tomo II. México, Congreso Forestal Mexicano, 1989, pp. 719–723.

45. US Wildfires. NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI). Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov> (accessed 06.11.19).

46. Van Wagner C.E. Conditions for the Start and Spread of Crown Fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, vol. 7, no. 1, pp. 23–34. DOI: [10.1139/x77-004](https://doi.org/10.1139/x77-004)

47. Ventusky Application. InMeteo. Available at: <https://www.ventusky.com> (accessed 06.11.19).

48. *Wildfire Analyst Software*. Available at: <https://www.wildfireanalyst.com/> (accessed 06.11.19).

FORECASTING THE SPATIAL BEHAVIOR OF A FOREST FIRE AT UNCERTAINTY AND INSTABILITY OF THE PROCESS

Tatiana S. Stankevich, Candidate of Engineering; ResearcherID: [O-7418-2017](https://orcid.org/0000-0002-8707-7187).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8707-7187>

Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prosp., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation; e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Abstract. The Russian forest fund, being a public domain of the people and a special kind of federal property, requires sustainable management at the national level. One of the key principles of forest management is to ensure that forests are conserved and protected against a wide range of threats, primarily forest fires. Although forest fires are a natural component of forest ecosystems and cannot be completely eliminated, researchers have currently revealed

a decrease in the regulatory function and an increase in the destructive function of forest fires. Understanding the interrelations between the environmental factors and forest fire history is necessary for the development of effective and scientifically sound forest safety plans. The main purpose of the study is to increase the efficiency of the formation of an operational forecast of a forest fire in difficult conditions of a real fire (at instability and uncertainty). The author analyzed statistical data on forest fires the USA, Canada, Russia and the five southern European Union member states (Portugal, Spain, France, Italy and Greece) and confirmed the conclusion on the increase in the frequency of large forest fires. The most widely used in practice forecasting models of forest fire dynamics (Van Wagner, Rothermel, Finney, Cruz, etc.) and their computer implementations (Prometheus, FlamMap, FARSITE, VISUAL-SEVEIF, WILDFIRE ANALYST) are presented in the article. It is proposed to develop an intelligent system designed to create an operational forecast of a forest fire using convolutional neural networks (CNN). The structure of this system is described. It includes three main subsystems: information, intelligent and user interface. A key element of the intelligent subsystem is a forest fire propagation model, which recognizes data from sequential images, predicts the forest fire dynamics, and generates an image with a fire spread forecast. The scheme of the proposed model is described. It includes the following stages: data input; preprocessing of input data; recognition of objects using CNNs; forecasting the forest fire dynamics; output of operational forecast. The implementation features of the stage “recognition of objects using CNNs” are presented in detail: core size for each convolutional layer 3×3, activation function ReLu(x), filter in 2×2 pooling layers with step 2, max-pooling method, Object recognition and Semantic segmentation methods at the networks output.

For citation: Stankevich T.S. Forecasting the Spatial Behavior of a Forest Fire at Uncertainty and Instability of the Process. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-37-00035 mol_a.

Keywords: forest, forest fire, operational forecast, uncertainty, instability, convolutional neural networks, intelligent system.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 06.11.19 / Received on November 6, 2019

УДК 630*228.7

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-35-45

PRODUCTIVITY OF FOREST PLANTATION CROPS**Vera A. Savchenkova¹, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;** *ResearcherID:* [Y-3167-2019](https://orcid.org/0000-0001-8593-7887),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8593-7887>**Sergey B. Vasilyev², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;** *ResearcherID:* [C-7390-2017](https://orcid.org/0000-0003-4063-7041),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4063-7041>**Vladimir F. Nikitin², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;** *ResearcherID:* [ABE-5889-](https://orcid.org/0000-0002-0861-5718)[2020](https://orcid.org/0000-0002-0861-5718), *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0861-5718>**Petr A. Aksenov², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;** *ResearcherID:* [H-1352-2019](https://orcid.org/0000-0002-1716-7726),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1716-7726>¹All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow region, 141200, Russian Federation; e-mail: v9651658826@yandex.ru²Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytischki, Moscow region, 141005, Russian Federation; e-mail: svasilyev@mgul.ac.ru, axenov.pa@mail.ru, forestmaster@yandex.ru

Abstract. Reduction of time for commercial wood cultivation and increasing the productivity of plantations is an urgent direction of scientific research considering supply of forest resources in the country and the growing need for timber. One of the ways of intensive forest reproduction is the creation of forest plantation crops. Plantation of forest crops involves the cultivation of technically valuable tree species in a shorter period of time. Our country has experience in the creation of forest plantation crops, but due to the reorganization in the forest industry, many areas were left without proper care. However, for 34 years research scientists at the Mytischki Branch of the Bauman Moscow State Technical University (formerly Moscow State Forest University) have been systematically monitoring the growth and development of spruce forest crops created in 1984 with intermediate agricultural use between the rows. The method of creating test crops is aimed at providing the most favorable conditions for growth and development of the main tree species in the first years after planting, the use of the natural growth of plantations during the entire period of crops cultivation, cost optimization for frequent silvicultural care, obtaining stands with high economic and aesthetic properties, prevention of wood defects. The article presents the technology of creating spruce crops, which is a distinctive feature of this method. We analyzed changes in the diameters and heights of trees grown by creating forest crops in the traditional way and with the use of intermediate agricultural use between the rows. The reliability of differences in the average values of independent samples was assessed, confirming the advantage of the spruce test crops. Their species composition is 100 % spruce, the absolute taper of which is 2.13 times less than those created by the traditional method. A higher probability of obtaining trunks with a volume of more than 0.02 m³ by creating test crops has been established. The results of statistical processing of experimental data indicate the prospects of the method of planting spruce forest crops with intermediate agricultural use between the rows, which contributes to the formation of high-quality stands.

For citation: Savchenkova V.A., Vasilyev S.B., Nikitin V.F., Aksenov P.A. Productivity of Forest Plantation Crops. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 35–45. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-35-45

Keywords: plantation of forest crops, intermediate agricultural use, forest crops, productivity.

Introduction

For reliable development of forest plantations with preservation of forest functions, it is necessary to address the issue of their reproduction in all areas of felled and dead trees, and therefore a reasonable choice of method of reforestation is required. The country's forests are heterogeneous not only in terms of forest-growing features, but also in terms of national economic significance. In this regard, a template approach is not allowed when deciding on a reforestation method. The creation of forest crops is possible on the basis of the organization of science-based technology of artificial reforestation. Forest crops created for the accelerated production of round timber are of particular interest all over the world [14–21].

The topic of relevance of agricultural use on forest lands was discussed at the 12th Forest World Congress held in Quebec (Canada) in September 2003. Productivity Commissioner in Australia Neil Byron noted the need for an integrated approach to reforestation, creation of plantations of forest crops, protection of biological diversity of aesthetic values, as well as environmentally conscious consumption. Rodney Keenan, spokesman of the Australian National University, noted the importance of forest plantations in Australia and the need to develop them on agricultural lands.

Plantation of forest crops involves the cultivation of technically valuable tree species in a short time. In this regard, the management of intermediate agricultural use in reproduction of forests can have a positive effect [7, 8, 10]. Continuous tillage of cuttings, which is preceded by uprooting stumps, is not widespread due to its high cost, the study of which is the task of the next stage of our research. However, many scientists have highlighted the high importance of using forest land for agricultural use, not only to obtain additional products for various purposes, but also to solve environmental problems by increasing the productivity and biological diversity of forest phytocenoses, zoocenoses, conservation and improvement of forest soils [2–5, 11–13].

It is also mentioned that the Forest code of the Russian Federation defines the creation of forest plantations of target species, referred to as forest plantations, as entrepreneurial activity. The current trend of intensification of forest use in Russia includes meeting the needs of the forest industry and aims to increase the economic impact of forest use [1, 9]. This causes mixed reviews from forestry experts and prevents investment in the creation of forest plantations of target species.

Until 1995, Russian foresters laid out 35 ths ha of plantation crops [6], but due to the reorganization of the forest industry, many areas were left without proper care. Most of the forest crops became low-quality and mixed, some of them died. However, in the areas created in 1984 plantation crops technology of planting and care was carried out in full volume and until now they are monitored.

Objects and methods of research

Given the uneven supply of forest resources in the country and the growing demand for commercial timber, there is a need to reduce the time of its cultivation. In this regard, the issue of the method of laying out forest crops is relevant.

The research purpose at the intermediate stage is a comparative assessment of growth and taperness rates, of single-age stands created by the method of intermediate agricultural use between the rows of forest crops (hereinafter – test crops) and the traditional method of planting in the bottom of the furrow (hereinafter – typical crops).

Monitoring the development of the created forest crops was carried out by forming 105 test areas measuring 16 m (length) by 30 m (width) and measuring the diameters of the trunk lower part of each tree growing on the test area: at the root collar, at a height of 0.5 m, 1.0 m, 1.3 m, 1.5 m, 2.0 m. The planting distance between seedlings was 0.75 m. The distance between the rows was 4 m. The altimeter was used to determine their height. Statistical data processing was performed.

During the study of test and typical spruce crops at the age of 34, the sample size of the trees selected for the survey was 11.6 %. Many times repeated indicators of the diameter of the tree at the root collar were grouped.

In the course of studying the project documentation and description of the experiment on laying out forest crops in 1984, it was found that in the studied forest areas before the continuous felling grew spruce (*Picea tumoxalidosum*), the species composition of which was represented by 5 aspens, 3 birches and 2 spruces (5A3B2S) with a single admixture of English oak (*Quercus robur* L.) and Norway maple (*Acer platanoides* L.). The plantation had the following valuation characteristics: I quality class, 70 years old, and 320 m³/ha stockpile. Renewal of the predominant species European spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) (hereinafter – spruce) under the canopy of the plantings was unsatisfactory (0.8 ths pcs/ha).

The growing conditions of the studied forest areas correspond to the category C2 – fresh relatively rich soil, sod-medium podzolic, medium loam on the cover loam. Mineralization of the studied areas is more than 70 %. Rush family-reedgrass type of cutting with intensive development of grassy vegetation represented by the wood sorrel (*Oxalis acetosella* L.), hairy wood-rush (*Luzula pilosa*), ground-ivy (*Glechoma hederacea* L.), unspotted lungwort (*Pulmonaria obscura* Dumort.), squinancywort (*Asperula cynanchina* L.), snowdrop anemone (*Anemone silvestris* L.), and green mosses (*Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst, *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp, *Pleurozium schraiberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.). Development of natural plantings with prevalence of low-value deciduous species of aspen and alder is found. The undergrowth is represented by common hazel (*Corylus avellana* L.), rough spindle tree (*Euonymus verrucosa* Scop.), red elderberry (*Sambucus racemosa*), and occasionally by mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.).

In the course of the research, the technology of creating forest crops by the considered method was studied. The strips with a width of 20 m were uprooted. Determining the direction of placement of furrows was aimed at improving the conditions of cultivated spruce and thus selected from west to east. Strips were left along the perimeter of the studied areas with a width from 10 to 15 m for natural overgrowth, on the area of which uprooted stumps and felling residues were stored by uniform placement and in shafts with simultaneous mineralization of the soil (up to 80 %). Taking into account the requirements of forest fire safety rules, the width of the swaths was 3 m and the height was up to 1 m (fig. 1).

Work on uprooting the strips was carried out by the stump remover-gatherer D-513 on the basis of the tractor T-130. The aim was to preserve the upper soil horizons as much as possible. At the same time, the need for subsequent surface planning was taken into account. Therefore, the uprooting was carried out from the center of the rooted strips towards the belt of trees left for natural overgrowth. The stumps were shaken to ensure maximum preservation of the fertile soil layer in the area of rooted 20-meter strips.

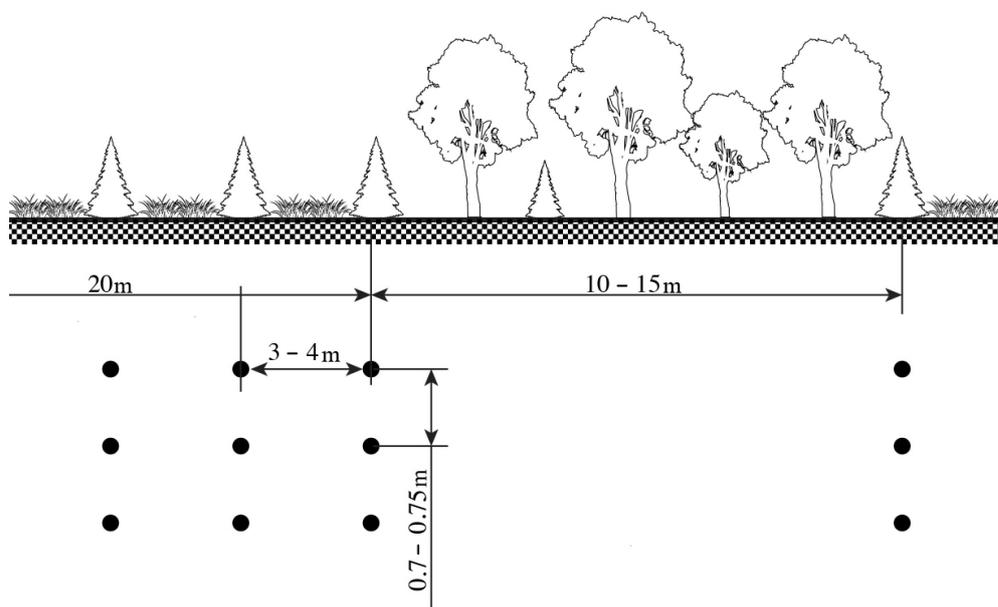


Fig. 1. Scheme of creation of spruce crops with intermediate agricultural use between the rows

For the purposes of the experiment at processing of the specified strips in one case at soil processing by the plow PN-4-35 the was turned to a depth of 25 cm and the harrow BDT-2,2 disking was twice carried out. In the other case, soil preparation was carried out without turning the layer, but with two-fold disking. In the third case – only two-fold disking was carried out.

Planting of 5-year-old spruce seedlings (2-year-old seedlings were grown at the School Department) was carried out by the planting machine MDR-1 with a planting step of 70–75 cm. On the area between the rows of planted spruce, the distance from 3 to 4 m was observed and for two years agricultural crops (were grown on it oats, potatoes, clover, oatmeal and peas) with the introduction of fertilizers provided by the agricultural technology. A distance of 50 cm, free of vegetation, was maintained between the created spruce crops and agricultural crops (fig. 2).



Fig. 2. Growing oats between the rows of forest crops

In the areas of the reproduced crops without cultivation of agricultural plants between the rows for 3 years as the planting places were overgrown with herbaceous vegetation, agrotechnical tending with cultivator KLB-1,7 was carried out. In addition, silvicultural care was carried out in young stands.

Results and discussion

Tables 1 and 2 show the most typical indicators for the test areas. Trees with the same diameter at the root collar were grouped. Deviations within the group were 0.1–0.4 cm. The number of trees in the group ranged from 94 to 106.

Table 1

Changes in the diameter of spruce in typical crops

Indicators	Average diameter by groups, cm						
	1	2	3	4	5	6	7
Trunk height at which the diameter was measured, m: at the root collar	9.5	11.5	13.0	15.5	18.0	27.0	30.0
0.5	9.0	10.5	11.0	14.0	16.5	25.0	23.5
dynamics (\pm)	0.5	1.0	2.0	1.5	1.5	2.0	6.5
1.0	8.0	10.0	10.0	13.5	16.5	23.0	22.0
dynamics (\pm)	1.0	0.5	1.0	0.5	0	2.0	1.5
1.5	7.0	9.0	9.5	13	16	22.5	21.0
dynamics (\pm)	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0
2.0	6.0	8.0	9.0	12.5	15.5	22.0	20.5
dynamics (\pm)	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Absolute taper, cm	1.75	1.75	2.0	1.5	1.25	2.5	4.75

Analysis of changes in the diameter of typical spruce crops showed that the range of changes in the average diameter at the bottom of the tree trunk is 0.6–2.4 cm for each 0.5 m of its height. The value of the absolute taper on average is 2.21 cm per 1 m height.

Table 2

Changes in the diameter of spruce in test crops

Indicators	The average diameter of the groups, cm						
	1	2	3	4	5	6	7
Trunk height at which the diameter was measured, m: at the root collar	10.6	12.0	16.5	18.0	20.5	34.5	36.5
0.5	9.5	11.0	14.5	17.0	19.5	34.5	36.0
dynamics (\pm)	1.1	1.0	2.0	1.0	1.0	0	0.5
1.0	9.0	10.0	14.5	17.0	19.0	34.0	36.0
dynamics (\pm)	0.5	1.0	0	0	0.5	0.5	0
1.5	9.0	9.5	14.0	16.5	18.5	33.5	35.5
dynamics (\pm)	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2.0	8.5	9.5	13.5	16.5	18.0	33.0	35.0
dynamics (\pm)	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5
Absolute taper, cm	1.05	1.25	1.5	0.75	1.25	0.75	0.75

Analysis of changes in the diameter of test spruce crops showed that the range of changes in the average diameter as the height of the tree increases is less than in typical crops and averages 0.38–0.75 cm for every 0.5 m. The value of the absolute taper on average is 1.04 cm per 1 m of tree height.

Fig. 3 shows a comparison of diameters at a height of 1.3 m of test and typical spruce crops and the ratio of diameters at a height of 1.3 m of trees in a row, in which the indicator of the diameter of crops is characterized most accurately.

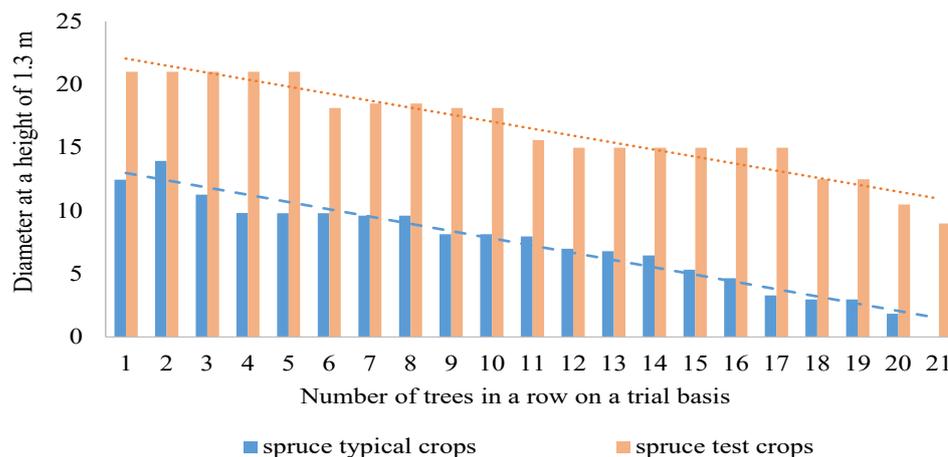


Fig. 3. Diameter ratio at a tree height of 1.3 m

In the diagram it can be seen that the diameter of typical spruce crops is predominantly different for each woody plant. And in test crops of spruce, groups of trees with identical diameter were noted. The diameter size of spruce test crops at a height of 1.3 m exceeds the diameter of typical crops by 41 %.

To identify the effectiveness of the method of creation of forest cultures we assessed the reliability of differences in the mean values of independent samples. When comparing the average values, the following was revealed: the average height of typical forest crops is 12 m, and test crops – 14.5 m; the average diameter of typical forest crops is 11 cm, and test crops – 13.3 cm.

Statistical reliability of differences in the average values of independent sample populations was found during the evaluation of the *t*-criterion at 5 % significance level, since the calculated value of the specified criterion (4.26) is higher than the tabular one (1.99).

The survey revealed the differences in species composition. In the forest areas occupied by typical crops, the species composition of 9 spruces, 1 willow, plus alder, plus aspen, plus hazel (9S1W+Al+As+H) was formed. In the rows and between the rows willow, alder, aspen and hazel of natural origin in the volume (stock) of 90 m³/ha grow. At the same time, in the areas occupied by typical crops, there was often a typical damage of the spruce trunks formed by the fall of dead trees of secondary species renewed naturally and falling out of the plantation during its formation – bark peeling and cracks with resin stains. The number of damaged trunks is 7–10 % of the total number of trees.

In test crops, there is no damage to the trunks, since secondary breeds are rare. Breed composition is 10 spruces (10S).

The volume dynamics of tree trunks of test and typical crops is close in value to the normal distribution and is characterized by equations with a high tightness of the relationship between the indicators that are shown in fig. 4. Trees with the same trunk volume are grouped together.

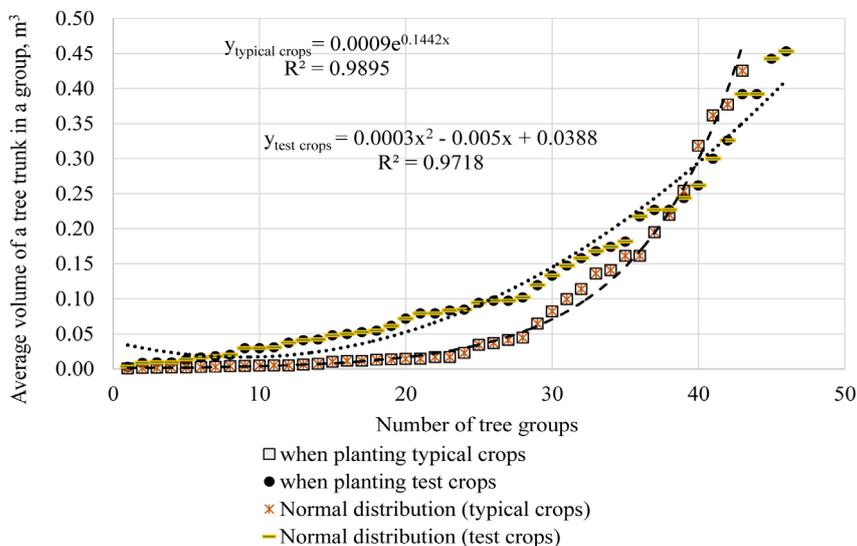


Fig. 4. Dynamics of tree trunk volume in 34-year-old crops

The graph shows that the probability of obtaining trunks with a volume of more than 0.02 m^3 by creating test crops is higher than typical ones (volume indicators from the 8th to the 39th group of trees).

A sharp increase in the exponential curve that characterizes the dynamics of the volume of tree trunks of typical crops is associated with the amount of change in the diameter of the tree trunk that exceeds this indicator of test crops by 2.15 times.

The results obtained during the research indicate the monotony of the development of the process of trees renewal, both in typical and test crops. However, the volume of trunks of test crops exceeds the volume of trunks of typical crops by 3.7 times on average.

Conclusion

The indicators of test crops exceed the typical ones in average height by 2.5 m, average diameter by 2.3 cm, diameter at a height of 1.3 m by 41 %, and the volume of trunks by 3.7 times.

Reliability of differences between the average values of independent sample populations is a sufficient basis for the assertion that the method of creating test crops is more effective than the method of creating typical crops.

Trunks of trees grown by the method of creating typical crops are strongly tapered, since the value of absolute taper of their lower part is 2.21 cm per 1 m of tree height.

Trunks of trees grown by the method of creating test crops are weakly tapered, since the value of absolute taper of their lower part is 1.04 cm per 1 m of tree height. This makes it possible to obtain a forest stand with high productivity. The research results suggest that in forest areas renewed by the method of intermediate agricultural use between the rows of crops, it is possible to obtain a forest stand without significant mechanical damage. Improved indicators show the possibility of reducing the time of

reforestation to the state of serviceability. Therefore, the considered method can be referred to the high-intensity silvicultural production.

Analysis of the research results allows us to make a conclusion about prospects of cultivation of plantation forest crops for the purpose of intensive reproduction of forest resources of the country and expediency of inclusion of actions for creation of plantation forest crops in structure of the transferred powers of subjects of the Russian Federation in the field of reproduction of forests. In this regard, the study of costs of plantation forest crops will be continued.

REFERENCES

1. Бондарев А.И., Онучин А.А., Читоркин В.В., Соколов В.А. О концептуальных положениях интенсификации использования и воспроизводства лесов в Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 6. С. 25–34. [Bondarev A.I., Onuchin A.A., Chitorkin V.V., Sokolov V.A. Conceptual Approach to the of Intensification of Forests Use and Re-Forestation in Siberia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 6, pp. 25–34]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.6.25](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.6.25), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/929/bonarev.pdf>
2. Бузыкин А.И. Возможности регулирования продуктивности древостоев // Лесоведение. 2007. № 6. С. 65–71. [Buzykin A.I. The Possibilities of Regulating the Stand Productivity. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 6, pp. 65–71].
3. Залесов С.В., Фрейберг И.А., Толкач О.В. Проблема повышения продуктивности насаждений лесостепного Зауралья // Сиб. лесн. журн. 2016. № 3. С. 84–89. [Zalesov S.V., Freiberg I.A., Tolkach O.V. The Problem of Improvement of Birch Stand Productivity in Forest Steppe of Cis-Urals. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 3, pp. 84–89]. DOI: [10.15372/SJFS20160309](https://doi.org/10.15372/SJFS20160309)
4. Корчагов С.А., Стребков Н.Н. Экономико-квалиметрическая оценка культур сосны и ели в Вологодской области // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2012. № 3(21). С. 167–171. [Korchagov S.A., Strebkov N.N. Economic and Qualimetric Assessment of Pine and Spruce in the Vologda Region. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast], 2012, no. 3(21), pp. 167–171].
5. Корчагов С.А. Целевое выращивание древесины с заданными качествами в зависимости от факторов внутривидовой изменчивости // Электронный науч.-практ. журн. «Современные научные исследования и инновации». 2016. № 2. С. 239–242. [Электронный ресурс]. [Korchagov S.A. Targeted Cultivation of Wood with Given Characteristics, Depending on the Intraspecific Variation Factors. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific researches and innovations], 2016, no. 2, pp. 239–242].
6. Моисейкина Л.Г. Статистическая оценка интенсификации использования лесов // Вестн. УМО. Статистика и экономика. 2014. № 4. С. 158–162. [Moiseykina L.G. Statistical Appraisal of the Intensification of Forest Use. *Statistika i Ekonomika* [Statistics and Economics], 2014, no. 4, pp. 158–162]. DOI: [10.21686/2500-3925-2014-4-158-162](https://doi.org/10.21686/2500-3925-2014-4-158-162)
7. Никитин Ф.А. Влияние способов обработки и промежуточного сельскохозяйственного пользования на физику почвенной среды // Науч. тр. МЛТИ. М., 1986. Вып. 185. С. 61–64. [Nikitin F.A. Influence of Cultivation Methods and Intermediate Agricultural Use on the Physics of Soil Environment. *Nauchnyye trudy Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1986, iss. 185, pp. 61–64].
8. Никитин В.Ф. Искусственные насаждения ели в решении экологических и хозяйственных проблем Московской области // Лесхоз. инф. 2003. № 8. С. 7–12. [Nikitin V.F. Artificial Spruce Plantations in Solving Environmental and Economic Problems of the Moscow Region. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2003, no. 8, pp. 7–12].

9. Никитин Ф.А., Родин А.Р. Совместное выращивание лесных и сельскохозяйственных культур на землях государственного лесного фонда // Научн. тр. МЛТИ. М., 1984. Вып. 165. С. 41–45. [Nikitin F.A., Rodin A.R. Joint Cultivation of Forest and Agricultural Plantations on the State Forest Fund Lands. *Nauchnyye trudy Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1984, iss. 165, pp. 41–45].

10. Острошенко В.В. Повышение продуктивности лесов Приохотья лесовосстановительными мероприятиями // Лесн. вестн. 2001. № 2. С. 70–71. [Ostroshenko V.V. Improving the Productivity of Forests of Priokhot'ye by Reforestation Activities. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2001, no. 2, pp. 70–71].

11. Паламарчук И.В., Колтунова А.И., Паламарчук П.Г. Моделирование продуктивности древостоев естественных сосняков Северной Евразии // Изв. Оренбург. гос. аграр. фед. ун-та. 2009. Т. 4, № 24. С. 34–36. [Palamarchuk I.V., Koltunova A.I., Palamarchuk P.G. Modeling of Forest Stands Productivity of Natural Pine Forests in North Euro-Asia. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestia Orenburg State Agrarian University], 2009, vol. 4, no. 24, pp. 34–36].

12. Савченкова В.А., Никитин В.Ф. Оценка продуктивности молодняка ели европейской (*Picea abies* L.) // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 2. С. 202–207. [Savchenkova V.A., Nikitin V.F. The Evaluation of Productivity of Young Spruce of European Fir-Tree (*Picea abies* L.). *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2018, no. 2, pp. 202–207].

13. Цветков М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 г. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 203 с. [Tsvetkov M.A. *Changes in the Forest Cover of European Russia from the End of the 17th Century to 1914*. Moscow, AN SSSR Publ., 1957. 203 p.].

14. Garzuglia M. 1948–2018. *Seventy Years of FAO's Global Forest Resources Assessment. Historical Overview and Future Prospects*. Rome, FAO, 2018. 67 p. Available at: <http://www.fao.org/3/I8227EN/i8227en.pdf> (accessed 27.09.19).

15. *Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report*. FAO Forestry Paper No. 163. Rome, FAO, 2010, 340 p. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i1757e.pdf> (accessed 27.09.19).

16. Guidelines and Specifications: FRA 2020. Version 1.0. FRA Working Paper No. 189. *Global Forest Resources Assessment 2020*. Rome, FAO, 2018. 51 p.

17. Hernández Moreno J.A., Núñez-Vera M.A. Conservación de recursos forestales y género, en el marco del desarrollo sustentable. El caso de la comunidad indígena barrio de San Miguel, Michoacán, México [Conservation Forest Resources and Gender, under the Sustainable Development. The Case of the Indigenous Community Barrio de San Miguel, Michoacan, Mexico]. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 2014, vol. 2, núm. 2, pp. 128–140. Available at: <http://cfores.upr.edu/cu/index.php/cfores/article/view/86/260> (accessed 27.09.19).

18. *Informe nacional a la cuarta cop del convenio sobre diversidad biológica*. CBD First National Report – Cuba (Spanish Version). 1999. Available at: <https://www.cbd.int/doc/world/cu/cu-nr-01-es.pdf> (accessed 27.09.19).

19. Reinaldo O.F., Puebla T.F. *Producción forestal: Sembrar hoy para tener mañana*. 2018, Available at: <http://www.cubadebate.cu/especiales/2018/05/15/produccion-forestal-sembrar-hoy-para-tener-manana-video/#R40430120201219> (accessed 27.09.19).

20. *State of the World's Forests 2007*. Rome, FAO, 2007. 144 p. Available at: <http://www.fao.org/3/a-a0773e.pdf> (accessed 27.09.19).

21. *The State of the World's Forests 2018 – Forest Pathways to Sustainable Development*. Rome, FAO, 2018. 119 p. Available at: <http://www.fao.org/3/I9535EN/i9535en.pdf> (accessed 27.09.19).

ПРОДУКТИВНОСТЬ ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИОННЫХ НАСАЖДЕНИЙ

В.А. Савченкова¹, д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [Y-3167-2019](https://orcid.org/0000-0001-8593-7887)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8593-7887>

С.Б. Васильев², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [C-7390-2017](https://orcid.org/0000-0003-4063-7041)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4063-7041>

В.Ф. Никитин², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [ABE-5889-2020](https://orcid.org/0000-0002-0861-5718)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0861-5718>

П.А. Аксенов², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [H-1352-2019](https://orcid.org/0000-0002-1716-7726)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1716-7726>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; e-mail: v9651658826@yandex.ru

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; e-mail: svasilyev@mgul.ac.ru, axenov.pa@mail.ru, forestmaster@yandex.ru

Аннотация. С учетом неравномерного обеспечения страны лесными ресурсами и растущей потребности в лесоматериалах, актуальным направлением научного исследования становится сокращение сроков выращивания товарной древесины и повышение продуктивности насаждений. Одним из способов интенсивного воспроизводства лесов является создание плантационных лесных культур. Плантация лесных культур предполагает выращивание технически ценных древесных пород в сокращенные сроки. В нашей стране есть опыт создания плантационных культур, но в связи с реорганизацией лесной отрасли многие такие участки оказались без надлежащего ухода. Однако на протяжении 34 лет научные работники Мытищинского филиала Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (ранее Московского государственного университета леса) систематически ведут наблюдение за ростом и развитием созданных в 1984 г. лесных культур ели с промежуточным сельскохозяйственным использованием в междурядьях. Способ создания опытных культур направлен на: обеспечение максимально благоприятных условий для роста и развития главной древесной породы в первые годы после посадки, использование естественного хода роста насаждений в течение всего периода выращивания культур, оптимизацию затрат на частые лесоводственные уходы, получение полнодревесного древостоя с высокими эстетическими свойствами, предупреждение образования пороков древесины. В статье приведена технология создания культур ели, являющаяся отличительной особенностью указанного способа. Проанализировано изменение диаметров и высот деревьев, выращенных путем создания лесных культур традиционным способом и с использованием промежуточного сельскохозяйственного использования в междурядьях. Проведена оценка достоверности различий средних значений независимых выборок, подтверждающая преимущество опытных культур ели. Их породный состав представлен на 100 % деревьями породы ель, абсолютный сбег которых в 2,13 раза меньше, чем у созданных традиционным способом. Установлена более высокая вероятность получения стволов объемом более 0,02 м³ путем создания опытных культур. Результаты статистической обработки экспериментальных данных свидетельствуют о перспективности метода посадки лесных культур ели с промежуточным сельскохозяйственным использованием в междурядьях, который способствует формированию древостоя с лучшими характеристиками.

Для цитирования: Savchenkova V.A., Vasilyev S.B., Nikitin V.F., Aksenov P.A. Productivity of Forest Plantation Crops // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 35–45. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-35-45

Ключевые слова: плантация лесных культур, промежуточное сельскохозяйственное пользование, лесные культуры, продуктивность.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 05.11.19 / Received on November 5, 2019

УДК 630*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

ДИНАМИКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЛЕСОВ НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ЗЕМЛЯХ

Е.Н. Наквасина¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Ю.Н. Шумилова², канд. геогр. наук, доц.; ResearcherID: [ABH-6497-2020](https://orcid.org/0000-0002-6736-0268),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6736-0268>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

²Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: j.shumilova@sevniilh-arh.ru

Аннотация. На примере подобранного хроноряда залежей (4 пробные площади с разной длительностью отчуждения: 16 лет, 25 лет, 63 года и 130 лет) в Каргопольском районе Архангельской области (средняя подзона тайги, остаточно-карбонатные почвы) проведены расчеты запасов углерода в различных компонентах биогеоценоза (почва, живой напочвенный покров, лесная подстилка, подрост, подлесок и древостой). Дана оценка структуры запасов углерода формирующихся насаждений и ее изменения с возрастом залежи. Определено, что в процессе сукцессии при облесении пашен происходит закономерное увеличение запасов углерода и его перераспределение между почвой и формирующимся фитоценозом. В насаждениях на молодых залежах более 86 % запаса углерода представлено углеродом пахотного горизонта почвы. В ходе зарастания залежи лесной растительностью доля этого пула уменьшается и уже в средневозрастном 63-летнем лесу составляет 22 %, а в спелом 130-летнем – всего 7,6 %. В средневозрастном насаждении в структуре общего запаса углерода доля древостоя достигает 69 %, а в спелом 130-летнем – уже 90 %. В насаждениях на молодых залежах структура главных компонентов биогеоценоза (почвенный углерод : углерод напочвенного покрова : углерод древесного яруса) характеризуется соотношением 9:1:0, тогда как в насаждениях на старых залежах 63-летнего и 130-летнего возраста – 2:0:8 и 1:0:9 соответственно. Для подроста и подлеска изучаемого хроноряда характерны небольшие доли углерода, не имеющие существенного значения в углеродном пуле экосистемы. Лесная подстилка в формирующихся лесных насаждениях вносит весомый вклад в структуру углерода биогеоценоза, хотя в общем пуле углерод биогеоценоза составляет 3...4 % и не способствует увеличению запасов углерода в почве. В системе «почва – лесная подстилка – живой напочвенный покров» доля углерода почвы с увеличением возраста насаждения снижается от 91 до 76...77 %, а доля формирующейся подстилки в средневозрастном и спелом лесу – 16 и 20 % соответственно. В насаждениях на молодых залежах это соотношение составляет 9:0:1, тогда как на старых – 8:2:0. Оставление пахотных земель на остаточно-карбонатных почвах под самозарастание лесной растительностью и формирование на них лесных насаждений в подзоне средней тайги приведут к постепенному снижению углеродного пула в почве, но будут способствовать секвенированию углерода в фитомассе многолетней древесной растительности и в лесной подстилке. Эти два компонента биогеоценоза будут служить депо секвенированного углерода, поддерживая биологический круговорот веществ в насаждении.

Для цитирования: Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагроденных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

Финансирование: Исследования частично поддержаны грантом РФФИ и правительства Архангельской области № 17-44-290111 и основаны на описаниях пробных площадей, входящих в базу данных кафедры лесоводства и лесоустройства САФУ.

Ключевые слова: залежи, постагrogenные леса, хроноряд, запасы углерода, компоненты биогеоценоза, почва, древостой, лесная подстилка.

Введение

Учет аккумуляции углерода в почвах и растительности экосистем в настоящее время стал необходим для прогнозирования его динамики при разных сценариях землепользования, а также в связи с климатическими изменениями. Большое значение придается региональным исследованиям и моделированию секвестирования углерода [1, 14, 15, 17, 22,]. Однако региональная оценка запасов углерода требует проведения локальных исследований [5], в том числе с использованием метода хроносеквенции, который позволяет проследить динамику запасов углерода при разных сценариях земле- и лесопользования [25–27, 31, 32].

Особый интерес в настоящее время вызывает изучение хронорядов при изменении землепользования, что обусловлено выводом из активного сельскохозяйственного оборота в России более 40 млн га угодий в конце XX в. [10]. В таежной зоне залежи зарастают лесной растительностью, поэтому важно проследить особенности натурализации и динамику пулов углеродного баланса на таких землях.

Несомненно, что при облесении залежей процессы восстановления растительного покрова идут в направлении формирования зональных экосистем в ненарушенном состоянии [9, 19], что соответствует соотношению запасов почвы и растительности 1:4 для подзоны средней тайги [7]. При облесении запасы углерода в фитомассе и лесной подстилке (напочвенное образование) повышаются за счет формирования лесного фитоценоза [17], тогда как почвенный пул меняется медленно [26].

О формировании углеродного пула в почвах при облесении пашен нет единого мнения, по одним данным, запасы углерода в почве повышаются, по другим – понижаются или находятся в стабильном состоянии [11, 17, 22, 25, 26, 28, 30]. Однако по сравнению с темпами накопления фитомассы эти колебания невелики [30]. Показано, что они могут зависеть от климатических условий региона исследований, в частности от увлажненности почвы, количества осадков [1, 2, 21, 34], породного состава и возраста насаждений [1, 17, 21, 25, 29, 31], свойств почв и почвообразующих пород, в том числе от их карбонатного генезиса [17, 24, 25]. Эти изменения определяют пул микробного сообщества в почве, связанного с биохимическим циклом углерода [8, 33]. Нельзя также исключать и характер предшествующего использования угодий, так как именно это способствует сохранению большого количества травянистой растительности в напочвенном покрове формирующихся лесов [1], которое оказывает влияние на биологический круговорот веществ в системе «почва – фитоценоз» в период сукцессионных изменений в экосистемах [12].

Цель наших исследований – проследить на примере хроноряда пробных площадей динамику изменения пулов углерода в структуре компонентов биогеоценоза при облесении пашен на азональных почвах в Каргопольском районе Архангельской области.

Объекты и методы исследования

Каргопольский район Архангельской области относится к подзоне средней тайги, для него характерно распространение дерново-подзолистых остаточно-карбонатных (текстурно-метаморфических грубогумусированных остаточно-карбонатных) почв, сформированных на близко залегающих карбонатной морене и известковой плите. Иногда их называют северные «рендзины» [20]. Эти почвы отличаются от зональных подзолистых почв на силикатных породах высоким плодородием при несовместимых свойствах (поверхностное оподзоливание и окарбончатность нижних горизонтов) и широким использованием в сельском хозяйстве.

Для расчетов запасов углерода был подобран хронологический ряд залежных объектов (пашен), зарастающих лесной растительностью (преимущественно хвойными породами) и находящихся на разных стадиях сукцессии, из 4 пробных площадей с разной длительностью отчуждения из активного сельскохозяйственного пользования.

16-летняя залежь представляет собой заброшенное поле севооборота, на котором в течение 5 лет проводилось сенокосение. В настоящее время в напочвенном покрове сформировалась злаково-бобово-разнотравная ассоциация (всего 25 видов). Преимущественное распространение имеют *Dactylis glomerata* L. и *Amoria pretense* C. Prest. В моховом ярусе единично распространены *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst. и *Dicranum scoparium* Hedw. Древесная растительность, распространившаяся от стен леса, представлена 74Е2С4Лц20Ол, густота 760 шт./га, средняя высота 1,5 м. Повсеместно по площади поля встречаются виды *Salix* (sp.) и *Rosa majalis* Herzm. в количестве 1 шт./га.

В насаждении на 25-летней залежи после отчуждения из активного использования в севообороте промежуточное пользование продолжалось 10 лет, что привело к угнетению разрастания древесной растительности, численность которой – 180 шт./га, состав – 55С33Е12Б, высота не превышает 1,0 м, что ниже, чем на предыдущей залежи. Подлесочные породы представлены кустовыми видами *Salix* (sp.) (120 шт./га), напочвенный покров – хорошо сформированной злаково-бобово-разнотравной ассоциацией (25 видов), в которой доминируют *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *Amoria pretense*. Моховой ярус состоит из 4 видов с преимущественным распространением *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Rhytidiadelphus triquetrus* с незначительным проективным покрытием.

63-летнее насаждение на пашенной залежи длительного пользования представляет собой сосновый древостой (состав 10С+Е, средняя высота 16,3 м, средний диаметр 20,5 см, густота 940 шт./га), под пологом которого сформировался достаточно густой подрост (4920 шт./га, состав 50Е50Ос), а также подлесочный ярус, состоящий из *Salix* (sp.) (доля в составе 36 %), *Rosa majalis* (28 %), *Juniperus communis* L. (18 %), *Sorbus aucuparia* L. (9 %) и *Padus racemosa* (Lam.) Gilib. (9 %) в количестве 110 шт./га. Несмотря на формирование лесной обстановки, доминантами живого напочвенного покрова (19 видов) являются *Amoria pretense* и *Melica nutans* L. Из лесных видов встречаются *Rubus saxatilis* L., *Luzula DC. pilosa* (L.) Willd., *Potentilla erecta* (L.) Raeusch. и др. Моховой ярус хоро-

шо сформирован преимущественно двумя видами мхов: *Pleurozium schreberi* и *Rhytidiadelphus triquetrus*.

130-летняя залежь на заброшенном постоянном лесном питомнике представлена лиственничником (100 Лц). Густота насаждения всего 290 шт./га при средних высоте древостоя 27,1 м и диаметре 42,2 см. Из-за периодической рекреационной нагрузки в отдельные годы (близость к населенному пункту) подрост неразвит (состав 64Е36Лц, густота 140 шт./га при средней высоте 1,5 м). Подлесочные породы состоят из *Sorbus aucuparia* (доля в составе 66 %), *Ribes nigrum* L. (26 %), *Padus racemosa* (Lam.) Gilib. (5 %), *Juniperus communis* (2 %) и *Salix* (sp.) (1 %). Живой напочвенный покров (16 видов) представлен луговыми и лесными растениями, в числе доминантов *Deschampsia cespitosa*, *Milium effusum* L., *Aegopodium podagraria* L., *Fragaria vesca* L., *Rubus saxatilis* L. и др. Широко распространены 2 вида мха с преобладающим покрытием (95 %) *Rhytidiadelphus triquetrus*.

При описании почвенного разреза, необходимого для идентификации пашенного состояния угодий, обращали внимание на сохранившиеся признаки наличия пахотного горизонта. Особенно это имело значение при подборе лесных участков пахотного генезиса. Старопахотный горизонт имел признаки пашенного состояния (равномерную окраску, сохранившуюся структуру и достаточно ровную нижнюю границу), отличавшие его от нативных лесных почв без признаков сельскохозяйственного воздействия.

В сформированных лесных насаждениях лесная подстилка имеет небольшую мощность (табл. 1), что связано с большим разнообразием легко-разлагающейся травянистой растительности в напочвенном покрове. Отсутствие кустарничков в нем поддерживается нейтральной реакцией среды верхнего горизонта почвы, характерной для окарбонированных почв. Подкисления верхней толщи почвы при разрастании древесной растительности на данных участках не наблюдалось. Близкое залегание карбонатных пород поддерживает плодородие почв в процессе их сукцессионного самозарастания.

Полевые исследования (2014 г.) на пробных площадях (в насаждениях на молодых залежах площадь пробы составляла 20×20 м, в лесах – 33×33 м) осуществлялись общепринятыми в лесоводстве и почвоведении методами. Учету и описанию подлежали такие компоненты биогеоценоза, как древостой, подрост, подлесок, живой напочвенный покров, лесная подстилка, почва в толще старопахотного горизонта. Образцы лесной подстилки отбирали посредством деревянной рамки, почвы из толщи пахотного горизонта – металлическими кольцами в 5–10-кратной повторности. Фитомассу напочвенного покрова определяли укосным методом, закладывая 5–10 площадок размером 50×50 см, с пересчетом на воздушно-сухую массу на 1 га. В лабораторных условиях содержание органического углерода определяли методом Тюрина, плотность сложения лесной подстилки и почвы – термовесовым методом. Рассчитывали запас лесной подстилки на 1 га. Детрит (валеж, остолопы) в насаждениях отсутствовал и учету не подлежал.

Таблица 1

**Свойства пахотного горизонта почв и лесной подстилки в фитоценозах,
формирующихся на залежах разного возраста**

Возраст залежи, лет	Лесная подстилка		Почва			
	Мощность, см	Плотность сложения, г/см ³	Мощность пахотного горизонта, см	pH _{сол}	C _{орг} , %	Плотность сложения, г/см ³
16	Нет	Нет	30	7,3	1,23	$\frac{1,60 \pm 0,02}{1,55 \dots 1,66}$
25	Нет	Нет	30	7,2	1,76	$\frac{1,51 \pm 0,01}{1,47 \dots 1,56}$
63	$\frac{1,3 \pm 0,12}{1,0 \dots 1,5}$	$\frac{0,14 \pm 0,03}{0,07 \dots 0,22}$	21	7,4	1,36	$\frac{0,99 \pm 0,07}{0,66 \dots 1,01}$
130	$\frac{1,3 \pm 0,20}{1,0 \dots 2,0}$	$\frac{0,10 \pm 0,01}{0,070 \dots 0,13}$	22	7,2	1,01	$\frac{0,90 \pm 0,04}{1,00 \dots 1,21}$

Примечание: В числителе – среднее значение показателя и его стандартная ошибка, в знаменателе – минимальные и максимальные значения признака.

Запасы органического углерода (C_{орг}) определяли в слое почвы 0...20 см, так как мощность пахотного горизонта на севере, особенно на старых пашнях, редко превышала это значение, с учетом плотности сложения по общепринятой в почвоведении методике [18]. Запасы углерода в лесной подстилке оценивали по методике [17], среднее значение содержания углерода в органическом веществе подстилок принимали равным 38 %, на основании расчетов Д.Г. Щепаченко с соавт. [19], для всех почв и растительных ассоциаций. Запас углерода в растениях живого напочвенного покрова рассчитывали через фитомассу надземной части, определенной в поле, принимая массу корней равной массе надземной части [23], содержание углерода – 40 % [13]. Для несомкнутых лесных насаждений запас углерода древесных пород вычисляли по уравнениям в соответствии с методикой [10]. Запасы фитомассы древостоя, подроста и подлеска рассчитывали по аллометрическим уравнениям на основе их численности и параметров роста по породам [16]. Для перерасчета фитомассы древостоя в углерод использовали конверсионный коэффициент: 0,50 – для древесины; 0,45 – для хвои [6].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе сукцессии с увеличением возраста насаждения на залежи происходит перераспределение количества углерода между компонентами биогеоценоза. Развитие живого напочвенного покрова при зарастании залежи травянистой растительностью способствует увеличению количества углерода в почве. Затенение поверхности земли разрастающимся пологом деревьев и кустарников ведет к смене луговой растительности кустарничковой, формированию древостоя с подростом и подлеском, что в свою очередь снижает количество углерода в пахотном горизонте почв.

Наибольший запас углерода (табл. 2) в пахотном горизонте почвы характерен для насаждений на молодых залежах (16–25 лет отчуждения). В этот период идет

разрастание луговых видов, что подтверждается высокими запасами фитомассы трав и оказывает влияние на содержание органического углерода в пахотном горизонте почвы. Запасы углерода в почве поддерживаются эффективным плодородием, сформированным внесением удобрений и мелиорантов в период активного сельскохозяйственного пользования, в том числе и при длительном (10 лет) использовании поля в качестве пастбища, как это было выявлено на залежи 25-летнего возраста. Дополнительное удобрение почв и частичное стравливание надземной части стимулировали повышенное разрастание напочвенного покрова злаковой ассоциации.

По мере развития фитоценоза запас углерода в пахотном горизонте почв уменьшается почти в 2 раза. Это обусловлено зарастанием залежей древесной растительностью, масса опада которой намного меньше массы органического вещества, поступающего в почву от травостоя, тогда как расход питательных веществ почвы древесными породами древостоя, подроста и подлеска увеличивается. Меняется и качество опада – легкоразлагаемый опад травянистых растений с высокой зольностью заменяется трудноразлагаемым опадом мхов и кустарничков [12].

Таблица 2

**Запас углерода (т/га) по отдельным компонентам биогеоценозов,
формирующихся на залежах разного возраста**

Возраст залежи, лет	Почва (0...20 см)	Лесная подстилка	Живой напочвенный покров	Подрост (молодняк)	Подлесок	Древостой	Итого	Соотношение (в целых долях)	
								П+ЛП:ФМ	П:ЛП:ЖНП
16	39,4	–	4,1	0,10	0,30	–	43,9	9:1	9:0:1
25	52,8	–	8,1	0,01	0,03	–	60,9	9:1	9:0:1
63	25,2	6,5	1,4	0,30	0,04	76,5	110,0	1:3	8:2:0
130	18,2	4,8	0,5	0,02	0,06	215,6	239,2	1:10	8:2:0

Примечание: П – запас почвенного углерода; ЛП – запас углерода в лесной подстилке; ФМ – суммарный запас углерода в фитомассе растительности; ЖНП – запас углерода в фитомассе живого напочвенного покрова.

Наименьший запас углерода в пахотном слое почвы отмечается в насаждении на залежи возрастом 130 лет, на которой сформировался спелый листовенный лес. Запас углерода в толще старопахотного горизонта в 2–3 раза меньше, чем в пахотном горизонте почвы на молодых залежах, что связано со снижением его содержания до 1 %.

Лесная подстилка формируется на залежах спустя 40 лет после отчуждения, при зарастании древесными и кустарниковыми растениями. Именно к этому времени в условиях исследования разрастается древесный ярус и формируется лесная обстановка [4]. Однако из-за сохранения в напочвенном покрове формирующихся лесов значительной доли трав с легкоразлагающимся опадом мощность лесной подстилки невелика (1...2 см). Причем в нашем случае с увеличением возраста насаждения запас углерода в лесной подстилке уменьшается в 1,5 раза, что связано, скорее всего, с затенением растений нижних ярусов биогеоценоза разрастающимися кронами древесного яруса, изменением видового разнообразия живого напочвенного покрова и снижением его массы на единицу площади почти в 3 раза.

Более высокие запасы углерода в живом напочвенном покрове накапливаются в насаждениях на молодых залежах, пока не сформировался древостой и нет затенения кроной поверхности почвы, на стадии лугового фитоценоза. На залежах по мере развития растительности в динамике запаса углерода в живом напочвенном покрове отмечается резкий спад. Луговая растительность заменяется лесной, доля объемных трав снижается, увеличивается представленность кустарничков и лесного разнотравья. Запасы углерода растений живого напочвенного покрова необлесившихся залежей в 6,9 раз больше, чем на залежах старшего возраста. В отдельных случаях (возраст насаждения на залежах 25 и 130 лет) наблюдаются различия в 17 раз.

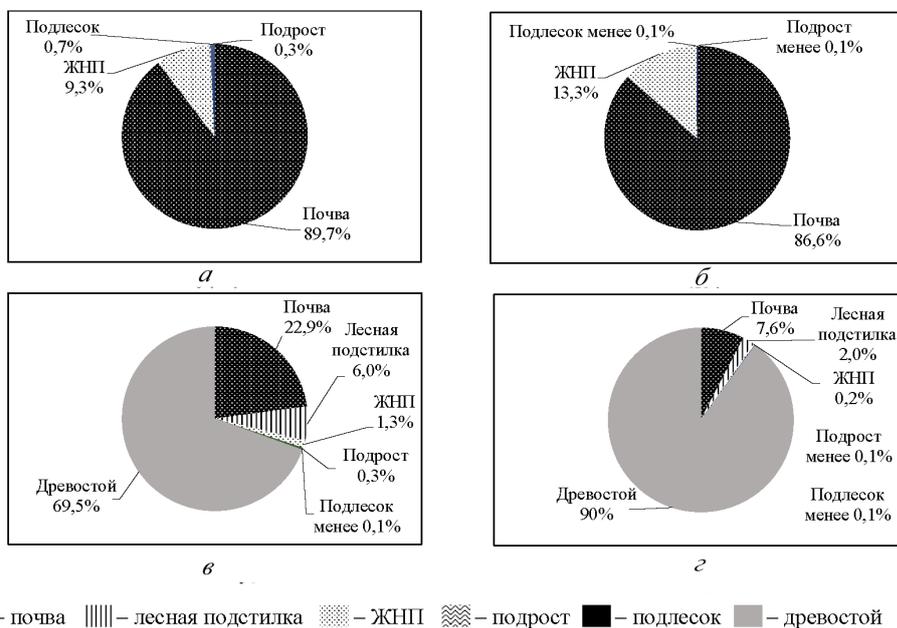
На залежах до 40 лет, пока не сформировался лесной полог древостоя, в расчет запасов углерода древесного яруса принимали подрост сосны, ели, лиственницы, березы как лесообразующих пород и все виды кустарников, которые в дальнейшем формируют подлесок. В исследованных фитоценозах старшего возраста, где сформировался древостой, выделяли ярусы подроста и подлеска по лесоводственным критериям. Для подроста и подлеска в сформированных лесах на залежах характерны самые низкие показатели запаса углерода, по сравнению с другими компонентами биогеоценоза. Их доля не превышает 1 % и не имеет определяющего значения в структуре запасов углерода насаждения. Малый запас углерода в древесных и кустарниковых растениях на молодых залежах связан с их численностью, определяемой характером промежуточного пользования – сенокошением или пастьбой. Использование полей под пастбище и сенокошение задерживает естественное зарастивание [4]. Так, промежуточное пользование в течение 10 лет на поле 25-летнего отчуждения значительно снизило разрастание древесных растений.

Сформированный на залежах древостой, среди всех изученных компонентов биогеоценоза, характеризуется наибольшими запасами углерода. Несомненно, что увеличение запасов углерода в древостое связано с его возрастом и таксационными параметрами, определяющими продуктивность деревьев, что хорошо заметно при сравнении показателей сосняка на 63-летней и лиственничника на 130-летней залежах.

С возрастом наблюдается общая тенденция к суммарному (все компоненты биогеоценоза) увеличению запасов углерода в 2,3 раза: с 43,9 т/га на 16-летней залежи, покрытой луговой растительностью, до 239,2 т/га на 130-летней залежи, на которой сформировался лиственничный лес. Эта оценка соответствует данным [11, 17]. Однако согласно [9], секвестирование углерода будет продолжаться до климатического состояния насаждений и может достигнуть запасов 350 т/га.

В процессе сукцессии изменяется структура общих запасов углерода (см. рисунок).

В насаждениях на молодых залежах более 86 % запаса углерода представлено углеродом пахотного горизонта почвы. С увеличением возраста насаждений в ходе зарастания залежи лесом доля этого пула уменьшается и уже в средневозрастном 63-летнем сосновом насаждении составляет 22 %, а в спелом 130-летнем – всего 7,6 %. В необлесившихся фитоценозах на залежах существенна доля углерода живого напочвенного покрова в структуре общего запаса – 9...13 %. В насаждениях на залежах старшего возраста доля этого пула уменьшается до 1 %.



Структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах средней подзоны тайги в ходе естественного зарастания залежей разного возраста: *a* – 16 лет; *б* – 25 лет; *в* – 63 года; *г* – 160 лет

Structure of carbon stocks in postagrogenic ecosystems of the middle taiga subzone during natural overgrowth of fallows of different age, yrs: *a* – 16; *б* – 25; *в* – 63; *г* – 160

Перераспределение углерода в биогеоценозе происходит прежде всего за счет наиболее плодородного пахотного слоя почвы и поселившейся на залежи древесной растительности. Это два крупных пула углерода, поддерживающие перераспределение его в экосистеме. Уже к 63-летнему возрасту в средневозрастном насаждении на залежи в структуре общего запаса углерода преобладает доля древесной, которая достигает 70 %, 130-летний лиственный лес накапливает в древесное 90 % углерода. В необлесившихся залежах структура главных компонентов биогеоценоза (почвенный углерод, углерод напочвенного покрова и древесного яруса) составляет 9:1:0, тогда как в насаждениях на залежах 63- и 130-летнего возраста – 2:0:8 и 1:0:9 соответственно.

Подрост под пологом древесной и подлесок, который формируется за счет поселившихся на залежи видов кустарников, не имеют существенного значения в структуре углеродного пула. Их доля будет зависеть прежде всего от численности, которая регулируется длительностью и видом промежуточного пользования.

Начинающееся в формирующихся лесах образование лесной подстилки «оттягивает» на себя запасы углерода, накапливающиеся в живом напочвенном покрове. Этому способствуют изменение видового разнообразия растительности, снижение ее фитомассы на единицу площади, преобладание форм грубого (детритного) гумуса [3]. Лесная подстилка, накапливающая мортмассу, составляет в общем пуле углерода биогеоценоза 3...4 % и не способствует увеличению

запасов углерода в почве. В системе «почва – лесная подстилка – живой напочвенный покров» доля углерода пахотного слоя почвы снижается с возрастом залежеобразования от 91 до 76...77 %, а доля формирующейся подстилки в средневозрастном и спелом лесу составляет 16...20 %. При этом запас углерода напочвенного покрова с возрастом насаждений на залежах уменьшается с 9 до 2 %. Таким образом, в насаждениях на молодых залежах соотношение этих компонентов биогеоценоза составляет 9:0:1, тогда как в старых – 8:2:0. Лесная подстилка в формирующихся лесных насаждениях наиболее изменчива при сукцессионных изменениях в лесной зоне и вносит весомый вклад в структуру углерода биогеоценоза, что отмечалось ранее [1, 2]. Накопление углерода в лесной подстилке не зависит от свойств минеральной части почвы [32].

Заключение

Установлено, что при самозаращении пашен лесом в условиях средней подзоны тайги на остаточно-карбонатных почвах (северных рендзинах) происходит закономерное перераспределение пула углерода от почвенного компонента биогеоценоза в сторону формирующегося древостоя с многолетней растительностью. Резкого снижения запасов органического углерода в пахотном горизонте почвы за 100-летний период не происходит в силу нейтрализации кислотности карбонатами и сохранения в напочвенном покрове травянистой растительности с легкоразлагаемым опадом. Это обуславливает медленное формирование толщи лесной подстилки, однако доля ее участия достигает 3...6 % от общего запаса углерода в насаждении, что выше пула растительности напочвенного покрова. В системе «почва – лесная подстилка – живой напочвенный покров» доля подстилки составляет 20 % от комплексного запаса, а ее формирование не влияет на процессы накопления углерода в пахотном горизонте почвы, запас углерода в которой с возрастом залежи закономерно снижается.

Оставление пахотных земель под самозаращение лесом и формирование на них лесных насаждений на плодородных остаточно-карбонатных почвах средней тайги приводит к постепенному снижению углеродного пула в почве, но будет способствовать секвенированию углерода в фитомассе растительности, прежде всего многолетней древесной, а также в лесной подстилке. Эти два крупных компонента биогеоценоза будут служить в качестве депо секвенированного углерода, поддерживая биологический круговорот веществ в насаждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н.В. Лукиной; ФГБУН, Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 232 с. [*Carbon Accumulation in Forest Soils and Forest Succession Status*. Ed. by N.V. Lukina. Moscow, KMK Publ., 2018. 232 p.]

2. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с. [Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. *Dynamics of Carbon Organic Matter Content of Spruce Forests in Middle Taiga Growing on Automorphic Soils*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2014. 270 p.]

3. Гиниятуллин К.Г., Шинкарев А.А., Фазылова А.Г., Кузьмин К.И., Шинкарев А.А. (мл.) Пространственная неоднородность вторичной аккумуляции гумуса в старопахот-

ных горизонтах залежных светло-серых лесных почв // Учен. зап. Казан. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2012. Т. 154, кн. 4. С. 61–70. [Giniyatullin K.G., Shinkarev A.A., Fazylova A.G., Kuzmina K.I., Shinkarev A.A. (Jr.) Spatial Heterogeneity of Secondary Humus-Accumulation in Old-Arable Horizons of Fallow Light-Grey Forest Soils. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series], 2012, vol. 154, book 4, pp. 61–70].

4. Голубева Л.В., Наквасина Е.Н. Трансформация постагрогенных земель на карбонатных отложениях: моногр. Архангельск: Кира, 2017. 152 с. [Golubeva L.V., Nakvasina E.N. *Transformation of Postagrogenic Lands on Carbonate Sediments*. Arkhangelsk, Kira Publ., 2017. 152 p.].

5. Замолодчиков Д.Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4(29). С. 15–22. [Zamolodchikov D.G. Systems for Estimating and Forecasting Carbon Stocks in Forest Ecosystems. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2011, no. 4(29), pp. 15–22].

6. Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Уткин А.И. Пулы и потоки углерода лесов Дальневосточного федерального округа // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII, № 3. С. 21–30. [Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Utkin A.I. Pools and Flows of Carbon in the Forests of the Far-Eastern Federal District. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2006, vol. 23, no. 3, pp. 21–30].

7. Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива «4-промилле» – новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почв. инст-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. [Ivanov A.L., Stolbovoy V.S. The Initiative “4 per mille” – a New Global Challenge for the Soils of Russia. *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* [Dokuchaev Soil Bulletin], 2019, iss. 98, pp. 185–202]. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).

8. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мостовая А.С., Телеснина В.М. Влияние процессов естественного лесовосстановления на углеродный статус и микробиологическую активность постагрогенных почв в различных лесорастительных зонах европейской части России // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения: материалы докл. VI Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Сыктывкар, 14–18 сент. 2015 г.). Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2015. С. 152–154. [Kurganova I.N., Lopes de Uerenu V.O., Mostovaya A.S., Telesnina V.M. Influence of Natural Reforestation Processes on Carbon Status and Microbiological Activity of Postagrogenic Soils in Various Forest Growing Zones of the European Part of Russia. *Fundamental and Applied Aspects of Forest Soil Science: Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference on Forest Soil Science with International Participation (Syktyvkar, Russia, September 14–18, 2015)*. Syktyvkar, Komi Science Centre UB RAS, 2015, pp. 152–154].

9. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Неведова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с. [Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dynamics of Agricultural Lands of Russia in the 20th Century and Postagrogenic Restoration of Soils and Vegetation*. Moscow, GEOS Publ., 2010. 416 p.].

10. Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесных насаждений на локальном уровне // ЦЭПЛ РАН.: Режим доступа: <http://old.cepl.rssi.ru/carbondoc/local/local1.doc> (дата обращения: 07.10.19). [Methodology of Information and Analytical Assessment of the Carbon Budget of Forest Plantations at the Local Level. CEPF RAS].

11. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317. [Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A. Alterations of the Carbon Storages in Postagrogenic Ecosystems Due to

Natural Reforestation in Kostroma Oblast. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 4, pp. 307–317].

12. Телеснина В.М., Владыченский А.С. Особенности биологического круговорота в постагрогенных экосистемах южной тайги // Экологические функции лесных почв в естественных и нарушенных ландшафтах: памяти В.В. Никонова: материалы докл. IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Апатиты, 12–16 сент. 2011 г.). Апатиты: Кольский НЦ, 2011. Ч. 1. С. 130–134. [Telesnina V.M., Vladychenskiy A.S. Features of Biological Cycle in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga. *Ecological Functions of Forest Soils in Natural and Damaged Landscapes: Proceedings of the 4th All-Russian Scientific Conference with International Participation in memory of V.V. Nikonov (Apatity, September 12–16, 2011)*. Apatity, KSC, 2011, part 1, pp. 130–134].

13. Тутлянова А.А. Биологический круговорот углерода в травянистых биогеоценозах. Новосибирск: Наука, 1977. 219 с. [Titlyanova A.A. *Biological Cycle of Carbon in Grass Biogeocenoses*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 219 p.]

14. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. Пулы и потоки углерода в лесном фонде Архангельской области // Академическая наука и ее роль в развитии производительных сил в северных регионах России: материалы докл. Всерос. конф. с междунар. участием (г. Архангельск, 19–22 июня 2006 г.). Архангельск, 2006. С. 1–4. [Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V. Pools and Flows of Carbon in the Forests of the Arkhangelsk Region. *Academic Science and Its Role in the Development of Productive Forces in the Northern Regions of Russia: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation*. Arkhangelsk, 2006, pp. 1–4].

15. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Курц В.А. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3 // Тр. СПбНИИЛХ. 2014. № 1. С. 5–18. [Zamolodchikov D.G., Grabowsky V.I., Kurz W.A. Influence of Forest Harvest Rates on the Carbon Balance of Russian Forests: Projective Analysis Using the CBM-CFS3 Model. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2014, no. 1, pp. 5–18].

16. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36–46. [Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gulbe T.A., Gulbe Ya.I. Allometric Equations for Phytomass Based on the Data on Pine, Spruce, Birch and Aspen Trees in European Russia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1996, no. 6, pp. 36–46].

17. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Изменение величины и структуры запасов углерода в регионах южной тайги и лесостепи Европейской России за исторический период // Живые и биокосные системы. 2017. № 19. Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-19/article-2> (дата обращения: 01.04.19). [Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Changes of Organic Carbon Pools in the Southern Taiga and Forest-Steppe of European Russia during the Historical Period. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*, 2017, no. 19].

18. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42. [Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. Reserves of Biological Carbon and Nitrogen in Soils of Russian Forest Fund. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2004, no. 4, pp. 30–42].

19. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.В. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. [Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The Pool of Organic

Carbon in the Soils of Russia. *Pochvovedeniye* [Eurasian Soil Science], 2013, no. 2, pp. 123–132]. DOI: [10.7868/S0032180X13020123](https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123)

20. Яшин И.М., Кашанский А.Д. Ландшафтно-геохимическая диагностика и генезис почв Европейского Севера России: моногр. М.: РГАУ –МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 202 с. [Yashin I.M., Kashanskiy A.D. *Landscape-Geochemical Diagnostics and Genesis of Soils of the European North of Russia*: Monograph. Moscow, RSAU – МТАА Publ., 2015. 202 p.].

21. Chang R., Jin T., Lü Y., Liu G., Fu B. Soil Carbon and Nitrogen Changes Following Afforestation of Marginal Cropland across a Precipitation Gradient in Loess Plateau of China. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, iss. 1, art. e85426. DOI: [10.1371/journal.pone.0085426](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085426)

22. Cukor J., Vacek Z., Linda R., Bílek L. Carbon Sequestration in Soil Following Afforestation of Former Agricultural Land in the Czech Republic. *Central European Forestry Journal*, 2017, vol. 63, iss. 2-3, pp. 97–109. DOI: [10.1515/forj-2017-0011](https://doi.org/10.1515/forj-2017-0011)

23. Enquist B.J., Niklas K.J. Global Allocation Rules for Patterns of Biomass Partitioning in Seed Plants. *Science*, 2002, vol. 295, iss. 5559, pp. 1517–1520. DOI: [10.1126/science.1066360](https://doi.org/10.1126/science.1066360)

24. Gao Y., Tian J., Pang Y., Liu J. Soil Inorganic Carbon Sequestration Following Afforestation Is Probably Induced by Pedogenic Carbonate Formation in Northwest China. *Frontiers in Plant Science*. 2017, vol. 8, art. 1282. DOI: [10.3389/fpls.2017.01282](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01282)

25. Holubík O., Podrázský V., Vopravil J., Khel T., Remeš J. Effect of Agricultural Lands Afforestation and Tree Species Composition on the Soil Reaction, Total Organic Carbon and Nitrogen Content in the Uppermost Mineral Soil Profile. *Soil & Water Research*, 2014, vol. 9(4), pp. 192–200. DOI: [10.17221/104/2013-SWR](https://doi.org/10.17221/104/2013-SWR)

26. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Dynamics of Carbon Pools in Post-Agrogenic Sandy Soils of Southern Taiga of Russia. *Carbon Balance and Management*, 2010, vol. 5, art. 1. DOI: [10.1186/1750-0680-5-1](https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-1)

27. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-Restoration of Post-Agrogenic Sandy Soils in the Southern Taiga of Russia: Soil Development, Nutrient Status, and Carbon Dynamics. *Geoderma*, 2009, vol. 152, iss. 1-2, pp. 35–42. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.05.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014)

28. Kazlauskaitė-Jadzevičienė A., Tripolskaja L., Volungevičius J., Bakšienė E. Impact of Land Use Change on Organic Carbon Sequestration in Arenosol. *Agricultural and Food Science*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 9–17. DOI: [10.23986/afsci.69641](https://doi.org/10.23986/afsci.69641)

29. Li D., Niu S., Luo Y. Global Patterns of the Dynamics of Soil Carbon and Nitrogen Stocks Following Afforestation: A Meta-Analysis. *New Phytologist*, 2012, vol. 195, iss. 1, pp. 172–181. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x)

30. Paul K.I., Polglase P.J., Nyakuengama J.G., Khanna P.K. Change in Soil Carbon Following Afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 168, iss. 1-3, pp. 241–257. DOI: [10.1016/S0378-1127\(01\)00740-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00740-X)

31. Robyn L. Soil Carbon Accumulation during Temperate Forest Succession on Abandoned Low Productivity Agricultural Lands. *Ecosystems*, 2010, vol. 13, no. 6, pp. 795–812.

32. Vesterdal L., Rosenqvist L., Van Der Salm C., Hansen K., Groenenberg B.-J., Johansson M.-B. Carbon Sequestration in Soil and Biomass Following Afforestation: Experiences from Oak and Norway Spruce Chronosequences in Denmark, Sweden and the Netherlands. *Environmental Effects of Afforestation in North-Western Europe*. Ed. by G.W. Heil, B. Muys, K. Hansen. Dordrecht, Springer, 2007, pp. 19–51. DOI: [10.1007/1-4020-4568-9_2](https://doi.org/10.1007/1-4020-4568-9_2)

33. Xiang Y., Cheng M., Huang Y., An S., Darboux F. Changes in Soil Microbial Community and Its Effect on Carbon Sequestration Following Afforestation on the Loess Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, vol. 14, iss. 8, art. 948. DOI: [10.3390/ijerph14080948](https://doi.org/10.3390/ijerph14080948)

34. Zhiyanski M., Glushkova M., Ferezliev A., Menichetti L., Leifeld J. Carbon Storage and Soil Property Changes Following Afforestation in Mountain Ecosystems of the Western Rhodopes, Bulgaria. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2016, vol. 9, iss. 4, pp. 626–634. DOI: [10.3832/ifer1866-008](https://doi.org/10.3832/ifer1866-008)

DYNAMICS OF CARBON STOCKS IN THE FORMATION OF FORESTS ON POST-AGROGENIC LANDS

*Elena N. Nakvasina*¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

*Yuliya N. Shumilova*², Candidate of Geography, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABH-6497-2020](https://orcid.org/0000-0002-6736-0268),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6736-0268>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

²Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: j.shumilova@sevniilh-arh.ru

Abstract. Carbon stocks were calculated in different components of biogeocenosis (soil, living ground cover, forest floor, undergrowth, underbrush and forest stand) using the example of a selected chronosequence of fallows (4 sample areas of different age, yrs: 16, 25, 63 and 130) in the Kargopol district of the Arkhangelsk region (middle taiga subzone, residual carbonate soils). The structure of carbon stocks of the forming plantations and its changes with the fallow age is estimated. It was found that a natural increase in carbon stocks and its redistribution between the soil and the forming phytocenosis occurs in the process of succession during the afforestation of arable lands. In plantations growing on young fallows, more than 86 % of the carbon stock is represented by carbon from the arable soil horizon. During the colonization of the fallow by forest vegetation the share of this pool decreases and already in the middle-aged 63-year-old forest it is 22 %, and in the mature 130-year-old forest it is only 7.6 %. In the structure of the total carbon stock in the middle-aged plantation, the share of the stand reaches 69 %, and in the mature 130-year-old stand it is already 90 %. In plantations on young fallows, the structure of the main components of biogeocenosis (soil carbon, ground cover carbon and tree layer carbon) is characterized by a ratio of 9:1:0, whereas in plantations on old fallows of 63 and 130 years it is 2:0:8 and 1:0:9, respectively. The undergrowth and underbrush of the studied chronosequence are characterized by the small shares of carbon, which do not have a significant value in the structure of the ecosystem carbon pool. Forest floor in forming forest stands contributes significantly to the carbon structure of the biogeocenosis, although the total biogeocenosis carbon pool is 3–4 % and does not contribute to an increase in soil carbon stocks. In the system “soil – forest floor – living ground cover” the share of soil carbon decreases from 91 to 76–77 % with the increase in the age of plantation, while the share of formed forest floor in the middle-aged and mature forest is 16 and 20 %, respectively. In plantations on young fallows the ratio of these components of biogeocenosis is 9:0:1, whereas on old fallows it is 8:2:0. Leaving arable land on residual carbonate soils for self-overgrowth with forest vegetation and formation of forest plantations on them in the middle taiga subzone will lead to a gradual decrease in the carbon pool in the soil, but will contribute to the sequencing of carbon in the phytomass of perennial woody vegetation and in forest floor. These two components of biogeocenosis will serve as a sequenced carbon depot, supporting the biological cycle.

For citation: Nakvasina E.N., Shumilova Yu.N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

Acknowledgements: The research was partially supported by RFBR and the Government of the Arkhangelsk region, grant No. 17-44-290111 and is based on descriptions of the sample areas included in the database of the Department of Forestry and Forest Management of NArFU.

Keywords: fallows, post-agrogenic forests, chronosequence, carbon stocks, biogeocenosis components, soil, stand, forest floor.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 12.11.19 / Received on November 12, 2019

УДК 630*260:581.55(470.620)

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-60-68

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕСОВОДСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

Н.В. Примаков^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

¹Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, Россия, 350040; e-mail: nik-primakov@yandex.ru

²Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044; e-mail: nik-primakov@yandex.ru

Аннотация. Современные полезащитные насаждения Краснодарского края не в полной мере защищают пашню и имеют чаще всего различное санитарное состояние. В этих условиях сохранение лесных полос, выполнение ими защитных функций в системе агролесомелиоративных и других комплексных мероприятий остается актуальной задачей. Исследования проведены в основных и вспомогательных полезащитных лесных полосах, расположенных в границах Усть-Лабинского района Краснодарского края, где с использованием общепринятых методик закладывались временные пробные площади. Целью исследований являлось определение экологического состояния полезащитных лесных полос посредством выявления их сохранности и осуществления лесоводственно-мелиоративной оценки. Для получения более полной информации об их состоянии была проведена дистанционная оценка сохранности древесного полога полезащитных насаждений. Анализ состояния лесополос показал, что около 42,5 % площади обследованных на ключевых участках насаждений имеют среднюю степень сохранности древесного полога, высокую – 22,3 %, низкую и очень низкую – 35,2 %. Более низкие показатели сохранности отмечаются во вспомогательных полезащитных лесных полосах. Процентное участие каждой группы лесополос позволило ранжировать диапазоны сохранности, соответствующие определенной лесоводственно-мелиоративной оценке: диапазон сохранности древесного полога от 0 до 25 % – оценка 1, от 25 до 50 % – 2, от 50 до 70 % – 3, от 70 до 100 % – 4. Исходя из этого, полезащитные насаждения были разделены нами на 4 группы: норма, риск, кризис и бедствие. Результаты определения экологического состояния полезащитных лесных полос наземными и дистанционными методами в условиях Усть-Лабинского района Краснодарского края показали, что значительная часть обследованных насаждений имеет плотную конструкцию и требует проведения лесоводственных уходов. Группе полезащитных лесных полос «бедствие» необходима реконструкция, она позволила бы значительно улучшить их экологическое состояние и мелиоративную эффективность, а также повысить срок службы.

Для цитирования: Примаков Н.В. Изменчивость лесоводственных характеристик полезащитных лесных насаждений Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 60–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-60-68

Ключевые слова: полезащитные лесные полосы, лесоводственно-мелиоративная оценка, санитарная оценка, степень сохранности, конструкция лесополос, дистанционная оценка, экологическое состояние.

Введение

В последние десятилетия в лесоаграрных ландшафтах областей и краев России все более актуальной становится проблема ухудшения состояния и сохранности защитных лесных насаждений, утраты ими способности оказывать эффективное эколого-мелиоративное воздействие на агроэкосистемы [1, 3, 12–14].

В Краснодарском крае в настоящее время насчитывается около 150,0 тыс. га защитных лесных полос, из них 120,1 тыс. га – полезащитные [4]. Современные насаждения не в полной мере защищают пашню и чаще всего имеют различное санитарное состояние. В этих условиях сохранение лесных полос, выполнение ими защитных функций в системе агролесомелиоративных и других комплексных мероприятий остается задачей номер один [2, 7, 14–18]. В настоящее время земли, занятые полезащитными лесными полосами, не имеют собственника, т. е. никому не принадлежат [12]. На межполосных полях наблюдается ухудшение экологической обстановки, что приводит к развитию неблагоприятных явлений (эрозия, дефляция, дегумификация и др.) [11, 19, 20].

Цель исследования – уточнение экологического состояния полезащитных лесных полос в пределах Усть-Лабинского р-на Краснодарского края посредством выявления их сохранности и проведения лесоводственно-мелиоративной оценки.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являлись основные и вспомогательные полезащитные лесные полосы на трех ключевых агролесоландшафтных участках вблизи пос. Двубратский, станиц Некрасовская и Воронежская, расположенных в юго-восточном, северо-восточном и западном направлениях от муниципального центра г. Усть-Лабинск Усть-Лабинского р-на Краснодарского края.

Перед выбором объектов исследования было проведено рекогносцировочное обследование, а затем определены типичные места их расположения. При этом в лесных полосах закладывали временные пробные площади, ориентируясь на стандартную методику [5], исходя из требования наличия на них не менее 200 деревьев основной породы. Методом сплошного перечета определяли количество стволов, происхождение главных и встречающихся древесных и кустарниковых пород, вид лесополос и их состав, по данным таксации – средние диаметр и высоту растений. Плотность конструкций защитных лесных насаждений оценивали в облиственном состоянии фотооптическим методом, санитарное состояние деревьев – по шкале Санитарных правил в лесах Российской Федерации [10]. К 1-й категории отнесены деревья без признаков ослабления; 2-й – ослабленные в результате засух, пожаров, фито- и энтомофитовредителей (в кроне отмечаются отдельные сухие ветви); 3-й – сильно ослабленные (сухих ветвей до 50 %); 4-й – усыхающие (сухих ветвей более 50 %, деревья часто суховершинят); 5-й – сухостой текущего года; 6-й – сухостой прошлых лет. Данные дистанционного зондирования сохранности полезащитных лесных полос определялись при помощи геоинформационной системы ArcGIS.

Результаты исследования и их обсуждение

На каждом из подобранных ключевых участков оценивалось экологическое состояние полезащитных лесных полос по ряду показателей. В табл. 1 приведена краткая характеристика лесополос по ключевым участкам исследований.

Главными древесными породами в основных и вспомогательных полезащитных лесных полосах вблизи пос. Двубратский являются гледичия трехколочковая (*Cleditsia triacanthos*), ясень ланцетный (зеленый) (*Fraxinus lanceolata*) и обыкновенный (*Fraxinus excelsior*). Встречаются также орех грецкий (*Juglans regia*), абрикос обыкновенный (*Armeniaca vulgaris*) и кустарник терн (слива колючая) (*Prunus spinosa*). Средняя высота этих насаждений варьирует от 3,5 до 5,7 м, средний диаметр стволов – от 27,5 до 39,4 см. Конструкция основных

полезащитных лесных полос на исследуемых участках – плотная, они состоят из 4-5 рядов, вспомогательных 1-рядных лесополос – продуваемая. Протяженность лесных полос варьирует от 1,70 до 2,73 км.

Таблица 1

Краткая характеристика полеззащитных лесных полос по ключевым участкам исследований в Усть-Лабинском р-не

№ лесополосы	Растение	Конструкция лесополосы, ее координаты	R	H, м	D, см	СО	ЛМО	L, км
<i>Основные полеззащитные лесные полосы (пос. Двубратский)</i>								
1	<i>Cleditsia triacanthos</i> , <i>Fraxinus lanceolata</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Juglans regia</i>	Плотная, 45°26'53" с. ш. 39°80'37" в. д.	4	5,5	37,5	III	3	2,62
2	<i>Cleditsia triacanthos</i> , <i>Fraxinus lanceolata</i> , <i>Juglans regia</i> , <i>Armeniaca vulgaris</i>	Плотная, 45°26'89" с. ш. 39°81'23" в. д.	4	5,7	39,4	II	2-3	2,66
3	<i>Cleditsia triacanthos</i> , <i>Fraxinus lanceolata</i> , <i>Juglans regia</i>	Плотная, 45°27'21" с. ш. 39°82'01" в. д.	5	5,3	35,6	III	3	2,73
<i>Вспомогательные полеззащитные лесные полосы (там же)</i>								
4	<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Cleditsia triacanthos</i>	Продуваемая, 45°26'55" с. ш. 39°80'36" в. д.	1	3,5	27,5	IV	1-2	1,70
<i>Основные полеззащитные лесные полосы (ст-ца Некрасовская)</i>								
1	<i>Quercus robur</i> , <i>Fraxinus lanceolata</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Prunus cerasifera</i> , <i>Prunus spinosa</i>	Плотная, 45°17'02" с. ш. 39°73'67" в. д.	4	5,2	32,5	III	2	1,80

Окончание табл. 1

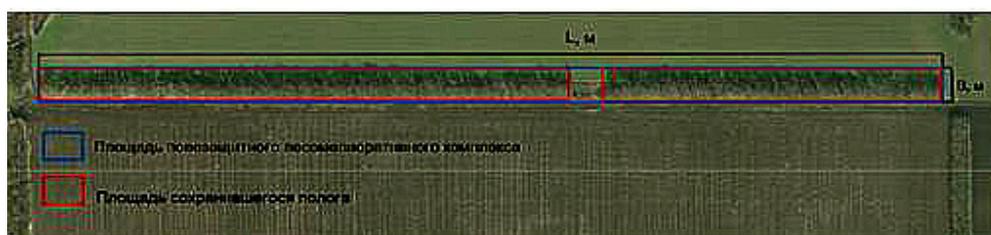
№ лесополосы	Растение	Конструкция лесополосы, ее координаты	R	H, м	D, см	СО	ЛМО	L, км
2	<i>Quercus robur</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Swida sanguinea</i> , <i>Prunus cerasifera</i>	Плотная, 45°16'43" с. ш. 39°74'24" в. д.	4	5,0	36,4	II	2-3	1,98
3	<i>Quercus robur</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Swida sanguinea</i> , <i>Prunus cerasifera</i>	Плотная, 45°17'51" с. ш. 39°73'02" в. д.	4	5,3	31,6	IV	2	1,69
<i>Вспомогательные полезащитные лесные полосы (там же)</i>								
4	<i>Fraxinus lanceolata</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Prunus cerasifera</i> , <i>Swida sanguinea</i>	Плотная, 45°17'53" с. ш. 39°73'10" в. д.	4	4,7	29,5	IV	2	1,67
<i>Основные полезащитные лесные полосы (ст-ца Воронежская)</i>								
1	<i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>	Продуваемая, 45°19'09" с. ш. 39°51'61" в. д.	4	5,5	31,5	II	3	1,87
2	<i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>	Продуваемая, 45°18'39" с. ш. 39°50'33" в. д.	4	5,1	29,4	III	3	2,35
3	<i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>	Продуваемая, 45°18'46" с. ш. 39°50'95" в. д.	4	5,3	32,6	III	3	1,52
<i>Вспомогательные полезащитные лесные полосы (там же)</i>								
4	<i>Fraxinus excelsior</i>	Продуваемая, 45°20'80" с. ш. 39°51'62" в. д.	4	5,0	44,5	IV	1-2	0,83

Примечание: R – число рядов; H – средняя высота; D – средний диаметр; СО – санитарная оценка; ЛМО – лесоводственно-мелиоративная оценка; L – протяженность лесополосы.

Главной породой в полевых защитных лесных полосах в районе ст-цы Некрасовская является дуб черешчатый (*Quercus robur*), который занимает основную долю от всего породного состава лесных насаждений. Также здесь встречаются ясень ланцетный, ясень обыкновенный, клен полевой (*Acer campestre*), робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia*), алыча, или слива растопыренная (*Prunus cerasifera*), абрикос обыкновенный (*Armeniaca vulgaris*), а из кустарников – свидина кроваво-красная (*Swida sanguinea*). Средняя высота этих растений варьирует от 4,7 до 5,3 м, а средний диаметр стволов – от 29,5 до 36,4 см. Четырехрядные полевые защитные лесные насаждения на обследованном участке характеризуются плотной конструкцией. Протяженность лесополос варьирует от 1,67 до 1,98 км.

Главной древесной породой полевых защитных лесных насаждений вблизи ст-цы Воронежская являются робиния лжеакация и ясень обыкновенный. Средняя высота этих древесных пород варьирует от 5,0 до 5,5 м при среднем диаметре стволов от 29,4 до 44,5 см. Конструкция полевых защитных лесных насаждений на исследуемом участке – продуваемая. Протяженность лесополос изменяется от 0,83 до 2,35 км.

Для получения более полной информации о состоянии основных и вспомогательных лесных полос проведена дистанционная оценка сохранности их древесного полога при помощи геоинформационной системы ArcGIS (см. рисунок).



Дистанционная оценка сохранности древесного полога полевых защитных лесных полос (система ArcGis): L – длина лесной полосы, м; B – ширина лесной полосы, м

Remote assessment of the tree canopy integrity of forest shelterbelts (ArcGis):
 L – forest shelterbelt length, m; B – forest shelterbelt width, m

К лесополосам, имеющим высокую степень сохранности, относят лесополосы с сохранностью древесного полога 75...100 % от их общей площади, к имеющим среднюю степень сохранности – с сохранностью полога 50...75 %, низкую степень сохранности – с сохранностью полога 25...50 %, очень низкую степень сохранности – с сохранностью древесного полога менее 25 %.

Результаты дистанционной оценки сохранности древесного полога основных и вспомогательных лесных полос отражены в табл. 2.

Из анализа дистанционной оценки сохранности древесного полога основных полевых защитных лесных насаждений следует, что около 42,5 % площади обследованных лесополос имеют среднюю степень сохранности, высокую – 22,3 %, низкую и очень низкую – в совокупности 35,2 %. Дистанционная оценка сохранности древесного полога вспомогательных полевых защитных лесных насаждений на ключевых участках показала, что около 38,0 % из них имеют среднюю степень

сохранности полога, высокую – 21,2 %, низкую и очень низкую – 41,0 % обследованных насаждений.

Сопоставление результатов проведенных по шкале Е.С. Павловского [6] камеральных и полевых исследований полезационных лесных полос и дистанционных данных по их сохранности [8] позволило получить усредненные результаты для более точной экологической оценки этих лесополос.

Таблица 2

Дистанционная оценка сохранности древесного полога основных и вспомогательных полезационных лесных полос

Место наблюдения	Сохранность полога лесополос, га/%				Общая площадь лесополос, га/%
	высокая	средняя	низкая	очень низкая	
<i>Основные полезационные лесные полосы</i>					
пос. Двубратский	38,67/30,22	51,22/40,03	28,06/21,93	10,02/7,83	127,00/100
ст-ца Некрасовская	9,63/10,23	36,98/39,30	30,40/32,31	17,08/18,15	94,09/100
ст-ца Воронежская	24,39/23,39	50,36/48,30	22,24/21,33	7,28/6,98	104,27/100
<i>Всего</i>	<i>72,69/22,27</i>	<i>138,56/42,46</i>	<i>80,70/24,73</i>	<i>34,38/10,54</i>	<i>326,33/100</i>
<i>Вспомогательные полезационные лесные полосы</i>					
пос. Двубратский	11,69/19,66	21,08/35,45	16,31/27,43	10,38/17,47	59,47/100
ст-ца Некрасовская	13,02/23,23	23,02/41,08	12,61/22,50	7,39/13,19	56,04/100
ст-ца Воронежская	13,25/20,83	23,60/37,10	15,25/23,97	11,52/18,11	63,62/100
<i>Всего</i>	<i>37,96/21,19</i>	<i>67,70/37,79</i>	<i>44,17/24,66</i>	<i>29,30/16,36</i>	<i>179,13/100</i>

Процентное участие каждой группы лесополос позволило ранжировать диапазоны сохранности, характерные для определенной ЛМО: диапазону от 0 до 25 % соответствует ЛМО 1, от 25 до 50 % – 2, от 50 до 70 % – 3, от 70 до 100 % – 4. Исходя из этого, полезационные насаждения были разделены на 4 группы [9]:

к группе нормы были отнесены насаждения с ЛМО 3 и 4 с высокой сохранностью (76...100 %) числа древесных пород;

к группе риска – с ЛМО 2 и 3 со средней (51...75 %) сохранностью числа древесных пород;

к группе кризиса – с ЛМО 1 и 2 с низкой (25...50 %) сохранностью числа древесных пород;

к группе бедствия – с ЛМО 1 и 2 с сохранностью числа древесных пород менее 25 %.

В результате отсутствия своевременных лесохозяйственных уходов 43,0 % обследованных основных лесных полос находятся в группе риска, 24,7 % – в группе кризиса, 10,5 % – в группе бедствия. Среди вспомогательных лесных полос 37,8 % относятся к группе риска, 24,7 % – к группе кризиса, 16,4 % – в группе бедствия.

Заключение

Полученные результаты определения экологического состояния полезащитных лесных полос наземными и дистанционными методами в условиях Усть-Лабинского р-на Краснодарского края показывают, что значительная часть обследованных насаждений имеет плотную конструкцию и для формирования агрономически эффективной конструкции требуется проведение в них лесоводственных уходов. Группе лесополос бедствия необходима реконструкция, которая позволила бы значительно улучшить экологическое состояние и мелиоративную эффективность, а также повысить срок службы систем полезащитных лесных полос этого района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грибачева О.В. Современное состояние полезащитной полосы с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клена остролистного (*Acer platanoides* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 34–44. [Gribacheva O.V. The Current State of the Shelterbelt Featuring English Oak (*Quercus robur* L.) and Norway Maple (*Acer platanoides* L.). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 34–44]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.4.34](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.34), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/0b4/34_44.pdf
2. Ивонин В.М., Танюкевич В.В., Лобов Н.Е. Адаптивная лесомелиорация степных агроландшафтов / под ред. В.М. Ивонина. Новочеркасск: Новочеркас. гос. мелиоратив. акад., 2009. 284 с. [Ivonin V.M., Tanyukevich V.V., Lobov N.E. *Adaptive Forest Reclamation of Steppe Agricultural Landscapes*. Ed. by V.M. Ivonin. Novocherkassk, NGMA Publ., 2009. 284 p.]
3. Корнеева Е.А. Лесная мелиорация как фактор устойчивого развития агропроизводства в Волгоградской области // АПК: Экономика, управление. 2019. № 6. С. 55–63. [Korneeva E.A. Forest Melioration Is as a Factor of Sustainable Development of Agroproduction in the Volgograd Region. *АПК: Экономика, управление*, 2019, no. 6, pp. 55–63]. DOI: [10.33305/196-55](https://doi.org/10.33305/196-55)
4. Нагалеvский Э.Ю. Экономико-географические аспекты развития сельскохозяйственных систем мелиорации в разных типах ландшафтов Краснодарского края: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 2004. 24 с. [Nagalevskiy E.Yu. *Economic and Geographical Aspects of Development of Agricultural Land Reclamation Systems in Different Types of Landscapes of Krasnodar Krai*: Cand. Geogr. Sci. Diss. Abs. Krasnodar, 2004. 24 p.]
5. ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1983. 60 с. [*Industry Standard. OST 56-69–83. Forest Inventory Testing Areas. Laying out Method*. Moscow, TsBNTI Gosleskhoza SSSR Publ., 1983. 60 p.]
6. Павловский Е.С. Устройство агролесомелиоративных насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 128 с. [Pavlovskiy E.S. *Arrangement of Agroforestry Plantations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 128 p.]
7. Примаков Н.В. Почвопреобразующее воздействие лесных насаждений степной зоны. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2007. 171 с. [Primakov N.V. *Soil-Forming Effect of Forest Plantations in the Steppe Zone*. Rostov-on-Don, SFeDU Publ., 2007. 171 p.]
8. Родимцева А.В., Несват А.П. Дистанционная и лесоводственно-мелиоративная оценка полезащитных лесных полос Урало-Сакмарского междуречья // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2017. № 6(68). С. 73–77. [Rodimtseva A.V., Nesvat A.P. Distant and Forestry-Meliorative Evaluation of Field-Protecting Shelter-Belts of the Ural-Sakmara Mezhdurechye. *Izvestiya Orenburgskogo agrarnogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestia Orenburg State Agrarian University], 2017, no. 6(68), pp. 73–77].

9. Рулев А.С., Юферев В.Г., Кошелев А.В. Картографирование состояния защитных лесных насаждений по аэрокосмоснимкам // Роль и место агролесомелиорации в современном обществе: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию ВНИИ агролесомелиорации, г. Волгоград, 10–13 окт. 2006 г. Волгоград: Изд-во ВНИИАЛМИ, 2007. С. 250–260. [Rulev A.S., Yuferev V.G., Koshelev A.V. Mapping of Protective Forests by Aerospace Images. *Role and Place of Land and Forest Reclamation in Modern Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of the All-Russian Scientific Research Institute of Agroforestry, Volgograd, October 10–13, 2006*. Volgograd, VNIIALIMI Publ., 2007, pp. 250–260].

10. Санитарные правила в лесах Российской Федерации: утв. Федер. службой лесн. хоз-ва России 15.01.98. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 25 с. [*Sanitary Rules in the Forests of the Russian Federation: Approved by the Federal Forestry Agency Dated January 15, 1998*. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 1998. 25 p].

11. Сауткина М.Ю., Чевердин Ю.И. Микробиологическая оценка состояния почвенного покрова агролесомелиоративных ландшафтов Каменной Степи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 62–78. [Sautkina M.Yu., Cheverdin Yu.I. Microbiological Analysis of the Soil Cover of the Kamennaya Steppe Agroforestry Landscapes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 62–78]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.6.62](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.62), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/9db/62_78.pdf

12. Сучков Д.К. Инвентаризация полевых защитных лесных полос в х. Троицкий Михайловского района Волгоградской области // Науч.-агрон. журн. 2019. № 2. С. 24–26. [Suchkov D.K. Inventory of Forest Protection Belts in the Trinity Village, Mikhaylovsky District, Volgograd Region. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* [Scientific and agronomic journal], 2019, no. 2, pp. 24–26].

13. Турусов В.И., Чеканьшин А.С., Лепёхин А.А. Опыт реконструктивных рубок в лесных полосах Каменной Степи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 48–56. [Turusov V.I., Chekanyshkin A.S., Lepikhin A.A. Experience of the Reconstruction Cutting in the Forest Belts of Kamennaya Steppe. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 48–56]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.5.48](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.48), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d9e/48_56.pdf

14. Concha J.Y., Alegre J.C., Pocomucha V. Determination of Carbon Reservations in the Aerial Biomass of Agroforestry Systems of *Theobroma cacao* L. in the Department of San Martin, Peru. *Ecologia Aplicada*, 2007, vol. 6(1-2), pp. 75–82.

15. Kark S., van Rensburg B.J. Ecotones: Marginal or Central Areas of Transition? *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 2006, vol. 52, iss. 1, pp. 29–53. DOI: [10.1560/IJEE.52.1.29](https://doi.org/10.1560/IJEE.52.1.29)

16. Mize C., Brondle J. Native Shelterbelts. *Ecology*, 1999, vol. 48, pp. 27–54.

17. Puddu G., Falcucci A., Maiorano L. Forest Changes over a Century in Sardinia: Implications for Conservation in a Mediterranean Hotspot. *Agroforestry Systems*, 2012, vol. 85, no. 3, pp. 319–330. DOI: [10.1007/s10457-011-9443-y](https://doi.org/10.1007/s10457-011-9443-y)

18. Ritter E., Vesterdal L., Gundersen P. Afforestation of Former Intensively Managed Soils. *Effects of Afforestation on Ecosystems, Landscape and Rural Development: Proceedings of the AFORNORD Conference, Reykholt, Iceland, June 18–22, 2005*. Copenhagen, Nordic Council of Ministers, 2007, pp. 187–188.

19. Sparovek G., Barretto A.G.O.P., Matsumoto M., Berndes G. Effects of Governance on Availability of Land for Agriculture and Conservation in Brazil. *Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 49, iss. 17, pp. 10285–10293. DOI: [10.1021/acs.est.5b01300](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01300)

20. Waring R.H., Schlesinger W.H. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. London, Academic Press, 1985. 340 p.

VARIABILITY OF SILVICULTURAL CHARACTERISTICS OF FOREST SHELTERBELTS IN KRASNODAR KRAI

Nikolay V. Primakov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

¹Kuban State University, ul. Stavropol'skaya, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation; e-mail: nik-primakov@yandex.ru

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, ul. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation; e-mail: nik-primakov@yandex.ru

Abstract. Modern shelterbelts of Krasnodar Krai do not fully protect arable land and often have different sanitary state. Under these conditions, the preservation of forest shelterbelts and their protective functions in the system of agroforestry and other complex continues to be relevant. The research was carried out in the main and auxiliary forest shelterbelts within the boundaries of the Ust-Labinsk district of Krasnodar Krai. The purpose of the research was to determine the ecological state of the forest shelterbelts by identifying their integrity and implementation of forestry and land reclamation assessment. In order to obtain more complete information on their state, a remote assessment of the tree canopy integrity of the shelterbelts was carried out. It follows from the remote assessment analysis that about 42.5 % of the area surveyed in the key plots of plantations has an average degree of integrity of tree canopy, high – 22.3 %, low and very low – 35.2 %. Lower indicators of the tree canopy integrity are observed in the auxiliary forest shelterbelts. The percentage participation of each group of forest shelterbelts allowed us to rank the ranges of integrity corresponding to a certain forestry and land reclamation assessment (units). The range of the tree canopy integrity from 0 to 25 % corresponds to grade 1, from 25 to 50 % – 2, from 50 to 70 % – 3, from 70 to 100 % – 4. Based on this, the shelterbelts were divided into 4 groups: norm, risk, crisis and disaster. The results of determining the ecological state of the forest shelterbelts by ground and remote methods in the Ust-Labinsk district of Krasnodar Krai showed that a significant part of the surveyed plantations has a dense structure and requires silvicultural care. The group of the forest shelterbelts “disaster” needs reconstruction. This will significantly improve the environmental condition and reclamation efficiency, as well as increase the service life of the systems of forest shelterbelts.

For citation: Primakov N.V. Variability of Silvicultural Characteristics of Forest Shelterbelts in Krasnodar Krai. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 60–68. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-60-68

Keywords: forest shelterbelts, forestry and land reclamation assessment, sanitary assessment, degree of integrity, shelterbelt design, remote assessment, ecological state.

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

Поступила 07.10.19 / Received on October 7, 2019

УДК 630*181.65:630*174.754

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81

РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*Pinus sylvestris* L.) ПРИ ИНГИБИРОВАНИИ

В.П. Иванов, д-р биол. наук, проф.; *ResearcherID:* [G-7378-2019](https://orcid.org/0000-0002-4997-5576),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4997-5576>

С.И. Марченко, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID:* [G-7754-2019](https://orcid.org/0000-0001-5107-6839),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5107-6839>

Д.И. Нартов, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID:* [G-7725-2019](https://orcid.org/0000-0001-6886-5914),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6886-5914>

Л.П. Балухта, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID:* [ABE-1507-2020](https://orcid.org/0000-0003-4003-6705),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4003-6705>

Брянский государственный инженерно-технологический университет, ул. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: ivpinfo@mail.ru

Аннотация. Прогнозирование процессов роста деревьев важно в связи с исключительной экосистемной ролью лесов, осуществляющих глобальную регуляцию климата за счет поглощения углерода, сохранения питьевой воды, обеспечения среды обитания для живых организмов. Известно, что деревья реагируют на любые колебания внешней среды. Цель исследования – выявление погодно-климатических факторов, существенно влияющих на ингибирование роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях постоянного дефицита влаги. Исследования проводились в восточной части Брянской области на территории Брянского административного района – в Учебно-опытном лесхозе Брянского государственного инженерно-технологического университета и Стяжновском участковом лесничестве. Методами дендрохронологии оценивалась реакция 93 деревьев сосны на колебания внешней среды по изменению ширины годичных колец (доступного анатомического признака дерева) с использованием индексов радиальных приростов. Предложен оригинальный подход к анализу причин резкого спада годичного радиального прироста под влиянием температур и осадков. Выявлены годы с аномально низкими приростами (1963, 1972, 1985, 2002, 2010 гг.) на фоне погодно-климатической ситуации за 5 лет до и после падения прироста. Установлена сходная динамика абсолютных значений радиальных приростов и их индексов, что обусловлено колебаниями природных факторов, проявлением наследственных признаков и т. д. Отмечены существенные различия между показателями прироста при средних многолетних значениях температур воздуха января, мая и августа и аналогичными показателями в годы аномально низких радиальных приростов, которые наблюдаются у сосны на фоне более холодного января и более теплых мая и августа текущего года, а также при условии более теплого января предыдущего года. При этом значимой роли осадков не выявлено. Полученная информация, расширяющая представление об особенностях ростовых процессов и формирования годичных приростов по диаметру сосны обыкновенной в условиях изменяющегося климата на рубеже XX–XXI вв., позволила высказать предположение о возможном проявлении физиологических особенностей вида, зона оптимума гомеостаза которого находится в условиях более холодного бореального климата.

Для цитирования: Иванов В.П., Марченко С.И., Нартов Д.И., Балухта Л.П. Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при ингибировании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 69–81. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ № 16-14-10224 по теме: «Физиологические и молекулярные механизмы адаптации хвойных растений к засухе».

Ключевые слова: сосна обыкновенная, радиальный прирост, ингибирование роста, дендрохронология, погодно-климатические аномалии.

Введение

Глубокое понимание механизмов процесса роста деревьев и его прогнозирование важны в связи с исключительной экосистемной ролью лесов – глобального регулятора климата. Они осуществляют эту функцию посредством поглощения углерода, сохранения питьевой воды, обеспечения среды обитания для многих видов организмов. В то же время леса становятся особенно чувствительны к изменениям климата, регистрируемым в XXI в. [11, 17, 18].

Деревья реагируют на любые колебания внешней среды, что проявляется в изменении ширины годичного кольца – хорошо выраженного и легко доступного анатомического признака. Деревья, испытавшие воздействие различных факторов, имеют одинаковый порядок чередования широких и узких годичных слоев, причем узкие кольца указывают на годы засух и иные ограничительные факторы роста, широкие – на благоприятные годы [1, 3, 9, 14].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – один из основных лесообразователей – особенно ценна для проведения дендрохронологических исследований. Она образует много форм в пределах популяции на обширной территории Евразии, где широко проявляются ее морфологические, биологические, эколого-физиологические особенности и лесоводственные свойства. Рост и продуктивность древостоев весьма изменчивы под влиянием почвенно-климатических условий в различных географических районах. Например, отдельные авторы прогнозируют во второй половине XXI в. возможное ингибирование роста деревьев в лесах западной части Северной Америки (до 70 %) по сравнению с первой половиной XX в. [12], что актуально и для европейских лесов в связи с начавшимися климатическими изменениями.

Годичный прирост деревьев зависит от множества внешних и внутренних факторов: вида, наследственных свойств, возраста, условий местопроизрастания дерева, сроков плодоношения, климата, солнечной радиации, стихийных явлений, взаимного затенения, охлестывания крон, химических выделений корневых систем (аллелопатия) и др. Принято считать, что на ширину годичного кольца влияют два ведущих фактора: изменение возраста дерева и погодно-климатические условия. Иногда под влиянием антропогенных и биогенных факторов (рубки, мелиорация, энтомо- и фитовредители, плодоношение и т. д.) классические максимумы радиального прироста искажаются. В крайне неблагоприятных условиях у деревьев могут выпадать годичные кольца или образовываться очень узкие кольца, ширина которых ближе к сердцевине часто не подчиняется линейной зависимости [1, 6, 7, 15, 16].

Известны результаты исследований изменчивости факторов внешней среды, стимулирующих интенсивность прироста древесных растений. В начале вегетационного периода она зависит от дневной температуры воздуха, в середине периода – от термического режима ночи, а в конце – от дефицита влаги в воздухе и влажности почвы. Надежные прогнозы и лучшее понимание комплекса факторов, влияющих на рост отдельных деревьев, могут быть получены путем интеграции данных нескольких источников с дополнительной информацией [14].

Некоторые авторы [19] отмечают связь интенсивности формирования репродуктивных органов в отдельные годы со снижением величины радиальных приростов, так как пластические вещества в большем количестве расходуются на формирование органов размножения, т. е. цветение ограничивает прирост древесины в том же году.

Ю.П. Демаков и Н.В. Андреев [2] считают, что текущий прирост у многих деревьев тесно связан с приростом предшествующего года. Наличие данной связи свидетельствует, что колебания прироста могут происходить и под действием внутренних факторов. Текущие условия среды оказывают лишь модифицирующее воздействие, а значительные нарушения собственного ритма роста дерева происходят только в годы с погодными аномалиями. Интересный вывод делает Г.Г. Хамидулина с соавторами [11, с. 14]: «...температура воздуха и осадки на местности – это независимые переменные, отдельно взятый климатический фактор не оказывает существенного влияния на рост сосны, и только совместное сочетание 2-х параметров – температуры и осадков, играет ведущую роль в ее ростовых процессах».

Реакция деревьев на одинаковые изменения внешних условий неоднозначна и, наоборот, разные воздействия могут проявляться идентично. Годичный прирост сосны варьирует в значительных пределах: прирост верхушечного побега – от 1 до 90 см, ширина годичных колец – от 0,05 до 15 мм, что указывает на высокую отзывчивость вида на изменения условий среды и значительную экологическую пластичность. Различия возрастного тренда приводят к дифференциации размеров деревьев, и в течение жизни они не сохраняют своего рангового положения в ценозе. Различия в реакции деревьев на изменение условий среды затрудняют оценку зависимости прироста от метеофакторов, поэтому часто используют индексы прироста, которые изменяются в значительных пределах более информативны для оценки, хотя средняя величина индекса ширины годичных колец варьируется во времени весьма специфически [2].

Сопоставление данных об изменчивости метеоэлементов за отдельные месяцы позволяет приближенно судить о степени их влияния на отложение ранней и поздней древесины и, как следствие, формирование годичного прироста. Метеофакторы, существенно влияющие на образование ранней и поздней древесины в отдельности, еще не определены [8].

Некоторые исследователи отмечают отрицательную корреляцию радиального прироста с температурой января, объясняя ситуацию ускорением физиологических процессов в деревьях в условиях теплой зимы, большим расходом питательных веществ, чем в холодные зимы, что отражается на приросте древесины в вегетационный период. Известна положительная связь прироста ранней древесины сосны с температурами воздуха в декабре предшествующего года и марте текущего года. Анализ научной информации, выполненный О.Н. Соломиной с соавторами [10], выявил ряд факторов, ограничивающих рост сосны, среди которых выделяется высокая температура начала лета. В лесостепи основным фактором, влияющим на прирост сосны, является сумма осадков с апреля по октябрь, причем сильные засухи (1939, 1972 и 2010 гг.) наблюдались только после 2–3 лет с дефицитом осадков и высокими температурами воздуха. Глубокие минимумы прироста отмечены в 1939–1940, 1949, 1972–1973,

1995–1996 гг. [9]. Известен тот факт, что у сосны в большей степени заметен эффект «замедленного действия», т. е. неблагоприятные условия в данное лето могут сказаться на ширине годовых колец в следующий год или последующие годы [5, 7].

Поиск климатических и иных факторов, влияющих на динамику радиальных приростов древесных растений, продолжается, и к настоящему времени вопрос остается открытым. Рост отдельных деревьев зависит от их размера, особенностей на популяционном и индивидуальном уровнях развития, климата, абсолютной полноты насаждений, антропогенных и биогенных воздействий, почвенно-грунтовых условий и т. д. [4, 14]. Необходимо продолжение разносторонних исследований различных древесных видов для получения объективных результатов в области дендрохронологии.

Цель работы – выявление погодно-климатических факторов, оказывающих существенное влияние на ингибирование роста сосны обыкновенной, произрастающей при постоянном дефиците влаги на территории Брянского лесного массива; а также изучение радиальных приростов в годы их минимального проявления (1963, 1972, 1985, 2002, 2010 гг.) и особенностей погодно-климатической ситуации в течение 5 предыдущих и 5 последующих лет.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на 6 участках, расположенных в восточной части Брянской области на территории Брянского административного р-на – в Учебно-опытном лесхозе Брянского государственного инженерно-технологического университета и в Стыжновском участковом лесничестве ГКУ Брянской области «Брянское лесничество», на которых были заложены временные пробные площади. Объекты находятся в зоне хвойно-широколиственных лесов левобережья р. Десна, на территории Брянского лесного массива.

Природно-климатические условия района исследований благоприятны для произрастания высокопродуктивных чистых и смешанных насаждений сосны обыкновенной. В работе использованы средневозрастные древостои на участках со слабовыраженным микрорельефом и постоянным гидрологическим режимом, связанным с преимущественным поступлением влаги весеннего снеготаяния и затяжных дождей. Преобладающие типы лесорастительных условий – A_1 и A_2 , признаков болезней и вредителей леса в древостоях не отмечено.

На каждом участке у 15-16 учетных деревьев были отобраны керны древесины с использованием возрастных буров Пресслера для анализа динамики радиального прироста и его корреляции с погодными условиями прошлых лет (по данным Брянской метеостанции). Всего проанализированы результаты измерений радиальных приростов у кернов 93 учетных деревьев сосны обыкновенной.

После зачистки (для лучшего проявления границ радиальных приростов) и сканирования кернов древесины с использованием компьютерных технологий измерена ширина годовых колец с точностью $\pm 0,1$ мм. Затем проведено перекрестное датирование каждого радиального прироста методом экспертных оценок (с учетом общего мнения трех исследователей, каждый из которых выполнял процедуру датирования индивидуально). Выпадающих колец и двойных приростов за один год при анализе полученных результатов не выявлено.

Математическая обработка данных, выполненная средствами Excel, включала: формирование дендрохронологического ряда; выявление возрастного тренда (использовали полиномы не выше 4-й степени); расчет индексов радиальных приростов и основных статистических показателей; определение закономерностей изменчивости радиальных приростов с динамикой абиотических факторов. Существенность различий средних величин оценивали с использованием критерия Стьюдента для доверительных уровней $p = 0,05; 0,01; 0,001$.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании анализа средних радиальных приростов сосны обыкновенной за последние 60 лет (рис. 1) были выявлены годы с аномально низкими его значениями (1963, 1972, 1985, 2002, 2010 гг.), в которые наблюдалось падение величины радиального прироста ниже нормы у большинства деревьев (их доля – 65,2...81,7 % выборки). В работе впервые использован оригинальный подход к анализу причин резкого спада годичного радиального прироста сосны обыкновенной под влиянием погодных факторов – температуры и осадков. Изучена погодно-климатическая ситуация в течение 5 лет до падения прироста и дополнительно проанализирован рост по диаметру в течение последующих 5 лет (рис. 2). Следует отметить, что радиальный прирост на протяжении предшествующих аномальным событиям 5 лет не был одинаковым и варьировал в пределах 1,2...2,3 мм.

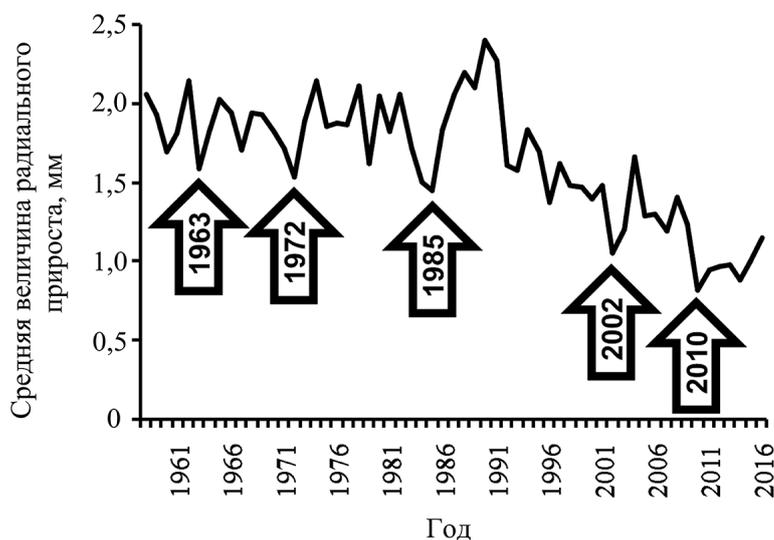


Рис. 1. Годы с аномально низкими приростами сосны обыкновенной

Fig. 1. Years with abnormally low growth rates of Scots pine

Казалось бы, ситуацию с ингибированием прироста можно объяснить погодно-климатическими аномалиями, в первую очередь высокими среднегодовыми температурами. Однако их сравнение показало неоднозначную ситуацию: среднегодовая температура в 1963 г. составила 4,3 °С, в 2010 г. – 7,3 °С;

в 1985 г. – 4,0 °С в 2002 г. – 7,0 °С. По-видимому, использование данного параметра при анализе годичного радиального прироста сосны не вполне корректно. Очевидно, что более глубокое понимание особенностей динамики радиального прироста дает детализация температурного воздействия на уровне среднемесячных температур текущего и предшествующего вегетационных периодов, а также и использование показателей среднемесячного количества осадков.

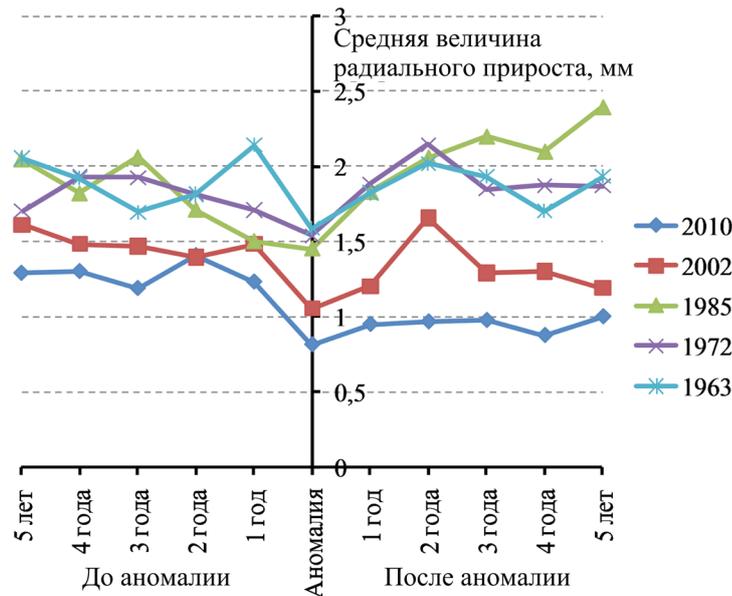


Рис. 2. Изменение радиального прироста (по вертикали) сосны обыкновенной за 5-летние периоды до и после аномальных событий

Fig. 2. Changes in radial growth (vertically) of Scots pine over 5-year periods; before and after the anomalous events

Анализ средней величины радиального прироста за предыдущие 5 лет до аномальных событий выявил более стабильный прирост сосны до 1963, 1972 и 1985 гг., после них он продолжился в течение последующих 5 лет с небольшими перепадами. Отмечен небольшой всплеск активности прироста на 2-й год после аномально низкого прироста 2002 г. Стабильно низкий прирост зафиксирован в 2010 г., причем в июле (23,3 °С), августе (22,6 °С), июне (20,4 °С) наблюдались наиболее высокие среднемесячные температуры за вегетационный период. Кроме того, в последующие годы (2011–2014 и 2016 гг.) также были зафиксированы весьма высокие температуры в летние месяцы (до 21,9 °С), что могло негативно отразиться на характере годичных приростов.

Хотя индексы радиальных приростов более объективно характеризуют наблюдаемые изменения (рис. 3), в целом отмечена сходная динамика относительных показателей с величиной абсолютных значений радиальных приростов. Однако значения годичных индексов приростов обусловлены не только колебаниями различных природных факторов, но и проявлением наследственных признаков, положением дерева в древостое и др. [1, 13, 14].

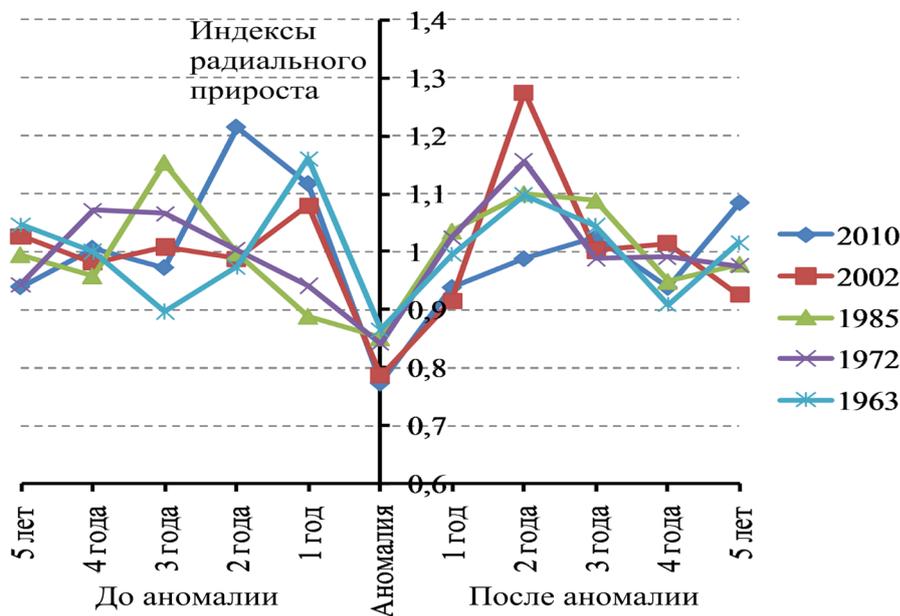


Рис. 3. Изменение индексов радиальных приростов сосны обыкновенной за 5-летние периоды до и после аномальных событий

Fig. 3. Changes in Scots pine radial growth indices over 5-year periods before and after the anomalous events

Анализ выявил существенные различия изучаемых параметров (радиальный прирост и индекс радиального прироста) при средних многолетних значениях температур воздуха января, мая и августа по сравнению с аналогичными показателями в годы аномально низких радиальных приростов сосны обыкновенной. На фоне более холодного января и более теплых мая и августа (рис. 4) наблюдается аномально низкий прирост у сосны. Возможно, в этом проявляются физиологические особенности данного вида высших древесных растений, зона оптимума гомеостаза которых находится в условиях более холодного бореального климата.

Диапазон температур воздуха (рис. 5) за период наблюдений в январе составил -16°C (варьирование от $-17,5$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$), в годы ингибирования роста по диаметру сосны обыкновенной он составил $-11,2^{\circ}\text{C}$ (от $-16,3$ до $-5,2^{\circ}\text{C}$); в мае соответственно $9,0^{\circ}\text{C}$ (от $8,8$ до $17,8^{\circ}\text{C}$) и $3,0^{\circ}\text{C}$ (от $13,9$ до $16,9^{\circ}\text{C}$); в августе $-8,2^{\circ}\text{C}$ (от $14,4$ до $22,6^{\circ}\text{C}$) и $3,9^{\circ}\text{C}$ (от $18,7$ до $22,6^{\circ}\text{C}$). Следует отметить, что достаточно значительное колебание диапазона температур (от -16 до $+9^{\circ}\text{C}$) за исследуемый период всего в пяти случаях отразилось на снижении годичных радиальных приростов: в 1963, 1972, 1985, 2002 и 2010 гг.

Непосредственно в годы ингибирования роста по диаметру сосны обыкновенной и за год до снижения приростов наблюдаются существенные различия среднемесячных температур января, мая и августа со средними многолетними значениями в эти месяцы.

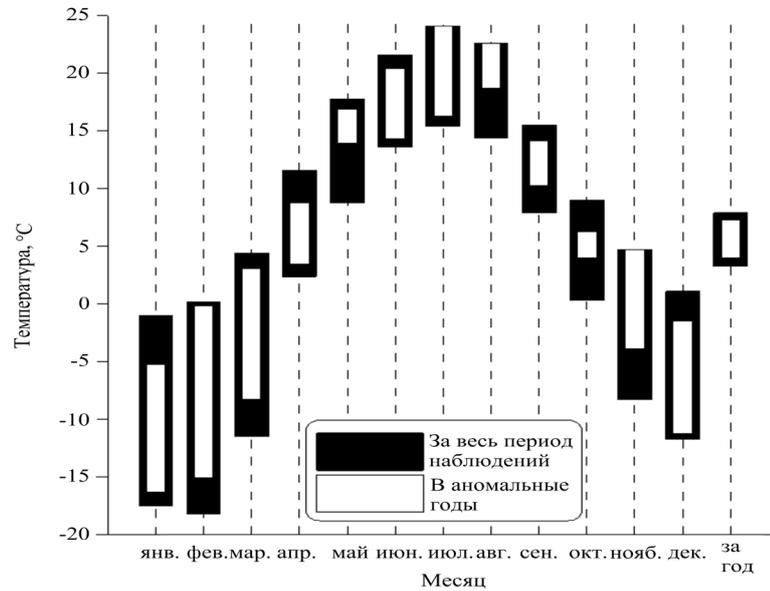


Рис. 4. Динамика температуры воздуха за весь период наблюдений (с 1947 по 2016 г.) и в годы с аномально низкими значениями радиального прироста у сосны обыкновенной
 Fig. 4. Air temperature dynamics for the observation period (1947–2016) and in the years of abnormally low values of radial growth in Scots pine

Установлено, что за год до аномально низких значений радиального прироста у сосны обыкновенной в январе отмечается существенное (при $p = 0,001$) различие средних температур воздуха: $(-4,4 \pm 0,4) ^\circ\text{C}$ на фоне средних многолетних значений $(-7,5 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$. Диапазон температур января при этом за год до ингибирования роста по диаметру составил $-3,4 \dots -5,3 ^\circ\text{C}$ (разница в $1,9 ^\circ\text{C}$) на фоне средних многолетних значений $-1,0 \dots -17,5 ^\circ\text{C}$ (разница в $16,5 ^\circ\text{C}$). Наблюдается явное смещение показателей в сторону более высоких температур.

Непосредственно в год ингибирования роста по диаметру у сосны обыкновенной температура января существенно (при $p = 0,05$) ниже средних многолетних значений и составляет $(-12,0 \pm 1,9) ^\circ\text{C}$; диапазон температур $-5,2 \dots -16,3 ^\circ\text{C}$ (разница в $11,1 ^\circ\text{C}$), что на $5,5 ^\circ\text{C}$ ниже средних многолетних значений.

В год ингибирования роста по диаметру у сосны обыкновенной температуры мая существенно (при $p = 0,05$) выше средних многолетних значений и составляют $(15,3 \pm 0,6) ^\circ\text{C}$; диапазон температур $-13,9 \dots 16,9 ^\circ\text{C}$ (разница в $3,0 ^\circ\text{C}$), в то время как среднее многолетнее значение составляет $(13,5 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$; диапазон температур $-8,8 \dots 17,8 ^\circ\text{C}$ (разница в $9,0 ^\circ\text{C}$), что на $1,8 ^\circ\text{C}$ выше средних многолетних значений.

В год ингибирования роста по диаметру у сосны обыкновенной температуры августа существенно (при $p = 0,001$) выше средних многолетних значений и составляют $(20,0 \pm 0,7) ^\circ\text{C}$; диапазон температур $-18,7 \dots 22,6 ^\circ\text{C}$ (разница в $3,9 ^\circ\text{C}$), в то время как среднее многолетнее значение составляет $(17,2 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$; диапазон температур $-14,4 \dots 22,6 ^\circ\text{C}$ (разница в $8,2 ^\circ\text{C}$), что на $2,8 ^\circ\text{C}$ выше средних многолетних значений.

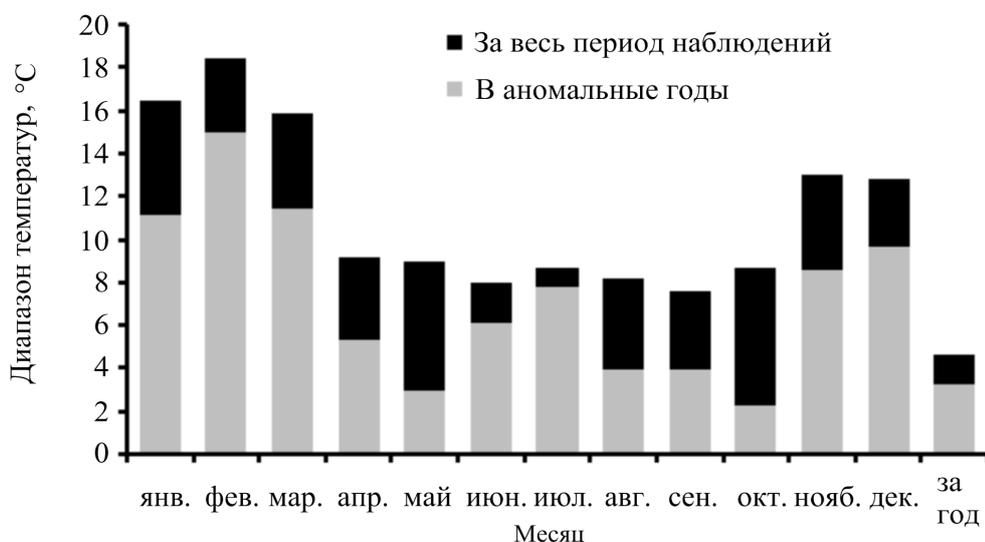


Рис. 5. Диапазоны температур воздуха за весь период наблюдений в годы ингибирования роста по диаметру сосны обыкновенной

Fig. 5. Air temperature ranges for the entire observation period in the years of growth inhibition by Scots pine diameter

Как известно, древесные растения в январе находятся в состоянии глубокого покоя, при этом практически все физиологические процессы крайне замедлены, осуществляются лишь газообмен с окружающей средой и перидермальная транспирация, что сопровождается расходом запасных питательных веществ. В сезоны с январскими температурами выше климатической нормы радиальный прирост сосны достаточно стабилен: средняя величина радиального прироста составляет $(1,61 \pm 0,04)$ мм (различия со средними многолетними значениями, равными $(1,64 \pm 0,01)$ мм, незначительны при $p = 0,05$). Ситуация резко меняется и напоминает стрессовую, если в следующем году средняя температура января оказывается существенно ниже климатической нормы – в этом случае наблюдается значительное снижение радиального прироста: по данным для 93 модельных деревьев средняя величина прироста существенно отличается от средней многолетней на самом высоком доверительном уровне (при $p = 0,001$) и составляет $(1,29 \pm 0,03)$ мм, коэффициент существенности различий $t_{st} = 11,1$ выше критического значения, равного 3,3. Причем это событие происходит на фоне аномально высоких температур мая и августа текущего года, во время формирования ранней и поздней древесины, что можно объяснить особенностями биологии вида, который эволюционировал в условиях более холодного бореального климата.

Заключение

Исследования показали, что ингибирование роста по диаметру у сосны обыкновенной на территории Брянской области в сухих и свежих боровых условиях отмечается в годы с более холодным январем (на $11,1$ °C), более теплыми

маем (на 1,8 °С) и августом (на 3,9 °С) текущего года и в случае более теплого января предыдущего года (на 1,9 °С) относительно средних многолетних данных. Значимого влияния среднемесячного количества осадков на радиальный прирост исследуемой породы в условиях лимитирования влаги не выявлено. Полученная информация расширяет представление об особенностях ростовых процессов и формирования годичного прироста по диаметру сосны обыкновенной в условиях изменяющегося климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с. [Bitvinskaskas T.T. *Dendroclimatic Studies*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p.]
2. Демаков Ю.П., Андреев Н.В. Закономерности радиального прироста деревьев сосны в приозерных биотопах национального парка «Марий Чодра» // Эко-потенциал. 2014. № 3(7). С. 48–58. [Demakov Yu.P., Andreyev N.V. Patterns of Radial Growth of Pine Trees in Lacustrine Biotopes of the Mari Chodra National Park. *Eko-potentsial*, 2014, no. 3(7), pp. 48–58].
3. Демина А.В., Белокопытова Л.В., Андреев С.Г., Костякова Т.В., Бабушкина Е.А. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как индикатор гидротермического режима лесостепи Западного Забайкалья // Сиб. экол. журн. 2017. № 5. С. 553–566. [Demina A.V., Belokopytova L.V., Andreev S.G., Kostyakova T.V., Babushkina E.A. Radial Growth Dynamics of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) as an Indicator of the Hydrothermal Regime of the Western Transbaikalia Forest-Steppe. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2017, no. 5, pp. 553–566]. DOI: [10.15372/SEJ20170503](https://doi.org/10.15372/SEJ20170503)
4. Ергина Е.И., Лисецкий Ф.Н., Акулов В.В., Репецкая А.И., Новикова Ю.А. Дендроклиматические исследования условий произрастания сосны крымской или Палласа – *Pinus pallasiana* D. Don, в предгорном Крыму // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер.: География. 2012. Т. 25(64), № 2. С. 60–68. [Yergina E.I., Lysetskiy F.N., Akulow V.V., Repetska A.I., Novikova Yu.A. Dendroclimate Study of Growth Conditions the Crimean Pine in Foothills of Crimea. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta. Seriya Geografiya* [Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Geography Sciences], 2012, vol. 25(64), no. 2, pp. 60–68].
5. Иванов В.П., Марченко С.И., Балухта Л.П. Длительная изменчивость радиального прироста и женской генеративной сферы сосны обыкновенной на фоне погодных условий региона // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015. Вып. 43. С. 20–25. [Ivanov V.P., Marchenko S.I., Baluhta L.P. Long Ring Growth Variation and Female Generative Services Pine on the Background of the Region Weather Conditions. *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa*, 2015, iss. 43, pp. 20–25].
6. Иванов В.П., Марченко С.И., Глазун И.Н., Нартов Д.И., Соболева Л.М. Изменения в биогеоценозах центральной части Брянской области после летней жары 2010 г. // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 1. С. 25–35. [Ivanov V.P., Marchenko S.I., Glazun I.N., Nartov D.I., Soboleva L.M. Biogeocenosis Changes in Central Part of the Braynsk Region after Hot Summer-2010. *Vestnik PGTU. Ser. «Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Forest. Ecology. Nature management»], 2013, no. 1, pp. 25–35].
7. Иванов В.П., Марченко С.И., Нартов Д.И., Балухта Л.П., Красикова Ю.С. Сравнительный анализ радиальных приростов хвойных лесобразователей в одинаковых лесорастительных условиях // Роль учебно-опытных лесхозов вузов России в подготовке кадров для лесного сектора: материалы науч.-практ. конф., 21–23 сент. 2017 г.

Брянск: БГИТА, 2017. С. 125–130. [Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Balukhta L.P., Krasikova Yu.S. Comparative Analysis of Radial Growth of Coniferous Forest Species in the Same Forest Site Conditions. *The Role of Educational and Experimental Forestries of Russia Universities in Training for the Forestry Sector: Proceedings of Scientific and Practical Conference, September 21–23, 2017*. Bryansk, BGITA Publ., 2017, pp. 125–130].

8. Лобжанидзе Э.Д. Камбий и формирование годичных колец древесины. Тбилиси: АН ГрузССР, 1961. 159 с. [Lobzhanidze E.D. *Cambium and the Formation of Annual Rings of Wood*. Tbilisi, AN GruzSSR Publ., 1961. 159 p.].

9. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 140 с. [Matveyev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrochronology*. Voronezh, VGLTU Publ., 2013. 140 p.].

10. Соломина О.Н., Кузнецова В.В., Мацковский В.В., Долгова Е.А. От чего зависит ширина годичных колец деревьев в центральной части Восточно-Европейской равнины? // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2016. № 3. С. 47–64. [Solomina O.N., Kuznetsova V.V., Matskovskii V.V., Dolgova E.A. What Determines the Width of Annual Tree-Rings in the Central Part of East-European Plain? *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 3, pp. 47–64]. DOI: [10.15356/0373-2444-2016-3-47-64](https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-47-64)

11. Хамидуллина Г.Г., Исхаков Ф.Ф., Кулагин А.А., Зайцев Г.А., Давыдычев А.Н. Зависимость радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от топоэкологических условий произрастания // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2014. №1(45). С. 12–14. [Khamidullina G.G., Iskhakov F.F., Kulagin A.A., Zaitsev G.A., Davydychev A.N. Dependence Of Scotch Pine Radial Increment (*Pinus silvestris* L.) on Topoecological Growth Conditions. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestia Orenburg State Agrarian University], 2014, no. 1(45), pp. 12–14].

12. Allen C.D., Breshears D.D., McDowell N.G. On Underestimation of Global Vulnerability to Tree Mortality and Forest Die-off from Hotter Drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 2015, vol. 6, iss. 8, pp. 1–55. DOI: [10.1890/ES15-00203.1](https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1)

13. Charney N.D., Babst F., Poulter B., Record S., Trouet V.M., Frank D., Enquist B.J., Evans E.K. Observed Forest Sensitivity to Climate Implies Large Changes in 21st Century North American Forest Growth. *Ecology Letters*, 2016, vol. 19(9), pp. 1119–1128. DOI: [10.1111/ele.12650](https://doi.org/10.1111/ele.12650)

14. Evans M.E.K., Merow C., Record S., McMahon S.M., Enquist B.J. Towards Process-Based Range Modeling of Many Species. *Trends in Ecology & Evolution*, 2016, vol. 31, iss. 11, pp. 860–871. DOI: [10.1016/j.tree.2016.08.005](https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.08.005)

15. Foster J.R., Finley A.O., D’Amato A.W., Bradford J.B., Banerjee S. Predicting Tree Biomass Growth in the Temperate-Boreal Ecotone: Is Tree Size, Age, Competition, or Climate Response Most Important? *Global Change Biology*, 2016, vol. 22, iss. 6, pp. 2138–2151. DOI: [10.1111/gcb.13208](https://doi.org/10.1111/gcb.13208)

16. Ivanov Yu.V., Kartashov A.V., Ivanova A.I., Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Kuznetsov V.V. Long-Term Impact of Cement Plant Emissions on the Elemental Composition of Both Soils and Pine Stands and on the Formation of Scots Pine Seeds. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 243, part B, pp. 1383–1393. DOI: [10.1016/j.envpol.2018.09.099](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.099)

17. Jetschke G., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M. Towards the Extremes: A Critical Analysis of Pointer Year Detection Methods. *Dendrochronologia*, 2019, vol. 53, pp. 55–62. DOI: [10.1016/j.dendro.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.004)

18. Millar C.I., Stephenson N.L. Temperate Forest Health in an Era of Emerging Megadisturbance. *Science*, 2015, vol. 349, iss. 6250, pp. 823–826.

19. Theuerkauf M., Engelbrecht E., Dräger N., Hupfer M., Mrotzek A., Prager A., Scharnweber T. Using Annual Resolution Pollen Analysis to Synchronize Varve and Tree-Ring Records. *Quaternary*, 2019, vol. 2, iss. 3, art. 23. DOI: [10.3390/quat2030023](https://doi.org/10.3390/quat2030023)

RADIAL GROWTH OF SCOTS PINE (*Pinus sylvestris* L.) UNDER INHIBITION

Valery P. Ivanov, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [G-7378-2019](https://orcid.org/0000-0002-4997-5576),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4997-5576>

Sergey I. Marchenko, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-7754-2019](https://orcid.org/0000-0001-5107-6839), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5107-6839>

Dmitry I. Nartov, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-7725-2019](https://orcid.org/0000-0001-6886-5914),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6886-5914>

Leonid P. Balukhta, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-1507-2020](https://orcid.org/0000-0003-4003-6705), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4003-6705>

Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: ivpinfo@mail.ru

Abstract. Predicting tree growth processes is important due to the exceptional ecosystem role of forests, which carry out global climate regulation by sequestering carbon, conserving drinking water, and providing habitat for living organisms. Trees are known to respond to any fluctuations in the environment. The research purpose is to identify weather and climatic factors that significantly affect the inhibition of growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in conditions of constant moisture deficit. The studies were carried out in the eastern part of the Bryansk region within the territory the Bryansk administrative district, in the educational and experimental forestry of the Bryansk State Engineering and Technological University and the Styazhnovskoye forest district. Methods of dendrochronology were used to assess the response of 93 pine trees to fluctuations in the external environment by changing the width of annual rings (available anatomical feature of a tree) using indices of radial growth. An original approach was proposed to analyze the reasons for a sharp decline in the annual radial growth under the influence of temperature and precipitation. The years with abnormally low increments (1963, 1972, 1985, 2002 and 2010) were identified against the background of the weather-climatic situation for 5 years before and after the fall in growth. Similar dynamics of absolute values of radial increments and their indices was established, which is caused by fluctuations of natural factors, manifestation of hereditary traits, etc. Significant differences were revealed between the growth rates at average multi-year values of January, May and August air temperatures with growth rates in the years of abnormally low radial growth, which are observed in pine against the background of colder January and warmer May and August of the current year, as well as under the condition of warmer January of the previous year. At the same time, no significant role of precipitation was detected. The obtained data, expanding the idea of the features of growth processes and formation of annual increments in diameter of Scots pine in the conditions of changing climate at the turn of the 20th–21st centuries, allowed us to suggest a possible manifestation of physiological features of the species, the homeostasis optimum zone of which is located in the conditions of colder boreal climate. This information expands our understanding of the features of growth processes and formation of annual increments in diameter of Scots pine in changing climatic conditions.

For citation: Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Balukhta L.P. Radial Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Inhibition. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 69–81. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-69-81

Funding: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 16-14-10224 on the theme “Physiological and Molecular Mechanisms of Adaptation of Coniferous Plants to Drought”.

Keywords: Scots pine, radial growth, growth inhibition, dendrochronology, weather and climatic anomalies.

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

Поступила 24.10.19 / Received on October 24, 2019

УДК 630*232.411

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-82-91

ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ В КУЛЬТУРАХ СЕВЕРОТАЕЖНОГО ЛЕСНОГО РЕГИОНА

*О.Н. Тюкавина*¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

*Д.Н. Клевцов*¹, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-157X>

Д.М. Адаи^{1,2}, аспирант

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: o.tukavina@narfu.ru, d.klevtsov@narfu.ru

²Технический университет Такоради, а/я 256, Такоради, Западный регион, Гана; e-mail: georgeadayi@yahoo.com

Аннотация. Теплотворная способность растений является важным параметром для оценки материальных циклов и преобразования энергии в лесных экосистемах, а также качественной характеристикой растительного сырья как топлива. Древесное биотопливо находит все более широкое применение при производстве тепловой энергии, в связи с этим актуально изучение теплотворной способности древесины и условий выращивания наиболее качественного сырья. Цель исследования – выявление зависимости теплотворной способности древесины сосны в культурах от ее макроскопического строения, характеристик ассимиляционного аппарата, густоты и высоты древостоя. На временных пробных площадях выбирали мелкие, средние и крупные неповрежденные без патологий модельные деревья, у которых возрастным буровом на высоте 1,3 м отбирали керны для измерения радиальных приростов на полуавтоматическом комплексе «Линтаб-6» с точностью $\pm 0,01$ мм. Теплотворную способность древесины определяли в абсолютно сухом состоянии при помощи автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В. Для изучения влияния ассимиляционного аппарата на теплотворную способность древесины хвою всех возрастов отбирали со средней ветви кроны модельного дерева, из средней части хвоинки готовили поперечные срезы, используя санный микротом МС-2. Измеряли гистологические элементы хвоинки с помощью микроскопа Axio Scope.A1 и программного обеспечения IMAGE-PRO INSIGHT 8.0. Средняя теплоемкость древесины сосны в сосняках вересково-лишайниковых составляет $(20\ 731 \pm 133)$ Дж/г, в сосняках брусничных – $(20\ 618 \pm 141)$ Дж/г, в сосняках черничных – $(20\ 513 \pm 104)$ Дж/г при густоте древостоя от 1160 до 3806 шт./га. Наибольшая теплоемкость древесины сосны отмечается в сосняке вересково-лишайниковом при густоте древостоя 5021 шт./га. Повышенная теплоемкость древесины сосны при высокой густоте древостоя обусловлена сокращением количества хвои на ветви ($r = -0,75$) и увеличением диаметра смоляных ходов ($r = -0,88$). Установлено влияние средней высоты древостоя и структуры годичного слоя на теплотворную способность древесины сосны. **Для цитирования:** Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Адаи Д.М. Теплотворная способность древесины сосны в культурах северотаежного лесного региона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 82–91. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-82-91

Ключевые слова: теплотворная способность древесины, сосна, тип леса, культуры, радиальный прирост, хвоя.

Введение

Теплотворная способность растений является важным параметром для оценки и индексации материальных циклов и преобразования энергии в лесных экосистемах [30]. Учитывая, что древесиной аккумулируется 66 % солнечной энергии [14], необходимо определить ее энергетический потенциал. Теплотворная способность является качественной характеристикой древесины как топлива [1]. Древесное биотопливо находит все более широкое применение при производстве тепловой энергии [4]. Спрос на древесные брикеты и пеллеты увеличивается [1, 18, 20]. Кроме того, биотопливо по сравнению с традиционными видами топлива более экологично [24, 26, 28], так как при его использовании отсутствуют серные окислы, снижаются выбросы сажи [8]. Потенциальными источниками древесного топлива являются древесные остатки на вырубках, пни, баланс круглого леса, а также зеленая масса и ветки [21]. Однако древесина по сравнению с другими частями дерева имеет преимущества: однородный элементарный химический состав [1], меньшее содержание азота и золы по сравнению с хвоей и корой [25, 30]. Высокое содержание азота в биомассе уменьшает теплотворную способность [22], а повышенная зольность сырья приводит к возникновению проблем при эксплуатации систем как на этапе сжигания, так и на этапе газификации [27]. Использование низкосортной, неделовой древесины сосны позволит снизить потери древесины при лесозаготовках и повысить экономическую эффективность рубок ухода, но для этого необходимо изучить теплотворную способность этого вида древесины и факторы, влияющие на данный показатель.

Цель работы – выявление зависимости теплотворной способности древесины сосны в культурах от характеристик деревьев и древостоев.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены на территории таежной лесорастительной зоны в северотаежном лесном районе европейской части России (Емецкое лесничество Пингишенского участкового лесничества). Объектами наблюдений являлись чистые по составу или с незначительной примесью березы, идентичные по способу создания участки культур сосны обыкновенной в лишайниковом, брусничном и черничном типах условий местопроизрастания, где имеются существенные отличия в продуктивности древостоев (табл. 1). Культуры сосны были созданы семенами местного сбора путем посева на площадках размером 0,3×0,5 м по 20–30 шт. в каждую в первой половине июня 1941 г. Уходов за культурами не проводилось.

Полевой экспериментальный материал получен методом однократных обмеров на временных пробных площадях (ПП), заложенных в культурах сосны обыкновенной. Обследование на них проводили с учетом методических рекомендаций В.В. Огиевского, А.А. Хирова [7]; Н.Н. Соколова [12]. На каждой ПП отбирали в трехкратной повторности мелкое, среднее и крупное модельные деревья, избегая значительных отклонений по развитию крон, повреждений стволов, признаков усыхания и т. п. У модельных деревьев на высоте 1,3 м возрастным буравом отбирали керны, на которых измеряли приросты ранней и поздней древесины полуавтоматическим комплексом для распознавания годичных колец Линтаб-6 с точностью ±0,01 мм. Теплотворную способность древесины устанавливали при помощи автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В.

Таблица 1

Таксационная характеристика 76-летних посевов сосны

№ ПП	Со-став	Средние		Класс бони-тета	Густо-та, шт./га	Относи-тельная полнота	Запас, м ³ /га	
		диаметр, см	высота, м					
<i>Сосняк вересково-лишайниковый</i>								
1	10С	8,4	9,8	V	5021	1,0	141	
2	10С	13,7	14,1	V	2062	1,0	206	
<i>Сосняк брусничный</i>								
3	10С	19,4	19,4	IV	1160	1,0	329	
4	10С	13,5	17,7	IV	2761	1,1	301	
5	10С	12,2	18,7	IV	3191	1,0	328	
6	10С	11,9	15,7	IV	3806	1,0	248	
<i>Сосняк черничный</i>								
7	8С	19,3	21,6	III	1068	0,7	254	
	2Б	8,0	20,5		206	0,1	57	
					<i>Итого</i>	1274	0,8	311
8	9С	18,1	21,9	III	2089	0,9	381	
	10с	11,4	18,3		309	0,1	25	
					<i>Итого</i>	2398	1,0	406

Так как с повышением влажности теплотворная способность материала значительно уменьшается [25], то ее определяли в абсолютно сухом состоянии. Древесину сосны высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С в открытых алюминиевых боксах. После извлечения из сушильного шкафа горячие боксы плотно закрывали крышками и помещали в эксикатор с хлористым кальцием.

Для изучения влияния ассимиляционного аппарата на теплотворную способность древесины хвою всех возрастов отбирали со средней ветви кроны модельного дерева. Длину, ширину и толщину хвоинки измеряли штангенциркулем. Из средней части хвоинки готовили поперечные срезы с использованием санного микротомы МС-2. Измеряли диаметр и площадь смоляных ходов, центрального цилиндра, проводящих пучков, толщину эндодермы, эпидермы, гиподермы, используя микроскоп Axio Scope.A1 с объективом A-Plant 10x/0,25 M27 и программное обеспечение IMAGE-PRO INSIGHT 8,0.

Результаты исследования и их обсуждение

В сосняках вересково-лишайниковых средняя теплоемкость древесины сосны составляет (20 731±133) Дж/г; в сосняках брусничных – (20 618±141) Дж/г; в сосняках черничных – (20 513±104) Дж/г при относительно схожих характеристиках древостоя. Изменчивость показателя малая – до 3 %. Отмечается тенденция к снижению коэффициента изменчивости теплоемкости древесины от сосняков вересково-лишайниковых к соснякам черничным от 2,5 до 0,8 %. Можно отметить тенденцию к снижению теплоемкости древесины с улучшением лесорастительных условий, но различие средних значений теплоемкости незначимо. Согласно исследованиям ряда авторов [9, 13], для сосняков мохово-лишайниковых характерна повышенная смолопродуктивность, по мере ее

снижения они располагаются следующим образом: сосняки брусничные, сосняки черничные. Повышенная смолопродуктивность в сосняках лишайниковых объясняется В.И. Сухановым [13] лучшим прогреванием почв в течение вегетационного периода, особенно весной и в начале лета. Повышенная смолистость древесины способствует более высокой теплоте сгорания [2, 3, 5, 10].

Если сравнивать теплоемкость древесины сосны между различными ПП, то значимо отличается сосняк вересково-лишайниковый с наибольшей густотой (5021 шт./га), теплотворная способность древесины сосны в котором составляет (21 462±316) Дж/г (табл. 2). Достоверность различия – от 3,5 до 4,9 при вероятности безошибочного заключения $p = 0,95$ при $t_{st} = 3,2$.

Таблица 2

Теплотворная способность древесины сосны (Дж/г)

№ ПП	Средняя теплотворная способность древесины сосны	№ ПП	Средняя теплотворная способность древесины сосны
1	21 462,0±315,7	5	20 473,3±153,6
2	20 730,7±133,1	6	20 662,0±251,7
3	20 785,0±102,0	7	20 541,5±119,5
4	20 551,0±55,0	8	20 483,0±86,7

При сокращении густоты древостоя на 1215–3861 шт./га теплоемкость древесины сосны уменьшается на 3,0...4,5 %. Корреляционный анализ позволил обнаружить значительную связь теплоемкости древесины и густоты древостоя ($r = 0,59$). Выявлена высокая обратная корреляционная зависимость теплоемкости древесины сосны от средней высоты древостоя ($r = -0,83$ при $t = 7,50$). На зависимость теплотворной способности древесины от высоты дерева указывали авторы [2, 30]. Согласно В.Я. Бондареву, Л.М. Гусевой [2], чем больше высота дерева, тем выше теплота сгорания. Наибольшая теплота сгорания отмечается у видов с наибольшим содержанием лигнина и экстрактивных веществ [23]. С улучшением условий произрастания (светового и водного режима) смолопродуктивность дерева повышается [9]. Однако у тонкомерной древесины меньше целлюлозы, больше лигнина, пентозанов и смол [6]. Корреляционная зависимость теплотворной способности древесины от содержания лигнина высокая (коэффициент корреляции $r = 0,7$ [23]; $0,76$ [29]; $0,86$ [11]), экстрактивных веществ – только значительная ($r = 0,56$ [23]).

Различия теплотворной способности древесины сосны между мелким, средним и крупным деревом по диаметру в древостое составляют 176...999 Дж/г. В 50 % случаев мелкие деревья имели наибольшие значения теплотворной способности древесины, в 25 % случаев – средние значения, в 25 % случаев – наименьшие значения. Корреляционной зависимости теплотворной способности древесины от диаметра дерева не выявлено ($r = -0,22$, корреляционное отношение равно $0,27$). Это подтверждается исследованиями W.A. Nough (1969) [19], согласно которым скорость роста и возраст дерева не оказывают значительного влияния на теплоту сгорания.

Влияние структуры годичного слоя на теплотворную способность древесины сосны неоднозначно (табл. 3). Выявлена значительная криволинейная корреляционная зависимость от ширины годичного слоя, ширины ранней зоны годичного слоя и процента поздней древесины.

Таблица 3

**Влияние структуры годичного слоя на теплотворную способность
древесины сосны**

Показатель корреляционной связи*	Ширина			Процент поздней древесины в годичном слое
	годичного слоя	ранней зоны годичного слоя	поздней зоны годичного слоя	
r	-0,28	-0,32	-0,17	0,50
m_r	0,17	0,17	0,18	0,14
t	1,60	1,90	0,90	3,60
η	0,67	0,59	0,50	0,69
m_η	0,10	0,12	0,14	0,09
t	6,50	4,70	3,60	7,00

*r – коэффициент корреляции; m_r – ошибка коэффициента корреляции; η – корреляционное отношение; m_η – ошибка корреляционного отношения; t – достоверность.

На теплотворную способность древесины оказывает влияние смолистость дерева, в свою очередь зависящая от характеристик кроны и хвои [16, 17]. Рассмотрим влияние характеристик хвои на данный показатель более детально (табл. 4), с использованием усредненных значений параметров хвои первых трех лет побегов первого и второго порядков.

Отмечается высокая значимая прямая корреляционная зависимость теплотворной способности древесины от диаметра смоляных ходов и обратная зависимость от количества хвои на ветви. С сокращением количества хвои на ветви теплотворная способность древесины возрастает. В.А. Шульгин [17] и А.В. Чудный [16] указывали, что общее количество хвои у высокосмолопродуктивных сосен намного меньше, чем у сосны обычной смолопродуктивности.

Характерной особенностью деревьев высокой смолопродуктивности они считали разреженность кроны и, как следствие, увеличение поверхности световой хвои. Изреживание кроны, сокращение числа ветвей и количества хвои на ветви происходит при увеличении густоты древостоя [15]. Значительная корреляционная зависимость теплотворной способности древесины сосны от толщины покровной ткани хвои является косвенной, так как при повышении густоты древостоя увеличивается теплотворная способность древесины за счет разреживания кроны и роста доли световой хвои. Особенностью световой хвои является утолщение покровных тканей. При уменьшении количества хвои на ветви возрастает диаметр смоляных ходов. Корреляционная зависимость данных показателей высокая, обратная значимая ($r = -0,87$ при $t = 10$). Следовательно, характеристики ассимиляционного аппарата (количество смоляных ходов в поперечном сечении хвои, количество хвои на ветви) могут выступать индикаторами теплотворной способности древесины сосны.

Таблица 4

Влияние характеристик хвои на теплотворную способность древесины сосны

Признак	Коэффициент корреляции	Признак	Коэффициент корреляции
Длина хвоинки	-0,03	Толщина эндодермы	-0,31
Ширина хвоинки	-0,41	Диаметр смоляных ходов	0,88
Толщина хвоинки	-0,09	Толщина эпидермы	0,67
Площадь поверхности хвоинки	-0,09	Площадь проводящих пучков в поперечном сечении хвоинки, %	-0,65
Площадь поперечного сечения хвоинки	-0,14	Площадь смоляных ходов в поперечном сечении хвоинки, %	0,40
Объем хвоинки	-0,08	Площадь покровных тканей в поперечном сечении хвоинки, %	0,64
Количество смоляных ходов	-0,25	Площадь центрального цилиндра в поперечном сечении хвоинки, %	-0,34
Площадь центрального цилиндра	-0,47	Площадь мезофилла в поперечном сечении хвоинки, %	-0,10
Отношение площади центрального цилиндра к площади поперечного сечения	-0,37	Количество хвои на ветви	-0,75

Выводы

1. Установлено, что средняя теплотворность древесины сосны в сосняках вересково-лишайниковых составляет (20 731±133) Дж/г; в сосняках брусничных – (20 618±141) Дж/г; в сосняках черничных – (20 513±104) Дж/г при густоте древостоя от 1160 до 3806 шт./га.

2. Выявлена значительная корреляционная зависимость теплотворной способности древесины сосны от густоты древостоя: высокая обратная – от средней высоты древостоя; значительная – от процента поздней древесины в годичном слое.

3. Количество хвои на ветви является индикатором теплотворной способности древесины ($r = -0,75$ при $t = 8,6$).

4. Полученные в процессе исследования параметры теплотворной способности древесины сосны могут использоваться как качественные характеристики растительного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адамов М.Г. Об энергетических возможностях лесов Дагестана // Вестн. Дагестан. гос. ун-та. Сер. 1. Естеств. науки. 2011. Вып. 6. С. 186–188. [Adamov M.G. On the Energy Potential of Dagestan Forests. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennyye nauki* [Herald of Dagestan State University. Series 1. Natural Sciences], 2011, vol. 6, pp. 186–188].

2. Бондарев В.Я., Гусева Л.М. Особенности подготовки сырья для пиролиза древесины // Лесн. хоз-во – 2013. Актуальные проблемы и пути их решения: междунар. научн.-практ. интернет-конф. Н. Новгород, 2014. С. 92–97. [Bondarev V.Ya., Guseva L.M. Features of Preparation of Raw Materials for Wood Pyrolysis. *Forestry – 2013. Current Problems and Their Solutions: International Scientific and Practical Internet Conference*. Nizhny Novgorod, 2014, pp. 92–97].

3. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с. [Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Handbook on Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 296 p.].

4. Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Изменение теплоты сгорания древесного топлива при торрефикации // Лесн. вестн. *Forestry Bulletin*. 2017. Т. 21, № 1. С. 64–68. [Ermochenkova M.G., Evstigneev A.G. Changes of the Calorific Value of Wood Fuel after Torrefaction. *Lesnoy vestnik [Forestry Bulletin]*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 64–68]. DOI: [10.18698/2542-1468-2017-1-64-68](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-64-68)

5. Максимчук Ю.В., Пономарев Д.А., Курсевич В.Н., Фесько В.В. Теплота сгорания древесного топлива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 116–129. [Maksimchuk Yu.V., Ponomarev D.A., Kursevich V.N., Fes'ko V.V. Calorific Value of Wood Fuel. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2017, no. 4, pp. 116–129]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.4.116](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.116), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/6a0/1_maksimchuk.pdf

6. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 264 с. [Nikishov V.D. *Complex Use of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 264 p.].

7. Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. Л.: ЛТА, 1967. 50 с. [Ogiyevskiy V.V., Khiron A.A. *Inspection and Study of Forest Crops*. Leningrad, LTA Publ., 1967. 50 p.].

8. Орстик Л.С., Сорокин Н.Т., Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Мишууров Н.П. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития. М.: Росинформагротех, 2008. 404 с. [Orsik L.S., Sorokin N.T., Fedorenko V.F., Buklagin D.S., Mishurov N.P. *Bioenergy: World Experience and Development Forecasts*. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2008. 404 p.].

9. Петрик В.В. Лесоводственные методы повышения смолопродуктивности сосновых древостоев. Архангельск: АГТУ, 2004. 236 с. [Petrik V.V. *Silvicultural Methods of Increasing the Resin Productivity of Pine Stands*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2004. 236 p.].

10. Рябчук В.П., Юскевич Т.В., Гриб В.М. Физические свойства древесины видов рода сосна // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 160–169. [Ryabchuk V.P., Yuskevich T.V., Grib V.M. Physical Properties of Pine Wood. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2013, no. 5, pp. 160–169]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d0a/mtd1.pdf>

11. Серков В.В., Сивенков А.Б., Тхань Б.Д., Асеева Р.М. Тепловыделение при горении древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2003. № 5. С. 74–79. [Serkov V.V., Sivenkov A.B., Than' B.D., Aseeva R.M. Heat Release during Wood Burning. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik [Forestry Bulletin]*, 2003, no. 5, pp. 74–79].

12. Соколов Н.Н. Методические указания к дипломному проектированию по таксации пробных площадей. Архангельск: АЛТИ, 1978. 44 с. [Sokolov N.N. *Methodology Guidelines for the Diploma Project on the Valuation of Trial Plots*. Arkhangelsk, ALTI Publ., 1978. 44 p.].

13. Суханов В.И. Зонально-типологические особенности смолопродуктивности сосновых насаждений // Лесоводственные исследования на зонально-типологической основе. Архангельск: АИЛЛХ, 1984. С. 39–44. [Sukhanov V.I. Zonal-Typological Features of Resin Productivity of Pine Plantations. *Silvicultural Studies on the Zonal-Typological Basis*. Arkhangelsk, AILLKh Publ., 1984, pp. 39–44].

14. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Болотов И.Н., Филиппов Б.Ю., Адай Д.М. Биологическая продуктивность культур сосны обыкновенной северотаежного лесного района // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С.101–108. [Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Bolotov I.N., Filippov B.Yu., Adayi D.M. Biological Productivity of Scots Pine Cultures in the Northern Taiga Forest Area. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 101–108]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.6.101](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.101), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b75/101_108.pdf
15. Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Барзут В.М. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: АГТУ, 1997. 140 с. [Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzut V.M. *Biological and Ecological Features of Pine Growth in the Northern Subzone of European Taiga*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1997. 140 p.]
16. Чудный А.В. О некоторых признаках и свойствах сосен высокой и низкой смолопродуктивности в Кировской области // Селекция и семеноводство древесных пород. М.: Лесн. пром-сть, 1965. С. 97–111. [Chudnyy A.V. On Some Features and Properties of Pines of High and Low Resin Productivity in the Kirov Region. *Breeding and Seed Production of Tree Species*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965, pp. 97–111].
17. Шульгин В.А. Отбор и разведение сосен высокой смолопродуктивности. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 87 с. [Shul'gin V.A. *Selection and Breeding of Pine Trees of High Resin Productivity*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 87 p.]
18. Gravalos I., Kateris D., Xyradakis P., Gialamas T., Loutridis S., Augousti A., Georgiades A., Tsiropoulos Z. A Study on Calorific Energy Values of Biomass Residue Pellets for Heating Purposes. *Proceedings of the 43th International Symposium on Forestry Mechanisation: "Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment"*, Padova, July 11–14, 2010. Padova, Italy, 2010, pp. 1–9.
19. Hough W.A. *Caloric Value of Some Forest Fuels of the Southern United States*. USDA Forest Service Research Note SE-120. Asheville, NC, Southeastern Forest Experiment Station, 1969. 6 p.
20. Janssen R., Helm P., Grimm P., Grassi G., Coda B., Grassi A., Agterberg A., Fjällström T., Lindstedt J., Moreira J.R., Masera O., Baoshan Li, Sada Sy B. A Global Network on Bioenergy – Objectives, Strategies and First Results. *Proceedings of the 12th European Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Amsterdam, June 17–21, 2002*. Amsterdam, 2002.
21. Karjalainen T., Asikainen A., Ilavsky J., Zamboni R., Hotari K.-E., Röser D. Estimation of Energy Wood Potential in Europe. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 6*. Finland, MELTA, 2004. 43 p.
22. Librenti E., Ceotto E., Candello M. Biomass Characteristics and Energy Contents of Dedicated Lignocellulose Crops. *Biomass and Waste*, 2010, pp. 7–8.
23. Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location. *BioResources*, 2014, no. 9(1), pp. 1212–1214.
24. Obernberger I., Thek G. Physical Characterisation and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels with Regard to Their Combustion Behavior. *Biomass and Bioenergy*, 2004, vol. 27, iss. 6, pp. 653–669. DOI: [10.1016/j.biombioe.2003.07.006](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006)
25. Orémusová E., Tereňová L., Réh R. Evaluation of the Gross and Net Calorific Value of the Selected Wood Species. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1001, pp. 292–299. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.292](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.292)

26. Petersen Raymer A.K. A Comparison of Avoided Greenhouse Gas Emissions When Using Different Kinds of Wood Energy. *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 30, iss. 7, pp. 605–617. DOI: [10.1016/j.biombioe.2006.01.009](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.01.009)

27. Quaak P., Knoef H., Stassen H. *Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies*. World Bank Technical Paper 422. Washington, DC, World Bank, 1999. 78 p.

28. Ravindranath N.H., Balachandra P., Dasappa S., Usha Rao K. Bioenergy Technologies for Carbon Abatement. *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 30, iss. 10, pp. 826–837. DOI: [10.1016/j.biombioe.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.02.003)

29. White R.H. Effect of Lignin Content and Extractives on the Higher Heating Value of Wood. *Wood and Fiber Science*, 1987, vol. 19(4), pp. 446–452.

30. Zeng W.-S., Tang S.-Z., Xiao Q.-H. Calorific Values and Ash Contents of Different Parts of Masson Pine Trees in Southern China. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, iss. 4, pp. 779–786. DOI: [10.1007/s11676-014-0525-3](https://doi.org/10.1007/s11676-014-0525-3)

CALORIFIC VALUE OF PINE WOOD IN CROPS OF THE NORTHERN TAIGA FOREST AREA

*Olga N. Tyukavina*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

*Denis N. Klevtsov*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-157X>

D.M. Adaj^{1,2}, Postgraduate Student

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: o.tukavina@narfu.ru, d.klevtsov@narfu.ru

²Takoradi Technical University, P.O. BOX 256, Takoradi, Western Region, Ghana; e-mail: georgeadayi@yahoo.com

Abstract. Calorific value of plants is an important characteristic for evaluation of material cycles and energy conversion in forest ecosystems, as well as a qualitative characteristic of plant raw materials as fuel. Wood biofuel is increasingly used in the production of thermal energy, in this regard, it is important to study the calorific value of wood, as well as the conditions for growing high-quality raw materials. The research purpose is to identify the dependence of the calorific value of pine wood in crops on its macroscopic structure, the assimilation apparatus characteristics, density and height of the stand. Small, medium, and large not damaged model trees without pathologies were selected on temporary sample plots. Cores from which were taken with an increment borer at a height of 1.3 m to measure radial growth on the semi-automatic complex Lintab-6 with an accuracy of ± 0.01 mm. The calorific value of pine wood was determined in an absolutely dry state using an automated bomb calorimeter ABK-1V. To study the influence of the assimilating apparatus on the wood calorific value, needles of all ages were selected from the middle branch of the model tree crown. Cross sections were prepared from the middle part of a needle using a sledge microtome MS-2. Histological elements of a needle were measured by the Axio Scope.A1 microscope using the IMAGE-PRO INSIGHT 8.0 software. The average heat capacity of pine wood in heath-lichen pine forests is $(20\ 731 \pm 133)$ J/g;

in cowberry pine forests – (20 618±141) J/g; in bilberry pine forests – (20 513±104) J/g at a stand density from 1160 to 3806 pcs/ha. The highest pine wood heat capacity is found in heath-lichen pine forests with the density of stand 5021 pcs/ha. The increased pine wood heat capacity in pine forests with high stand density is due to a reduction in the number of needles on the branch ($r = -0.75$) and an increase in the diameter of resin channels ($r = -0.88$). The influence of the average stand height and the annual layer structure on the calorific value of pine wood was found.

For citation: Tyukavina O.N., Klevtsov, D.N., Adaj D.M. Calorific Value of Pine Wood in Crops of the Northern Taiga Forest Area. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 82–91. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-82-91

Keywords: calorific value, wood, pine, forest type, radial growth, needles.

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

Поступила 29.11.19 / Received on November 29, 2019

УДК 630*232.13+630*176.232.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-92-98

ОБЪЕМ И КАЧЕСТВО СТВОЛА ГИБРИДНОЙ И ОБЫЧНОЙ ОСИНЫ В КЛОНОВОМ АРХИВЕ

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; e-mail: fedorkov@ib.komisc.ru

Аннотация. Гибридная осина как быстрорастущая древесная порода с коротким оборотом рубки представляет интерес для создания плантационных лесных культур при интенсивном ведении лесного хозяйства. Ее древесина используется для производства бумаги, пиломатериалов, фанеры и в качестве биотоплива. Цель исследования – сравнение объема и качества ствола гибридной и обычной осины, а также оценка межкленовой изменчивости по этим признакам в условиях холодного климата. Приведены результаты исследования 42 клонов гибридной и 10 клонов обычной осины в клонном архиве Института биологии Коми НЦ УрО РАН, заложенном в 2009 г. 1-летними укорененными саженцами с закрытой корневой системой при размещении растений 3×3 м.

Донорские растения получены на селекционной станции Наарастенсыгjä Института природных ресурсов Финляндии. Были разработаны шкалы для оценки жизненного состояния растений и прямизны ствола. При этом регистрировали высоту деревьев, наличие на их стволах язв, рубцов и морозобойных трещин. При средней сохранности 75 % в 10-летнем биологическом возрасте доля древовидных растений составила 70, кустовидных – 5 %. Гибридная осина статистически значительно превосходила обычную осину по диаметру на 65 %, по высоте – на 49 %, по объему ствола – более чем в 3 раза. Доля слабоискривленных стволов составила около 7, стволов с трещинами коры – около 3 %. Хорошая сохранность, качество ствола и быстрый рост гибридной осины позволили сделать вывод о ее перспективности для плантационного лесовыращивания в таежной зоне.

Для цитирования: Федорков А.Л. Объем и качество ствола гибридной и обычной осины в клонном архиве // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 92–98. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-92-98.

Финансирование: Данное исследование выполнено в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском северо-востоке России» (АААА-А17-117122090014-8).

Благодарность: Автор благодарен сотрудникам селекционной станции Наарастенсыгjä Института природных ресурсов Финляндии и особенно д-ру Пертти Пуллкинену и инженеру Раймо Яатинену за предоставленный донорский материал гибридной осины и ценные консультации. Закладка архива клонов была профинансирована ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК».

Ключевые слова: *Populus tremula* L., *Populus tremuloides* Michx., клон, рост ствола, сохранность.

Введение

Виды и гибриды рода *Populus* традиционно считаются перспективными для плантационного лесовыращивания, в том числе и на Европейском Севере

России [3]. К ним относится и гибридная осина (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.), полученная в результате скрещивания евразийской (обычной) и американской осины. Быстрый рост, короткий оборот рубки и способность восстанавливаться вегетативным путем обуславливают интерес к ней лесных селекционеров при создании многоцелевых лесных плантаций в странах Северной Европы [10, 12, 14, 17, 18, 21].

В южной Швеции и Финляндии среднегодовой прирост стволовой древесины гибридной осины достигает 25 м³/га в год при обороте рубки 25 лет, что соответствует 8,2 т сухого вещества [9, 16]. Древесина гибридной осины является сырьем для целлюлозно-бумажной промышленности, используется в качестве биотоплива и даже как пиловочник и фанерный кряж. Заложены первые опыты по применению гибридной осины для фиторемидации, т. е. для очистки загрязненных нефтепродуктами почв [7, 11]. Анализ экономических аспектов выращивания гибридной осины в Эстонии показал, что создание плантаций этой породы на неиспользуемых сельскохозяйственных землях финансово выгодно [22].

Полевых испытаний гибридной осины в России проводится немного, причем проходят они, как и упомянутые зарубежные, в условиях более теплого климата по сравнению с климатом Европейского Севера России. Так, быстрым ростом и хорошей приживаемостью в молодом возрасте характеризуется гибридная осина на испытательной плантации в Ленинградской области [1, 4]. Гибридные семьи от скрещивания американской и обычной осины, представленные в популутеме Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии (г. Воронеж) обгоняли по запасу местную осину более чем в 1,5 раза [19]. В 2016 г. в этом институте проведена новая серия скрещиваний обычной и американской осины [20].

Цель работы – сравнение объема и качества ствола гибридной и обычной осины, а также оценка межклоновой изменчивости по этим признакам в клоновом архиве для холодного климата Республики Коми.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служил клоновый архив Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Республика Коми), заложенный посадкой 42 клонов гибридной и 10 клонов (по 3–5 рамет в клоне) обычной осины (в качестве контроля) в сентябре 2009 г. Всего было высажено 215 однолетних укорененных саженцев с закрытой корневой системой по схеме полностью рендомизированных однодеревных делянок с размещением растений 3×3 м. Посадочный материал выращивался в тепличном комплексе ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК», донорские растения получены на селекционной станции Наарастенсүгjä Института природных ресурсов Финляндии [6].

Исследование проведено в мае 2019 г. Жизненное состояние растений в архиве оценивали по следующей шкале: 1 – древовидное растение, 2 – кустовидное, 3 – погибшее. Растения высотой ниже 1,5 м учитывали по количеству. У деревьев выше 1,5 м измеряли диаметр на высоте груди (1,3 м) и высоту. Прямоизну ствола оценивали по следующей шкале: 1 – ствол прямой, 2 – слабо искривленный, 3 – сильно искривленный. Регистрировали наличие на стволах деревьев язв, рубцов и морозобойных трещин.

Поскольку формулы расчета объемов маломерных стволов гибридной осины не разработаны, для обеих пород использовали формулу Г.С. Войнова [2] для обычной осины:

$$V = 0,0000372d^2h + 0,0001413d,$$

где V – объем ствола в коре, м³; d – диаметр ствола (см) на высоте 1,3 м; h – высота ствола, м.

Значения объемов стволов затем были переведены в дециметры кубические. В ходе статистического анализа для каждого клона рассчитывали средние значения диаметра, высоты и объема ствола. Согласно Н.Н. Свалову [5], распределение средних значений близко к нормальному распределению, даже если исходная совокупность не является нормальной, что позволяет использовать параметрические тесты для статистического анализа данных. Значимость различий между гибридной и евразийской осиной оценивали по t-критерию Стьюдента, значимость различий между клонами – с помощью дисперсионного анализа. Для статистического анализа использовали пакет программ Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

В среднем сохранность растений в клоновом архиве 10-летнего возраста составила 75 %, что на 1 % выше по сравнению с данными, полученными в ходе предыдущего исследования, проведенного в архиве 5-летнего возраста [6]. Такая, на первый взгляд, парадоксальная ситуация объясняется тем, что несколько растений, учтенных в результате обмерзания побегов в 2014 г. как «погибшие», дали впоследствии корневые отпрыски. Для гибридной осины сохранность составила 76 %, для обычной осины – 67 %. Средняя сохранность по результатам нашего опыта оказалась даже на 10 % выше, чем на экспериментальной плантации гибридной осины 5-летнего возраста в Ленинградской области [1]. В целом доля древовидных растений – 70 % от числа высаженных (71 и 63 % для гибридной и обычной осины соответственно), доля кустовидных – 5 % (5 и 3 % для гибридной и обычной осины).

Гибридная осина статистически значимо превосходила обычную осину по диаметру на 65 % ($t = 3,108$, $p = 0,003$), по высоте – на 49 % ($t = 3,562$, $p = 0,001$), по объему ствола – более чем в 3 раза ($t = 2,466$, $p = 0,017$) (см. таблицу, рисунок).

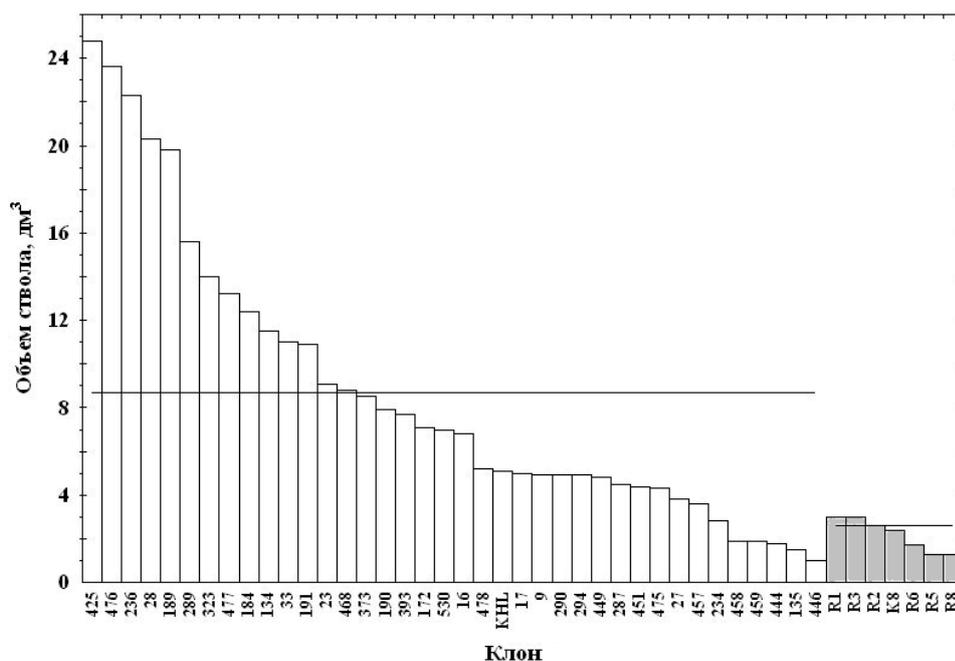
Статистики* ростовых признаков гибридной и обычной осины в 10-летнем возрасте

Осина	Диаметр, см	Высота, м	Объем ствола, дм ³
Гибридная	5,10±0,27	6,40±0,24	8,70±1,10
Обычная	3,10±0,24	4,30±0,22	2,60±0,51

*Среднее значение с ошибкой.

Полученные нами данные о средней высоте гибридной осины в 10-летнем возрасте (см. таблицу) соответствуют данным шведских ученых (высота – 6...8 м в зависимости от условий произрастания) [13]. Данные о диаметре не совпадают с данными [15] и [9] – цифры, полученные нами, ниже. Это, по-видимому, связано с тем, что число клонов в нашем случае значительно больше.

Различия между клонами по объему ствола были статистически значимы для гибридной осины ($F\Phi > F_T$; $p < 0,001$), но не существенны для евразийской осины ($F\Phi < F_T$; $p > 0,05$) (см. рисунок). Значительная межклоновая изменчивость гибридной осины по ростовым признакам свидетельствует о возможности успешного проведения клонового отбора [8].



Объем ствола гибридной (белые столбцы) и обычной (серые столбцы) осины (горизонтальные линии показывают средний объем ствола для каждой из древесных пород; номера клонов присвоены Институтом природных ресурсов Финляндии)

Stem volume of hybrid (white columns) and common (grey columns) aspens. Horizontal lines show average stem volume for each species. Clone numbers assigned by the Natural Resources Institute Finland

Доля слабоискривленных стволов от числа древовидных растений составила 6,7 % (7,5 и 5,3 % для гибридной и обычной осины соответственно). Сообщается, что морозная зима 2012-2013 гг. привела к образованию большого числа морозобойных трещин коры на стволах гибридной осины в клоновых архивах Латвии [15]. В нашем случае трещины коры были обнаружены только у 4 деревьев гибридной осины, что составило около 3 % от их общего числа.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования гибридной осины для плантационного лесовыращивания в таежной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бойцов А.К., Жигунов А.В., Григорьев А.А., Бондаренко А.С. Оценка перспективности использования клонов гибридных тополей и осины для плантационного лесовыращивания в условиях Северо-Запада России // Леса России: политика, промышлен-

ность, наука, образование: материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 г. Т. 1 / под. ред. В.М. Гельдо. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 40–43. [Boytsov A.K., Zhigunov A.V., Grigor'ev A.A., Bondarenko A.S. Assessment of the Prospects of Using of Hybrid Poplar and Aspen Clones for Plantation Reforestation in the North-West of Russia. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, and Education: Proceedings of the International Conference, Saint Petersburg, May 23–24, 2018*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2018, pp. 40–43].

2. Войнов Г.С., Чупров Н.П., Ярославцев С.В. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми). Архангельск: СевНИИЛХ, 2012. 672 с. [Voynov G.S., Chuprov N.P., Yaroslavtsev S.V. *Forest Valuation Handbook for the North-East Part of the Russian Federation (Official Materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk and Vologda Regions and Komi Republic)*. Arkhangelsk, SevNIILH Publ., 2012. 672 p.]

3. Демидова Н.А., Дуркина Т.М. Особенности роста и развития тополей в условиях интродукции на Европейском Севере России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 78–87. [Demidova N.A., Durkina T.M. Growth and Development Features of Poplars in the European North of Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 5, pp. 78–87]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/97b/lkh8.pdf>

4. Жигунов А.В., Маркова И.А., Григорьев А.А., Вюхлиш Г., Ракестроу Д. Испытания клонов гибридных тополей и осины на плантациях в условиях Северо-Запада России // Изв. СПбЛТА. 2013. Вып. 205. С. 16–24. [Zhigunov A.V., Markova I.A., Grigor'ev A.A., Viukhlis G., Rakestrou D. Comparative Test of Hybrid Poplar and Hybrid Aspen Clones on the Hardwood Plantations in North-West Russia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2013, vol. 205, pp. 16–24].

5. Свалов Н.Н. Вариационная статистика. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 176 с. [Svalov N.N. *Analysis of Variance*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 176 p.]

6. Федорков А.Л. Жизненное состояние и высота деревьев гибридной осины в клоновом архиве // Лесоведение. 2016. № 3. С. 195–198. [Fedorkov A.L. Vitality and Height of Quaking Aspen Trees in the Clone Archive. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2016, no. 3, pp. 195–198].

7. Hassinen V., Vallinkoski V.-M., Issakainen S., Tervahauta A., Kärenlampi S., Servomaa K. Correlation of Foliar MT2b Expression with Cd and Zn Concentrations in Hybrid Aspen (*Populus tremula* × *tremuloides*) Grown in Contaminated Soil. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, iss. 3, pp. 922–930. DOI: [10.1016/j.envpol.2008.10.023](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.023)

8. Hjelm K., Rytter L. The Demand of Hybrid Aspen (*Populus tremula* × *P. tremuloides*) on Site Conditions for a Successful Establishment on Forest Land. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 5, art. 10036. DOI: [10.14214/sf.10036](https://doi.org/10.14214/sf.10036)

9. Hytönen J., Beuker E., Viherä-Aarnio A. Clonal Variation in Basic Density, Moisture Content and Heating Value of Wood, Bark and Branches in Hybrid Aspen. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 2, art. 9938. DOI: [10.14214/sf.9938](https://doi.org/10.14214/sf.9938)

10. Jansons Ā., Zeps M., Rieksts- Riekstiņš J., Matisons R., Krišāns O. Height Increment of Hybrid Aspen *Populus tremuloides* × *P. tremula* as a Function of Weather Conditions in Central Part of Latvia. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 5, art. 1124. DOI: [10.14214/sf.1124](https://doi.org/10.14214/sf.1124)

11. Malá J., Máchová P., Cvrčková H., Čížková L. Aspen Micropropagation: Use for Phytoremediation of Soils. *Journal of Forest Science*, 2006, vol. 52, no. 3, pp. 101–107. DOI: [10.17221/4491-JFS](https://doi.org/10.17221/4491-JFS)

12. Pliura A., Suchockas V., Sarsekova D., Gudynaitė V. Genotypic Variation and Heritability of Growth and Adaptive Traits, and Adaptation of Young Poplar Hybrids at

Northern Margins of Natural Distribution of *Populus nigra* in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 2014, vol. 70, pp. 513–529. DOI: [10.1016/j.biombioe.2014.09.011](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.011)

13. Rytter L. *Sustainable Cultivation of Hybrid Aspen with Natural Shoot Regeneration. Arbetsrapport 2014–2019*. Uppsala, Skogforsk, 2019, vol. 1014. 34 p.

14. Rytter L., Rytter R.-M. Productivity and Sustainability of Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) Root Sucker Stands with Varying Management Strategies. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 401, pp. 223–232. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.07.020](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.020)

15. Šēnhofa S., Zeps M., Gailis A., Kāpostiņš R., Jansons Ā. Development of Stem Cracks in Young Hybrid Aspen Plantations. *Forestry Studies*, 2016, vol. 65, iss. 1, pp. 16–23. DOI: [10.1515/fsmu-2016-0008](https://doi.org/10.1515/fsmu-2016-0008)

16. Stener L.-G., Westin J. Early Growth and Phenology of Hybrid Aspen and Poplar in Clonal Field Tests in Scandinavia. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 3, art. 5656. DOI: [10.14214/sf.5656](https://doi.org/10.14214/sf.5656)

17. Stener L.-G., Rungis D., Belevich V., Malm J. Change of Clonal Frequency in the Second Root Sucker Generation of Hybrid Aspen. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 408, pp. 174–182. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.10.034](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.034)

18. Stener L.-G., Rytter L., Beuker E., Tullus H., Lutter R. *Hybrid Aspen and Poplars in the Baltic Sea Region and Iceland. Arbetsrapport 999–2019*. Uppsala, Skogforsk, 2019, vol. 999. 41 p.

19. Tsarev A.P. Growth and Breeding of Aspen in Russia. *Silvae Genetica*, 2013, vol. 62, iss. 1-6, pp. 153–160. DOI: [10.1515/sg-2013-0020](https://doi.org/10.1515/sg-2013-0020)

20. Tsarev A., Tsareva R., Tsarev V., Fladung M., Wühlisch G. Aspen Hybridization: Parents' Compatibility and Seedlings' Growth. *Silvae Genetica*, 2018, vol. 67, iss. 1, pp. 12–19. DOI: [10.2478/sg-2018-0002](https://doi.org/10.2478/sg-2018-0002)

21. Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. Short-Rotation Forestry with Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 1, pp. 10–29. DOI: [10.1080/02827581.2011.628949](https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628949)

22. Tullus A., Lukason O., Vares A., Padari A., Lutter R., Tullus T., Karoles K., Tullus H. Economics of Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) and Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Plantations on Abandoned Agricultural Lands in Estonia. *Baltic Forestry*, 2012, vol. 18(2), pp. 288–298.

STEM VOLUME AND QUALITY OF HYBRID AND COMMON ASPEN IN THE CLONAL ARCHIVE

Aleksey L. Fedorkov, Doctor of Biology, Leading Research Scientist;

ResearcherID: C-8811-2009, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7800-7534>

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

Abstract. Hybrid aspen as a fast growing tree species with short rotation is of interest for the creation of plantation forest crops in intensive forest management. Hybrid aspen wood is used to produce paper, lumber, and plywood, as well as biofuel. The research purpose is to compare the volume and quality of the stem of hybrid and common aspen, and to assess interclonal variability by these features in cold climate areas. The research results of 42 hybrid and 10 common aspen clones in the clonal archive of the Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences are presented. The archive was

laid out in 2009 by 1-year-old rooted seedlings with a closed root system with the placement of plants 3×3 m. Donor plants were obtained at the Haapastensyrjä Tree Breeding Station of the Natural Resources Institute Finland. Scales have been developed for assessing plant health and stem straightness. Herewith, the height of trees, the presence of sores, scars and frost clefts on their stems were recorded. The share of tree-like and shrub-like plants was 70 and 5 %, respectively, with an average survival of 75 % at the 10-year biological age. Hybrid aspen was statistically significant in terms of superiority to standard aspen in diameter by 65 %, height by 49 %, and stem volume by more than 3 times. The share of slightly crooked stems was about 7 %, and the share of stems with bark cracks was about 3 %. Good survival, stem quality, and rapid growth of hybrid aspen made it possible to conclude that it is a promising species for plantation reforestation in the taiga zone.

For citation: Fedorkov A.L. Stem Volume and Quality of Hybrid and Common Aspen in the Clonal Archive. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 92–98. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-92-98

Funding: The research was carried out as part of the state assignment of the Institute of Biology (Komi Scientific Centre, UB RAS) “Spatial and Temporal Dynamics of the Structure and Productivity of Phytocenoses of Forest and Bog Ecosystems in the European North-East of Russia” (AAA-A17-117122090014-8).

Acknowledgements: The author is grateful to the staff of the Haapastensyrjä Tree Breeding Station of the Natural Resources Institute Finland and especially to Dr. Pertti Pulkkinen and research engineer Raimo Jaatinen for providing donor material of hybrid aspen and valuable advice. Laying out of the clonal archive was financially supported by the Mondi Syktyvkar JSC.

Keywords: *Populus tremula* L., *Populus tremuloides* Michx., clones, stem growth, survival.

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

Поступила 05.09.19 / Received on September 5, 2019

УДК 634*9:551.48

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-99-111

РАЙОНИРОВАНИЕ ВОДОСБОРОВ МАЛЫХ РЕК ЮГА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ ПО ВОДООХРАННО-ЗАЩИТНОЙ РОЛИ ЛЕСОВ

О.Ю. Кошелева, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [B-3579-2018](https://orcid.org/0000-0002-9616-2383),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9616-2383>

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; e-mail: olya_ber@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа пространственного размещения защитных лесных насаждений в границах водосборных бассейнов юга Приволжской возвышенности (в пределах Волгоградской области). Полученные данные важны для планирования агролесомелиоративного обустройства земель. Дешифрирование по космическим снимкам 133 водосборов и крупномасштабное (М 1:100 000) изолинейное картографирование лесистости на ключевых участках позволили установить, что для большинства водосборов характерна низкая лесистость центральной части бассейна, обусловленная сельскохозяйственным использованием территории. Основную средостабилизирующую функцию выполняют крупные лесные массивы естественного (пойменные, нагорные и байрачные) и искусственного (защитные лесные полосы) происхождения, локализованные у истока (на водоразделах) и устья малых рек. В зависимости от вида насаждений, а также наличия или отсутствия их у истока или устья реки выделено 6 типов лесистости водосборов юга Приволжской возвышенности: I – исток и устье имеют максимумы (относительно остальной площади водосбора) естественной лесистости; II – исток имеет максимум искусственной лесистости, устье – максимум естественной; III – у истока отсутствуют насаждения, в устье – максимум естественной лесистости; IV – у истока максимум естественной лесистости, в устье насаждений нет; V – у истока максимум искусственной лесистости, в устье насаждений нет; VI – у истока и устья насаждений нет. Установлено, что наибольшую площадь в пределах юга Приволжской возвышенности занимают водосборы III типа (38,3 %), для рельефа которых характерно преобладание пологих склонов, в наибольшей степени подвергшихся распашке и уничтожению естественной лесной растительности. Вместе с водосборами IV–VI типов, не имеющими в нижнем течении никакого облесения, около 59,2 % юга Приволжской возвышенности оказываются не защищенными от процессов водной эрозии и дефляции.

Для цитирования: Кошелева О.Ю. Районирование водосборов малых рек юга Приволжской возвышенности по водоохранно-защитной роли лесов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 99–111. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-99-111

Финансирование: Работа выполнена по теме Государственного задания ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН (регистрационный номер АААА-А16-116122010038-9).

Ключевые слова: защитные леса, Приволжская возвышенность, водосбор, лесистость, дешифрирование космических снимков, изолинейное картографирование, районирование.

Введение

Приволжская возвышенность представляет собой макроландшафтное образование, которое в силу разнообразия тектонических, геоморфологических и

почвенно-климатических условий всегда вызывало большой интерес исследователей, в том числе и с точки зрения районирования (типологии): ботанико-географического [4], структурно-геоморфологического [8], ландшафтного [2]. В пределах Волгоградской области Приволжская возвышенность занимает 22,6 % и является регионом активного аграрного использования. По территориальному размещению лесных ресурсов она, как и вся область, относится к малолесным регионам страны [5]. В условиях преобладающего безлесья и повсеместной распашки земель на юге Приволжской возвышенности средостабилизирующую роль выполняют остатки естественных лесов, произрастающих в местах оптимальных по почвенно-гидрологическим условиям (днища и склоны балок, поймы рек, территории с близким залеганием грунтовых вод), а также искусственные защитные лесные насаждения (ЗЛН) различного функционального назначения и лесоводственного состояния. Все перечисленные лесные насаждения относятся к категории защитных лесов.

Лесопокрытая часть водосборного бассейна оказывает большое влияние на гидрологический режим рек: лес существенно уменьшает поверхностный сток дождевой воды в русла, тем самым значительно увеличивая подземный сток. Наоборот, участки без леса, особенно образовавшиеся после пожаров и рубок, способствуют росту общего поверхностного стока и развитию процессов эрозии, что является предпосылкой загрязнения и заиления водных объектов [9, 14, 22]. Таким образом, именно пространственное влияние составляет наиболее существенное свойство естественных лесов и лесных насаждений, обеспечивающее их лесомелиоративный территориальный эффект. Еще Ю.П. Бяллович ввел понятие «система лесов», понимая под этим множество взаимодействующих лесных биогеоценозов. Он считал, что «... между лесными биогеоценозами, с одной стороны, и соседними с ними нелесными биогеоценозами – с другой, устанавливаются более сильные связи, чем между соседними лесными биогеоценозами. Наиболее ярко это выступает в таких биогеомассивах, в которых лесные биогеоценозы чередуются с нелесными, так как к фактору контрастности здесь присоединяется фактор пространственной разобщенности (удаленности) лесных биогеоценозов» [3, с. 52].

Хорологический подход к изучению лесов и лесных насаждений выражается в оперировании понятием «лесистость» как долей лесопокрытой площади в общей площади какой-либо территории (в частности, водосборного бассейна реки). Использование данного понятия позволяет более дифференцированно представить распределение лесных земель, удобно для сравнения различных территорий между собой и картографирования.

Знание пространственных особенностей распределения различных типов лесных насаждений (естественных и искусственных) играет очень важную роль для малолесных регионов юга европейской части России, в частности для планирования и проектирования систем полезащитных и противоэрозионных насаждений. На фоне континуально выраженной геоморфологической неоднородности данной территории мозаичность лесных насаждений (как естественного, так и искусственного происхождения), наблюдаемая на уровне отдельного водосбора, имеет определенный характер и достаточно хорошо поддается количественному измерению и картографированию.

Целью данного исследования является выявление особенностей пространственного размещения лесных насаждений, районирование и картографирование территории юга Приволжской возвышенности по критерию лесистости в пределах водосборных бассейнов малых рек и крупных овражно-балочных систем.

Объекты и методы исследования

Приволжская возвышенность представляет собой часть Восточно-Европейской равнины и в пределах Волгоградской области ограничена долиной р. Волги и Волгоградским водохранилищем – на востоке, р. Дон и Волго-Донским судоходным каналом – на юге, долиной р. Медведица и Медведицкими Ярами – на западе. Таким образом, в ее пределы попадают ландшафты Медведицко-Иловлинского и Иловлинско-Волжского междуречий, занимающие площадь около 25,5 тыс. км². Территория Приволжской возвышенности расчленена многочисленными долинами рек, балками и оврагами и имеет ступенчатый рельеф и четко выраженное асимметричное строение: восточный (волжский) склон высокий и крутой, сильно расчлененный эрозийной сетью, западный – более низкий и пологий.

Естественные лесные биогеоценозы в пределах юга Приволжской возвышенности представлены нагорными, байрачными и пойменными лесами.

Нагорные леса из дуба и березы произрастают на водоразделе балок Березовки (приток р. Медведица) и Ольховки (приток р. Иловля), а также на плакорях Гусельско-Тетеревятского кряжа. Сохранности этих лесов до настоящего времени способствовали высокие значения крутизны склонов, делающие эти земли непригодными для использования в сельском хозяйстве.

Комплексы байрачных лесов, сформировавшиеся по склонам и днищам балок, представлены дубом черешчатым (*Quercus robur*), липой мелколистной (*Tilia cordata*), вязом гладким (*Ulmus laevis*), кленом остролистным (*Acer platanoides*) и татарским (*A. tataricum*) и другими древесно-кустарниковыми породами.

Относительно крупные массивы пойменных лесов до сих пор сохранились в долинах рек Иловля и Медведица и состоят из пойменного экотипа дуба черешчатого, осины (*Populus tremula*), ольхи черной (*Alnus glutinosa*), а также тополя белого (*Populus alba*) и черного (*P. nigra*) [7].

Искусственные лесные насаждения представлены разрозненными полезащитными и приовражными полосами и массивами лесных культур. Крупными искусственными объектами лесоразведения на данной территории являются государственные защитные лесные полосы (ГЗЛП) «Камышин–Волгоград» (три ленты шириной по 60 м с межклеточными промежутками шириной 300 м общей протяженностью 297 км) и «Волгоград–Элиста–Черкесск» (четыре ленты шириной по 60 м с 300-метровыми межклеточными пространствами).

Методологической основой для изучения пространственного размещения системы лесных насаждений в малолесных регионах юга страны послужила концепция поля, реализуемая через принципы изолинейного картографирования лесистости [1, 10, 17–20]. Необходимо отметить, что данный принцип, т. е. картографирование на основе регулярной сетки по квадратам, близок к сеточному картированию, которое широко используется во всем мире при анализе флористических данных [16]. Одним из главных преимуществ сбора данных по регулярной сетке является повышение равномерности исследований на больших территориях.

Вся Приволжская возвышенность была разделена на 133 водосборных бассейна рек, впадающих в Дон и его притоки – Медведицу и Иловлю, а также в Волгу (Волгоградское водохранилище). В качестве ключевых участков для картографирования на основе крупномасштабных спектрально-космических снимков высокого разрешения QuickBird (1:100 000) и проведения полевых исследований были выбраны водосборные бассейны рек Добринка, Лычак, Ольховка, Бердия, Щербаковка, Пролейка и Сухая Дубовка.

Изолинейные карты лесистости ключевых участков создаются в 2 этапа.

На первом этапе в ходе дешифрирования космических снимков [11, 21, 23] выделяются все лесные насаждения, которые предполагается учесть при оценке лесистости: естественные байрачные, нагорные и пойменные леса, искусственные полевые защитные и прибалочные лесные полосы и массивы. На втором этапе на космоснимок накладывается регулярная квадратная сетка, внутри каждого квадрата которой определяется площадь насаждений. Полученные значения делятся на площадь ячейки и таким образом вычисляется для каждой из них показатель лесистости, т. е. площадь лесов (в км² или в %) на 1 км².

Для выявления особенностей изменения лесистости в границах водосбора использовался метод профилирования: закладывались 2 продольных (от истока водосбора до его устья) профили – гипсометрический (по цифровой модели рельефа) и профиль лесистости (по изолинейной карте лесистости). Таким образом каждой высотной отметке рельефа ставилось в соответствие определенное значение лесистости. По полученному профилю лесистости строилась аппроксимирующая кривая распределения лесистости в пределах водосборного бассейна. В качестве цифровых моделей рельефа для юга Приволжской возвышенности использовались данные радарно-топографической съемки SRTM (Shuttle radar topographic mission), доступные на сайте Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) [12], при разрешении рельефа 3 угловые секунды (90 м).

Результаты исследования и их обсуждение

Водосборы рек, впадающих в Медведицу и Иловлю, в устьевой части имеют высокую естественную лесистость, обеспеченную за счет пойменных лесов этих двух рек. Овражно-балочные системы, впадающие в Волгу на крутом восточном склоне Иловлинско-Волжского междуречья, в устьевой части пойменных лесов не имеют.

Результаты дешифрирования пространственного размещения лесных насаждений на всех водосборах по космическим снимкам и изолинейного картографирования ключевых участков позволили установить, что в истоках малых рек юга Приволжской возвышенности можно выделить следующие виды лесистости:

высокая естественная лесистость, которая обеспечивается крупными массивами нагорных и байрачных дубрав;

высокая искусственная лесистость, обеспеченная за счет крупных массивов ЗЛН;

минимальная, или «нулевая», лесистость (естественная и искусственная) – отсутствие насаждений или их наличие в таком объеме, который не превышает пространственное разрешение снимка [24].

Картографирование лесистости на ключевом участке «Добринка», расположенном в пределах Медведицко-Иловлинского междуречья, показало, что наличие нагорных и байрачных лесов может обеспечить лесистость в верховьях водосборного бассейна свыше 15 % (рис. 1).

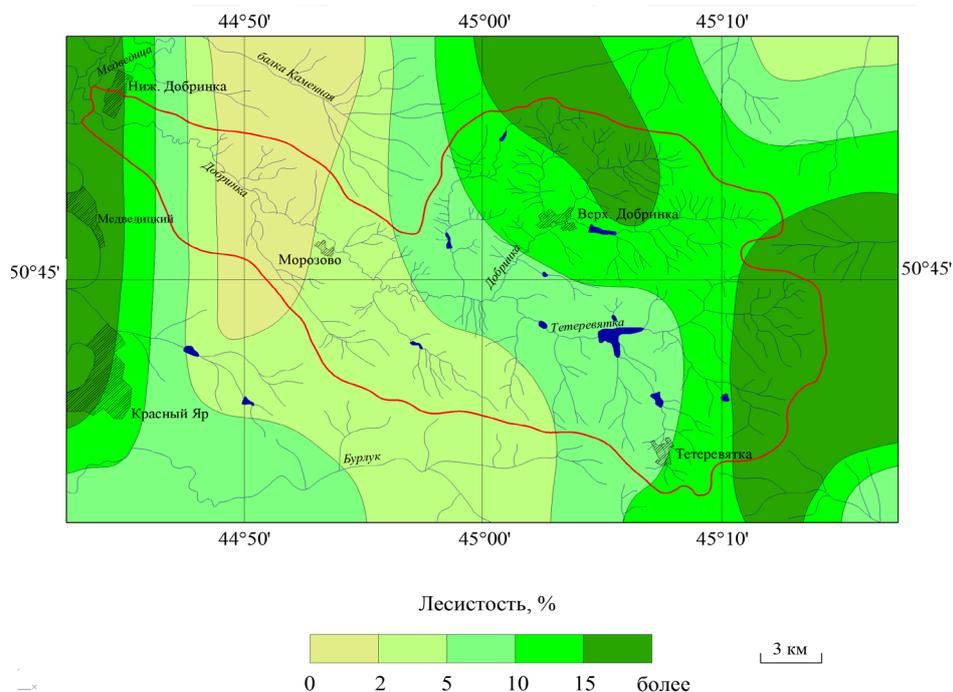


Рис. 1. Изолинейная карта лесистости ключевого участка Добринка (М 1:250 000)

Fig. 1. Isoline map of forest cover of the Dobrinka key area (Scale – 1:250 000)

Высокая искусственная лесистость характерна в основном для истоков овражно-балочных систем и малых рек Иловлинско-Волжского междуречья, так как здесь по водоразделу проходит ГЗЛП «Камышин–Волгоград». Например, на ключевом участке «Бердия» установлено повышение лесистости за счет ГЗЛП в верховьях малых рек Иловлинско-Волжского междуречья до 10 %, при этом, что лесистость в центральной части водосборов не превышает 5 %.

Отсутствие лесных насаждений (нулевая лесистость) у истоков малых рек характерно для водосборных бассейнов Медведицко-Иловлинского междуречья к югу от малой р. Ольховка. Свыше 90 % водосборных бассейнов этого ландшафтного района занимают земли с плодородными темно-каштановыми почвами и крутизной до 2°, т. е. пригодные для использования в сельскохозяйственном производстве. Как следствие, водосборы малых рек практически полностью распаханы. Такие малые реки, как Лычак, Арчеда, Ширяй и другие, не имеют в своих истоках крупных массивов естественных или искусственных насаждений. Первые были сведены в целях максимального использования земель под пашню, а существующие ЗЛН представлены разрозненными полеваями лесными полосами, не создающими завершенных систем, которые могли бы дать максимум лесистости у истоков или в центре водосбора. Соответственно, лесистость этих территорий не превышает 2...5 %.

Как показывают результаты наших исследований, практически для всех водосборов овражно-балочных систем и малых рек юга Приволжской возвышенности характерна малооблесенная центральная часть [13].

Комбинирование степени и типов лесистости истока и устья водосборных бассейнов юга Приволжской возвышенности позволило выделить 6 типов лесистости водосборов малых рек (рис. 2).

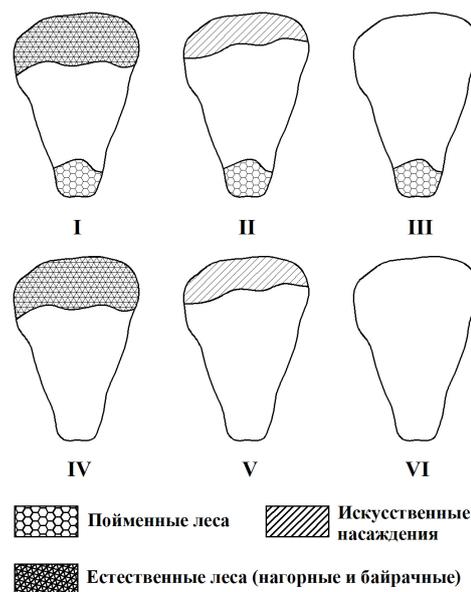


Рис. 2. Типы лесистости водосборов Приволжской возвышенности (I–VI)

Fig. 2. Types of forest cover of the Volga Upland catchment (I–VI)

I тип – исток и устье водосбора имеют ареалы-максимумы лесистости (относительно остальной площади водосбора) за счет крупных массивов пойменных, нагорных и байрачных лесов. К этому типу относятся водосборы малых рек Ольховка, Семеновка, Бурлук, Добринка и др. Лесистость в верхней и нижней частях этих водосборов может достигать 10...15 % или даже превышать это значение. Аппроксимирующая кривая распределения лесистости для данного типа имеет вид параболы, соответствующей полиному, который отражает модель лесистости водосбора типа «чаша» – облесенные края водосборного бассейна и малооблесенный центр (рис. 3, а). В пределах исследуемого региона водосборы этого типа занимают 23,2 % от общей площади.

II тип – верховья водосбора имеют максимум лесистости за счет искусственных насаждений (например, ГЗЛП), а устьевая часть – за счет пойменных лесов. К этому типу относятся водосборы малых рек Бердия, Зензеватка и др. Лесистость устьевой части таких водосборов может превышать 15 % (в зависимости от степени сохранности пойменных лесов), а лесистость у истоков составляет около 10 %. Аппроксимирующая кривая распределения лесистости для этого типа, так же как и для предыдущего, имеет вид «параболообразного» полинома (рис. 3, б). На долю водосборов данного типа приходится 17,6 % от площади региона исследования.

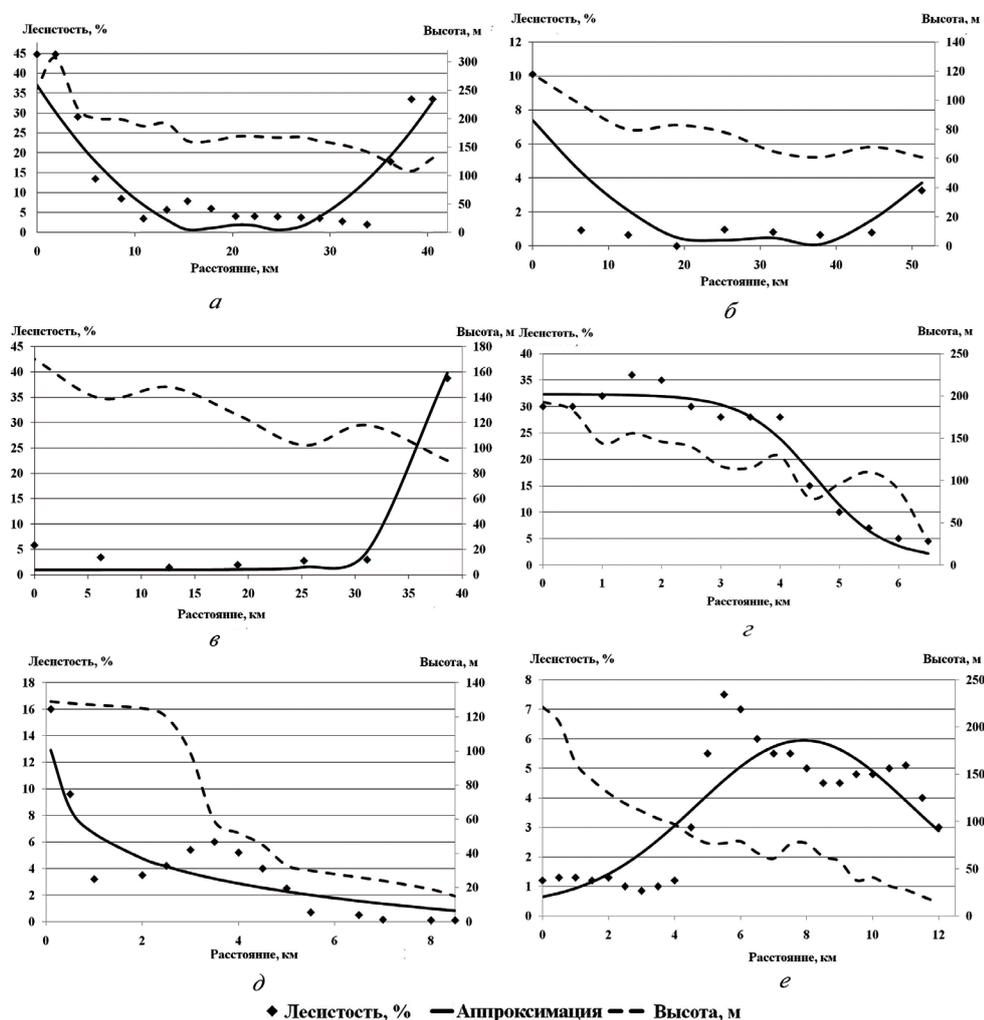


Рис. 3. Распределение лесистости по продольному профилю (от истока до устья) на ключевых участках: *a* – Добринка; *б* – Бердия; *в* – Лычак; *з* – Щербаковка; *д* – Пролейка; *е* – Сухая Дубовка

Fig. 3. Forest cover distribution by longitudinal profile (from source to mouth) in the key areas: *a* – Dobrinka; *б* – Berdiya; *в* – Lychak; *з* – Shcherbakovka; *д* – Proleyka; *е* – Sukhaya Dubovka

III тип – исток имеет минимальную (иногда нулевую) лесистость, устье – максимум лесистости за счет пойменных лесов. К этому типу относятся водосборы малых рек Лычак, Арчеда, Ширяй, Тишанка, Панышинка и другие, всего около 40 водосборных бассейнов. Лесистость верховьев этих водосборов может достигать всего 5 % и мало отличается от лесистости

центральной части водосборного бассейна. Водосборы данного типа занимают наибольшую площадь в пределах юга Приволжской возвышенности (38,3 %) и локализованы в основном в юго-западной части Медведицко-Иловлинского междуречья. Эта часть региона исследования геоморфологически приурочена к Арчединско-Донской вершине, для рельефа которой характерно преобладание пологих склонов с небольшой крутизной [8]. Например, в пределах водосбора р. Лычак доля склонов с крутизной до 2° (пахотнопригодных) составляет 98,2 %. В историческом масштабе данное обстоятельство обусловило высокую распаханность земель с одновременным сведением лесов в верховьях и на склонах овражно-балочной сети. Распределение лесистости на водосборах этого типа описывается логистической кривой (рис. 3, в).

IV тип – исток имеет максимум естественной лесистости за счет байрачных и нагорных лесов, в устьевой части насаждений нет. Эта картина характерна для овражно-балочных систем волжского склона (Щербаковка, Сорочья, Липовая, Ураковка и др.). Распределение лесистости на водосборах данного типа описывается логистой, имеющей обратную форму по сравнению с предыдущим типом (рис. 3, г). На долю водосборов IV типа приходится всего 4,2 % от площади района исследования.

V тип – исток имеет максимум искусственной лесистости, в устьевой части насаждений нет. К этому типу относятся водосборы малых рек и овражно-балочных систем волжского склона, расположенные южнее г. Камышин, так как здесь берет начало ГЗЛП «Камышин–Волгоград», обеспечивающая лесистость на уровне 10 % в верховьях малых рек Балыклейка, Оленья, Пролейка и др. Распределение лесистости на водосборах данного типа также можно описать логистической кривой с максимумом в верховьях водосборного бассейна (рис. 3, д). В пределах исследуемого района водосборы V типа занимают 10,0 % от общей площади.

VI тип – исток и устье имеют минимальную (нулевую) лесистость. В границах региона исследования этот тип занимает 6,7 % от общей площади. Примером может выступать система балок Попова, Первая и Вторая Сосновки, расположенная в 18 км к северу от г. Камышина, а также балка Сухая Дубовка. Аппроксимирующая кривая распределения лесистости для данного типа может иметь некоторые пики, совпадающие с наличием локусов естественных байрачных лесов в центральной части водосбора, однако начало и конец кривой, соответствующие истоку и устью, имеют низкие отметки лесистости (рис. 3, е).

Итоговая карта районирования юга Приволжской возвышенности (рис. 4) отражает распределение водосборов малых рек и овражно-балочных систем в зависимости от облесенности их истока и устья.

Районы I и III представляют собой территории, расположенные между изогиями 350...400 мм/год, в темно-каштановой почвенной подзоне, что обусловило изначально более благоприятные условия для произрастания здесь естественной древесной растительности по сравнению с районами IV–VI, расположенными в диапазоне изогий 300...350 мм/год, в подзоне светло-каштановых

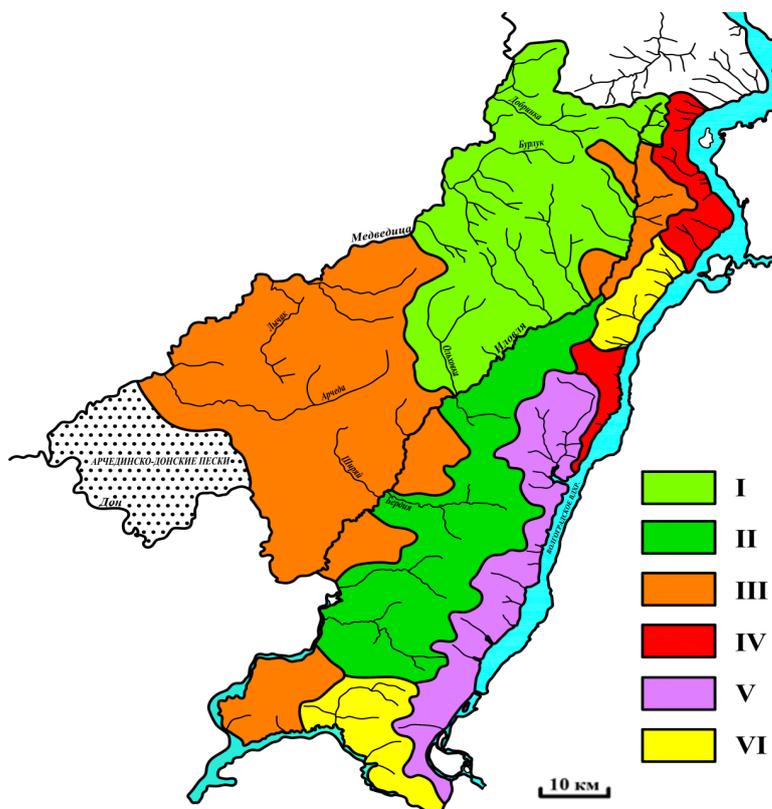


Рис. 4. Схема районирования юга Приволжской возвышенности по типам лесистости водосборов (нумерация районов согласно типам облесенности водосборов) (М 1:1 400 000)

Fig. 4. Zoning scheme of the south of the Volga Upland by types of forest cover of catchments (numbering of areas by types of forest cover of catchments) (Scale – 1:1 400 000)

солонцеватых почв [15]. Для района I характерен сложный рельеф – сильно расчлененные возвышенные плато Доно-Медведицкого вала. Густота эрозионной расчлененности восточного склона Медведицких Яров достигает 1,0...1,5 км на 1 км², максимальные отметки высот превышают 350 м. В историческом аспекте это затруднило сельскохозяйственное освоение водосборов расположенных здесь малых рек и помешало полному сведению байрачных и нагорных лесов у их истоков. Район III, расположенный южнее и приуроченный к более пологим склонам Арчединско-Донских поднятий, лишился этих лесов при аграрном освоении.

Районы II и V представлены водосборами, имеющими высокую степень искусственного облесения истоков за счет ГЗЛП «Камышин–Волгоград», созданной на Волго-Иловлинском водоразделе, и «Волгоград–Элиста–Черкесск». Являясь в некоторой степени искусственным аналогом нагорных лесов, характерных для Медведицко-Иловлинского водораздела (район I), ГЗЛП дает здесь высокие показатели лесистости и оказывает определенное лесомелиоративное влияние на территорию. Однако полной натурализации гослесополосы, т. е.

способности восстановления исходной главной породы, характерной для естественных лесов, за все время ее существования (с 50-х гг. XX в.) не произошло. Таким образом, эти насаждения не являются полностью самовоспроизводящейся биологической системой, что было доказано в кризисный для лесомелиорации период 90-х гг. прошлого века: без соответствующих уходов многие насаждения погибли или находятся в стадии деградации [6].

Заключение

В ходе крупномасштабного картографирования и изучения пространственного распределения крупных лесных массивов на юге Приволжской возвышенности по данным дистанционной съемки Земли было выявлено существенное типологическое разнообразие водосборов малых рек данной территории по критерию лесистости. Однако можно отметить, что высокая распаханность территории наряду с динамично развивающейся овражно-балочной сетью и низкими показателями лесистости делают особенно актуальной разработку проектов лесомелиоративного обустройства именно центральной части водосборных бассейнов юга Приволжской возвышенности. Предложенное районирование региона позволит более целенаправленно обустраивать отдельные территориальные образования в соответствии с их природными особенностями, характером хозяйственной освоенности и антропогенных воздействий.

Необходимо отметить, что возможные прогнозы состояния и изменений площади лесных экосистем в пределах водосборов будут носить неточный характер в силу различных темпов антропогенного сведения лесов и создания лесных культур, поэтому схема районирования, составленная на данный момент, может потребовать существенных корректировок в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бодрова В.Н. Картографирование лесистости острова Сарпинский Волгоградской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2018. № 3. С. 47–54. [Bodrova V.N. Mapping of Forest Coverage of the Sarpinsky Island (Volgograd Oblast). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography], 2018, no. 3, pp. 47–54].
2. Брылев В.А. Эволюционная геоморфология юго-востока Русской равнины. Волгоград: Перемена, 2005. 351 с. [Brylev V.A. *Evolutionary Geomorphology of the Southeast of the Russian Plain*. Volgograd, Peremena Publ., 2005. 351 p.].
3. Бяллович Ю.П. Биогеоценологические основания теории систем лесов // Проблемы биогеоценологии. М.: Наука, 1973. С. 47–58. [Byallovich Yu.P. Biogeocenological Basis of the Theory of Forest Systems. *Problems of Biogeocenology*. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 47–58].
4. Васюков В.М. Ботанико-географическое районирование Приволжской возвышенности // Изв. Самар. НЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1(7). С. 1712–1716. [Vasjukov V.M. Botanical and Geographical Regionalization of the Privolzhye Hills. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, no. 1(7), pp. 1712–1716].
5. Зиновьева И.С. Общее и особенное в территориальном распределении и экономическом использовании лесных ресурсов России // Социально-экономические явления и процессы. 2013. № 11(057). С. 32–36 [Zinoveva I.S. The General and Special in Territorial Distribution and Economic Use of Forest Resources of Russia. *Sotsial'no-ekonomicheskoye*

yavleniya i protsessy [Social-Economic Phenomena and Processes], 2013, no. 11(057), pp. 32–36].

6. Костин М.В. Современное состояние, мелиоративный потенциал и возможности возобновления защитных лесных насаждений на водоразделах степной зоны ЕТР: автореф. дис. ... канд. с-х. наук. Волгоград, 2009. 23 с. [Kostin K.M. *Current State, Ameliorative Potential and Possibilities of Renewing Protective Forest Plantations in Watersheds of the Steppe Zone of the European Part of Russia*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Volgograd, 2009. 23 p.].

7. Краеведение: биологическое и ландшафтное разнообразие природы Волгоградской области / под ред. В.А. Сагалаева. М.: Глобус, 2008. 272 с. [*Regional Studies: Biological and Landscape Diversity of Nature of the Volgograd Region*. Ed. by V.A. Sagalaev. Moscow, Globus Publ., 2008. 272 p.].

8. Крюков К.К. Структура малых и средних речных бассейнов Волгоградского правобережья и их антропогенное преобразование: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2014. 22 с. [Kryukov K.K. *Structure of Small and Medium River Basins of the Volgograd Right Bank and Their Anthropogenic Transformation*: Cand. Geogr. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2014. 22 p.].

9. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Кириленко Ж.А., Григорьева О.И. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования // Изв. Самар. НЦ РАН. 2013. Т. 15, № 3(2). С. 652–657. [Kuzmenko Ya.V., Lisetskiy F.N., Kirilenko J.A., Grigorieva O.I. Providing the Optimum Water Protection Forests Amount at Basin Organization of Nature Management. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 3(2), pp. 652–657].

10. Кулик К.Н., Манаенкова Н.С. Составление изолинейных карт лесистости по аэрокосмическим фотоматериалам // Лесн. хоз-во. 1996. № 4. С. 45–46. [Kulik K.N., Manayenkova N.S. Compilation of Isolinear Maps of Forest Cover Based on Aerospace Photographs. *Lesnoye khozyaystvo*, 1996, no. 4, pp. 45–46].

11. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Аспект Пресс, 2004. 184 с. [Labutina I.A. *Aerospace Image Interpretation*. Moscow, Aspekt Press Publ., 2004. 184 p.].

12. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. 2014. № 1. С. 45–53. [Mal'tsev K.A., Yermolaev O.P. Using Dems for Automatic Plotting of Catchments. *Geomorfologiya* [Geomorphology RAS], 2014, no. 1, pp. 45–53].

13. Рулев А.С., Кошелева О.Ю. Картографическое моделирование лесистости для адаптивно-ландшафтного обустройства водосборов (на примере бассейна р. Ольховка Волгоградской области) // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образование. 2014. № 4(36). С. 32–36. [Rulev A.S., Kosheleva O.Yu. Cartographical Modelling of Woodiness for Adaptive and Landscape Arrangement of Catchments (on the Example of the Olhovka River Basin of the Volgograd Region). *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye* [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], 2014, no. 4(36), pp. 32–36].

14. Сабитова А.Г., Кулагин А.Ю., Гиниятуллин Р.Х. Оценка уровня лесистости водосборных площадей и состояния водохранилищ (на примере Республики Башкортостан) // Вестн. Челябин. гос. ун-та. Биология. 2013. Вып. 2. № 7(298). С. 187–190. [Sabitova A.G., Kulagin A.Ju., Giniyatullin R.Kh. Assessment of Level of Woodiness of the Water-Collecting Areas and Condition of Reservoirs (on the Example of the Republic of Bashkortostan). *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya* [Bulletin of Chelyabinsk State University. Series: Biology], 2013, vol. 2, no. 7(298), pp. 187–190].

15. Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И. Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 306 с. [Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasil'yev Yu.I. *Weather and Climate of the Volgograd Region*. Volgograd, VNIALMI Publ., 2010. 306 p.].
16. Серегин А.П. Сеточное картирование флоры: мировой опыт и современные тенденции // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2013. Вып. 32. С. 210–245. [Seregin A.P. Floristic Grid Mapping: Global Experience and Current Trends. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya i ekologiya* [Herald of Tver State University. Series: Biology and Ecology], 2013, no. 32, pp. 210–245].
17. Bodart C., Brink A.B., Donnay F., Lupi A., Mayaux P., Achard F. Continental Estimates of Forest Cover and Forest Cover Changes in the Dry Ecosystems of Africa between 1990 and 2000. *Journal of Biogeography*, 2013, vol. 40, iss. 6, pp. 1036–1047. DOI: [10.1111/jbi.12084](https://doi.org/10.1111/jbi.12084)
18. Cihlar J. Land Cover Mapping of Large Areas from Satellites: Status and Research Priorities. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, vol. 21, iss. 6-7, pp. 1093–1114. DOI: [10.1080/014311600210092](https://doi.org/10.1080/014311600210092)
19. Dong J., Xiao X., Sheldon S., Biradar Ch., Zhang G., Duong N.D., Hazarika M., Wikantika K., Takeuchi W., Moore B. A 50-m Forest Cover Map in Southeast Asia from ALOS/PALSAR and Its Application on Forest Fragmentation Assessment. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9(1). DOI: [10.1371/journal.pone.0085801](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085801)
20. Firoz A., Laxmi G. Geospatial Assessment of Forest Fires in Jharkhand (India). *Indian Journal of Science and Technology*, 2017, vol. 10, iss. 21, pp. 1–7. DOI: [10.17485/ijst/2017/v10i21/113215](https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i21/113215)
21. Mather P.M. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. New York, Wiley, 2005. 442 p.
22. Palma J.H.N., Graves A.R., Burgess P.J., Keesman K.J., van Keulen H., Mayus M., Reisner Y., Herzog F. Methodological Approach for the Assessment of Environmental Effects of Agroforestry at the Landscape Scale. *Ecological Engineering*, 2007, vol. 29, iss. 4, pp. 450–462. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2006.09.016](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.016)
23. Richards J.A. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin, Springer, 2013. 494 p. DOI: [10.1007/978-3-642-30062-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2)
24. Treitz P., Howarth P. High Spatial Resolution Remote Sensing Data for Forest Ecosystem Classification: An Examination of Spatial Scale. *Remote Sensing of Environment*, 2000, vol. 72, iss. 3, pp. 268–289. DOI: [10.1016/S0034-4257\(99\)00098-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00098-X)

ZONING OF CATCHMENTS OF SMALL RIVERS IN THE SOUTH OF THE VOLGA UPLAND BY THE WATER PROTECTION ROLE OF FORESTS

Olga Yu. Kosheleva, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [B-3579-2018](https://orcid.org/0000-0002-9616-2383),

ORCID: [http://orcid.org/0000-0002-9616-2383](https://orcid.org/0000-0002-9616-2383)

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskiiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; e-mail: olya_ber@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the spatial distribution analysis of protective forest plantations within the catchment basins of in the south of the Volga Upland (within the Volgograd region). The data obtained are important for planning agroforestry and land reclamation. The interpretation of 133 reservoirs using satellite images and large-scale (Scale – 1:100 000) isolinear mapping of forest cover in the key areas allowed us to find that for the majority of catchments the low forest cover of the central part of the basin, caused by agricultural land use, is typical. The main environment protection function is performed by large forests of natural (growing in floodplains, uplands and steppe ravines) and artificial origin (forest shelterbelts), localized near the source (in watersheds) and the mouths of small rivers. Depending on the

type of plantations and their presence or absence near the source or mouth of the river 6 types of forest cover of catchments in the south of the Volga Upland have been identified: I – river source and mouth have maxima (relative to the rest of the catchment basin) of natural forest cover; II – the source has a maximum of artificial forest cover, the mouth has a maximum of natural forest cover; III – there are no plantations at the source, there is a maximum of natural forest cover at the mouth; IV – there is a maximum of natural forest cover at the source, there are no plantations at the mouth; V – there is a maximum of artificial forest cover at the source, there are no plantations at the mouth; VI – there are no plantations at the source and mouth. It is found that the largest area within the south of the Volga Upland is occupied by catchments of the III type (38.3 %), the relief of which is characterized by the predominance of gentle slopes, which have been exposed to the greatest extent to plowing and destruction of natural forest vegetation. Together with catchments of the IV–VI types, having no afforestation in the lower stream, about 59.2 % of plantations of the south of the Volga Upland are not protected from the processes of water erosion and deflation.

For citation: Kosheleva O.Yu. Zoning of Catchments of Small Rivers in the South of the Volga Upland by the Water Protection Role of Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 99–111. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-99-111

Funding: The work was carried out on the subject of the state assignment of the Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences (registration No. AAAA-A16-116122010038-9).

Keywords: protective forests, Volga Upland, catchment, forest cover, space image interpretation, isolinear mapping, zoning.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 24.06.19 / Received on June 24, 2019

УДК 630*165.43:539.16.04

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-112-119

ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ МИТОТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ТКАНЕЙ *Pinus sylvestris* L.

А.В. Скок¹, канд. биол. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-8102>

В.Н. Сорокопудов², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [B-1520-2018](https://orcid.org/0000-0002-0133-6919),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>

И.Н. Глазун¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABC-9610-2020](https://orcid.org/0000-0001-6625-4845),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6625-4845>

¹Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: s.anna.v@mail.ru, iglasunn@mail.ru

²Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; e-mail: sorokopud2301@mail.ru

Аннотация. Развитие ядерной энергетики в перспективе будет продолжаться, что обуславливает сохранение вероятности попадания радионуклидов в окружающую среду. Выявлена актуальность исследования генетического материала хвойных как надежного биоиндикатора. Известно, что под воздействием ионизирующего излучения происходит накопление генетических нарушений в организмах потомства сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Наиболее чувствительны к ионизирующему излучению стадии гаметогенеза, зиготы и молодых проростков растительных организмов. Важно определить вариабельность митотического индекса тканей потомства сосны обыкновенной в зонах с различным уровнем ионизирующего излучения, в том числе и в зоне отчуждения. Мощность экспозиционной дозы измеряли на уровне почвы и на высоте 1 м от поверхности земли. Проращивание семян производили в термостате на влажной фильтровальной бумаге. Фиксировали корешки проростков длиной 0,5...1,0 см в смеси 96 %-го этилового спирта и ледяной уксусной кислоты. Корешки окрашивали в растворе ацетокармина. Размягчение тканей проводили сильным раствором хлоралгидрата. На «давленных» препаратах под микроскопом учитывали общее количество клеток, количество делящихся клеток, а также патологических митозов. Определяли митотический индекс и продолжительность фаз митоза. Установлено, что при увеличении уровня радиоактивного загрязнения повышаются скорость деления клеток, количество клеток, находящихся в стадиях профазы, анафазы и телофазы, но сокращается продолжительность метафазы, а также изменяется относительная продолжительность фаз митоза. С ростом мощности экспозиционной дозы закономерно увеличивается число патологических митозов. Спектр нарушений митоза представлен различными аномалиями хромосомного аппарата в стадии анафазы: выходом и отставанием хромосом, мостами. При этом существенно возрастает количество анафаз с мостами, с одновременным выходом и отставанием хромосом.

Для цитирования: Скок А.В., Сорокопудов В.Н., Глазун И.Н. Влияние хронического ионизирующего излучения на вариабельность митотической активности тканей *Pinus sylvestris* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 112–119. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-112-119

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., мощность экспозиционной дозы, фазы митоза, нарушения анафазы, мосты, отставание хромосом, выход хромосом.

Введение

Под действием экологических факторов и в результате жизнедеятельности организмов биогеоценозы видоизменяются. Антропогенные факторы

оказывают на биогеоценоз многогранное воздействие. Среди множества факторов, негативно влияющих на экосистему, следует назвать экологическое загрязнение. К основным компонентам, загрязняющим атмосферу, относятся озон, сернистый газ, оксиды углерода (CO , CO_2) и азота, углеводороды. Основными источниками выбросов служат транспорт, сельское хозяйство (пестициды и удобрения). Тяжелые металлы оказывают токсическое действие на фитоценозы [17, 20], вызывают мутации в растениях.

Ионизирующее излучение губительно воздействует на среду обитания. Радиация является вездесущей, всепроникающей и бесконечной. Радиоактивное излучение, воздействуя на биогеоценоз, изменяет его состав и структуру. Уровень лучевой реакции зависит от радиочувствительности видов и взаимоотношений их с другими организмами в биоценозе.

Радиацией повреждаются органы и ткани растений, клетки и внутриклеточные структуры [1, 5, 8, 10, 13, 19]. Загрязненный воздух изменяет рост и развитие растений [1, 5, 10]. В условиях ионизирующего загрязнения также появляются изменения в митозе, мейозе и образуется стерильная пыльца [2, 3, 12, 14]. Радиоактивное воздействие на растения проявляется в стимуляции или угнетении роста растений, вплоть до летального эффекта. Ранние стадии развития организма в большей степени подвержены воздействию ионизирующего излучения. Нарушения в стадии гаметогенеза приводят к стерильности.

Результаты воздействия радиоактивного облучения зависят от радиочувствительности организмов, вида и мощности излучения [6, 8, 9, 15]. Воздействие радиационного фактора приводит к отбору в популяции под воздействием мутирования, понижает жизнеспособность особей.

Стадии гаметогенеза, зиготы и молодых проростков особенно чувствительны к ионизирующему облучению. Ионизирующее облучение пронизывает весь генетический аппарат клетки, вызывая хромосомные aberrации [4, 11, 12, 18].

Генотипическому разнообразию особей, подвергающихся ионизирующему облучению, способствует индивидуальная изменчивость. Для проявления фенотипа каждого генотипа значение имеют и условия среды. В популяции появляются особи с повышенной и пониженной устойчивостью к облучению [10, 12, 16].

Наиболее сильно повреждаются меристемы хвойных растений, меньше – лиственных растений. Ионизирующее излучение вызывает нарушения у хвойных видов на всех стадиях развития по причине больших размеров хромосом [1, 6].

Под влиянием радиации могут разрываться хромосомы, возникать делеции, инверсии, дупликации, транслокации. Разрывы хромосом приводят к образованию ионных пар, способствующих появлению свободных радикалов [2, 3, 12]. Степень повреждения организмов под воздействием ионизирующего облучения оценивают по изменениям в репродуктивных органах и частоте хромосомных aberrаций [2, 3].

Повреждение молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты может приводить к гибели клеток. Но этому событию препятствуют внутриклеточные системы

репарации. Генотипическая и фенотипическая вариабельность увеличивается не только от действия радиации, но от других активных факторов, что позволяет предполагать универсальную, общебиологическую значимость перестроек генома [5].

Цель исследования – изучение вариабельности митотической активности тканей потомства сосны обыкновенной при различных уровнях радиоактивного загрязнения.

Объекты и методы исследования

Пробная площадь (ПП) контрольных насаждений (ПП № 15) располагается на территории Учебно-опытного лесничества в кв. 75 ГКУ Брянской области (плотность загрязнения – менее 1 Ки/км²). Пробные площади с разным уровнем ионизирующего облучения находятся на территории Брянской области, Клинцовского лесничества: ПП № 31 в кв. 4 (зона отчуждения – плотность загрязнения почвы свыше 80 Ки/км²); ПП № 35 в кв. 21 (зона отселения – плотность загрязнения почвы 40...80 Ки/км²); ПП № 32 в кв. 14 (зона проживания с правом на отселение – плотность загрязнения почвы 5,1...15,0 Ки/км²).

Учет мощности экспозиционной дозы (МЭД) осуществляли ежегодно на каждой ПП с помощью дозиметра ДРГ-01Т на почве и на высоте 1 м от поверхности земли.

Семена, полученные с каждой ПП, проращивали при температуре 25 °С.

Фиксацию корешков длиной 0,5...1,0 см осуществляли в смеси ледяной уксусной кислоты и 96 %-го этилового спирта. Окрашивание тканей выполняли раствором ацетокармина. Сильным раствором (60 %) хлоралгидрата проводили мацерацию тканей. На временных препаратах под микроскопом учитывали: общее количество клеток, количество делящихся клеток, а также патологических митозов (ПМ).

Статистические критерии рассчитывали, используя митотические индексы (МИ) [7]. Индекс МИ определяли отношением количества делящихся клеток в фазах митоза на их общее число (%). Продолжительность фазы митоза рассчитывали делением количества клеток в определенной фазе на количество делящихся клеток (%), количество ПМ (%) находили как сумму анафаз с нарушениями деления (%), степень воздействия – по количеству ПМ [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты исследования, приведенные в таблице, показали, что МИ в корешках проростков загрязненных насаждений закономерно увеличивается с 5,98 (ПП № 15 – контроль) до 7,65 % (ПП № 35, МЭД = 239 мкР/ч), т. е. наблюдается активация темпов митоза. Активация МИ существенна (по сравнению с контролем) у корешков проростков на ПП № 35 при МЭД = 239 мкР/ч и на ПП № 31 при МЭД = 643 мкР/ч ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95,0$ %).

При возрастании МЭД происходит изменение длительности протекания отдельных фаз митоза.

С увеличением МЭД растет количество клеток в профазе. При высоком радиационном фоне (МЭД = 239 мкР/ч) наблюдается минимальное количество

Вариабельность митотического индекса, фаз митоза и нарушений в анафазе

МЭД на почве ПП, мкР/ч	МИ, %	Относительная продолжительность фаз митоза, %					Количество ПМ и типы нарушений анафаз, %				
		Профаза	Метафаза	Анафаза	Телофаза	ПМ	Мосты	Выход хромосом вперед	Отставание хромосом	Одновременно выход и отставание хромосом	
<i>ПП № 31</i>											
643	7,37±0,85	12,60±2,22	33,31±0,43	41,77±1,40	12,29±1,25	7,06	2,14±0,70	0,08±0,05	3,05±0,96	1,77±0,39	
<i>ПП № 35</i>											
239	7,65±0,56	9,98±2,85	35,78±0,93	37,96±2,28	18,25±2,77	6,34	1,95±0,81	0,78±0,33	2,37±0,22	1,23±0,46	
<i>ПП № 32</i>											
40	6,02±0,58	11,48±1,33	35,77±1,05	39,33±1,82	13,40±1,51	8,19	0,80±0,43	2,45±0,15	3,96±0,45	0,97±0,44	
<i>Контроль – ПП № 15</i>											
12	5,98±0,07	11,49±0,75	40,10±0,02	36,14±1,51	12,25±2,28	7,01	0,61±0,41	0,98±0,51	4,40±2,46	1,00±0,51	

клеток в стадии профазы (9,98 %). Количество клеток в стадии профазы при МЭД = 643 мкР/ч достоверно выше, чем при МЭД = 239 мкР/ч ($P = 95,0$ %).

В стадии метафазы количество клеток уменьшается с повышением уровня ионизирующего облучения. В контроле (40,10 %) достоверно увеличено число клеток в стадии метафазы по сравнению с МЭД = 643 мкР/ч (33,31 %): $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 99,0$ %. При МЭД = 239 мкР/ч (35,78 %) и МЭД = 40 мкР/ч (35,77 %) значительно снижена скорость деления в стадии метафазы по сравнению с контролем ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95,0$ %).

В стадии анафазы наблюдается значительное превышение контроля (36,14 %) при МЭД = 643 мкР/ч (41,77 %) ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 99,0$ %). Достоверно снижена в контроле продолжительность анафазы при МЭД = 40 мкР/ч (39,33 %) ($P = 95,0$ %).

Максимальная продолжительность телофазы (18,25 %), установленная при МЭД = 239 мкР/ч, значительно превышает контроль (12,25 %), $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 99,0$ %.

В целом ионизирующее излучение повышает скорость митоза. При увеличении мощности экспозиционной дозы скорость деления клеток растет в стадиях профазы, анафазы и телофазы, но снижается в стадии метафазы.

Спектр нарушений представлен различными аномалиями хромосомного аппарата в стадии анафазы: мостами, выходом, отставанием, одновременным выходом и отставанием хромосом.

С увеличением МЭД растет число ПМ, наибольшее (8,19 %) отмечено при МЭД = 40 мкР/ч (ПП № 32), минимальное (6,34 %) – при МЭД = 239 мкР/ч (ПП № 35).

Достоверно повышается число анафаз с мостами при увеличении уровня радиоактивного излучения. Наибольшее количество таких клеток (2,14 %) обнаружено при МЭД = 643 мкР/ч ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл.}}$ при $P = 99,0 \%$).

Скорость деления клеток в анафазе с выходом хромосом вперед значительно увеличено при МЭД = 40 мкР/ч (2,45 %) и уменьшено при МЭД = 643 мкР/ч (0,08 %), $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл.}}$ при $P = 95,0 \%$.

Количество анафаз с отставанием хромосом в контроле существенно увеличено ($P = 95,0 \%$) по сравнению с их количеством при повышенном уровне ионизирующего излучения.

С ростом радиационного фона достоверно возрастает количество клеток с одновременным выходом и отставанием хромосом. При МЭД = 643 мкР/ч и МЭД = 239 мкР/ч встречается их наибольшее количество ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл.}}$ при $P = 99,0 \%$).

Заключение

Таким образом, сосновые насаждения достаточно чутко реагируют на техногенные факторы посредством нарушения процессов деления в клетках. Анализ полученных результатов показал, что насаждения потомства сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в районе исследования испытывают существенное влияние хронического ионизирующего облучения. При увеличении уровня радиоактивного загрязнения усиливается скорость деления клеток, а также изменяется относительная продолжительность фаз митоза, возрастает количество клеток, находящихся в стадиях профазы, анафазы и телофазы, но сокращается продолжительность метафазы. С ростом мощности экспозиционной дозы повышается число патологических митозов. Спектр нарушений митоза представлен различными аномалиями хромосомного аппарата в стадии анафазы: мостами, выходом и отставанием хромосом. При увеличении дозы ионизирующего излучения существенно возрастает количество анафаз с мостами, с одновременным выходом, отставанием хромосом. Под воздействием хронического ионизирующего излучения происходит накопление генетических нарушений в организмах потомства *Pinus sylvestris* L., поэтому оно нуждается прежде всего в особенно тщательном наблюдении и контроле за изменением генетических показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абрамов В.И., Динева С.В., Рубанович А.В., Шевченко В.А. Генетические последствия радиоактивного загрязнения популяций *Arabidopsis thaliana*, произрастающих в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, вып. 5. С. 676–689. [Abramov V.I., Dineva S.V., Rubanovich A.V., Shevchenko V.A. Genetic Consequences of Radioactive Contamination of Populations of *Arabidopsis thaliana* Growing in the 30-km Zone of the Chernobyl Accident. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], 1995, vol. 35, iss. 5, pp. 676–689].

2. Буторина А.К., Вострикова Т.В. Изучение цитогенетических показателей у березы повислой в условиях антропогенной нагрузки // Интеграция науки и высшего лесотехнического образования по управлению качеством леса и лесной продукции: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 25–27 сент. 2001 г.). Воронеж, 2001. С. 78–82. [Butorina A.K., Vostrikova T.V. The Study of Cytogenetic Parameters in White Birch under Anthropogenic Stress. *Integration of Science and Higher Forestry Education in*

Forest and Forest Product Quality Management: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Voronezh, September 25–27, 2001). Voronezh, 2001, pp. 78–82].

3. Буторина А.К., Калаев В.Н., Миронов А.Н., Смородинова В.А., Мазурова И.Э., Дорошев С.А., Сенькевич Е.В. Цитогенетическая изменчивость в популяциях сосны обыкновенной // Экология. 2001. № 3. С. 216–220. [Butorina A.K., Kalaev V.N., Mironov A.N., Smorodina V.A., Mazurova I.E., Doroshev S.A., Sen'kevich E.V. Cytogenetic Variation in Populations of Scots Pine. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2001, no. 3, pp. 216–220]. DOI: [10.1023/A:1011366328809](https://doi.org/10.1023/A:1011366328809)

4. Горячкина О.В., Сизых О.А. Цитогенетические реакции хвойных растений в антропогенно нарушенных районах г. Красноярска и его окрестностей // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXX, № 1-2. С. 46–51. [Goryachkina O.V., Szykh O.A. Cytogenetic Responses of Coniferous Plants in Anthropogenically Disturbed Areas of Krasnoyarsk and Its Vicinities. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2012, vol. 30, no. 1-2, pp. 46–51].

5. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. Киев: Наук. думка, 1989. 380 с. [Grodzinskiy D.M. *Radiobiology of Plants*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 380 p.].

6. Дмитриева С.А. Методология биотестирования состояния окружающей среды на основе цитогенетических исследований // Тез. V междунар. совещания по кариологии, кариосистематике и молекулярной систематике растений. СПб., 2005. С. 31–32. [Dmitriyeva S.A. Methodology of Environmental Biotesting Based on Cytogenetic Studies. *Proceedings of the 5th International Conference on Karyology, Karyosystematics and Molecular Systematics of Plants*. Saint Petersburg, 2005, pp. 31–32].

7. Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с. [Zaytsev G.N. *Mathematical Statistics in Experimental Botany*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 424 p.].

8. Ипатьев В.А., Багинский В.Ф., Булавик И.М., Дворник А.М., Волчков В.Е., Гончаренко Г.Г. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации /под ред. В.А. Ипатьева. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. С. 55–67. [Ipat'yev V.A., Baginskiy V.F., Bulavik I.M., Dvornik A.M., Volchkov V.E., Goncharenko G.G. *Forest. Man. Chernobyl. Forest Ecosystems after the Chernobyl Accident: State, Forecast, Reaction of the Population, Ways of Rehabilitation*. Ed. by V.A. Ipat'yev. Gomel, Institut lesa NAN Belarusi Publ., 1999, pp. 55–67].

9. Калашник Н.А. Хромосомные нарушения как индикатор оценки степени техногенного воздействия на хвойные насаждения // Экология. 2008. № 4. С. 276–286. [Kalashnik N.A. Chromosome Aberrations as Indicator of Technogenic Impact on Conifer Stands. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2008, no. 4, pp. 276–286]. DOI: [10.1134/S106741360804005X](https://doi.org/10.1134/S106741360804005X)

10. Криволюцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Наука, 1988. 240 с. [Krivolutskiy D.A., Tikhomirov F.A., Fedorov E.A. *The Effect of Ionizing Radiation on Biogeocenosis*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 240 p.].

11. Муратова Е.Н. Хромосомные числа голосеменных растений: *Pinaceae* (*Picea-Pinus*) // Ботан. журн. 2011. Т. 96, № 10. С. 1389–1404. [Muratova E.N. Chromosome Numbers of Gymnosperms: *Pinaceae* (*Picea-Pinus*). *Botanicheskiy Zhurnal*, 2011, vol. 96, no. 10, pp. 1389–1404].

12. Позолотина В.Н. Отдаленные последствия действия радиации на растения: дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2001. 401 с. [Pozolotina V.N. *Long-Term Effects of Radiation on Plants*: Dr. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2001. 401 p.].

13. Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walter P. *Molecular Biology of the Cell*. New York, Garland Science, 2008. 1616 p.
14. Evert R.F., Eichhorn S.E. *Raven Biology of Plants*. W.H. Freeman & Co, 2013. 900 p.
15. Hartwell L., Hood L., Goldberg M., Reynolds A.E., Silver L. *Genetics: From Genes to Genomes*. McGraw-Hill Education, 2010. 816 p.
16. Lackie J.M. *The Dictionary of Cell and Molecular Biology*. Amsterdam, Academic Press, 2013. 750 p. DOI: [10.1016/C2009-0-64239-2](https://doi.org/10.1016/C2009-0-64239-2)
17. Morgan D.O. *The Cell Cycle: Principles of Control*. London, New Science Press, 2007. 297 p.
18. Redei G.P. *Encyclopedia of Genetics, Genomics, Proteomics, and Informatics*. The Netherlands, Springer, 2008. 2201 p.
19. Rodionov S.S. Environmental Management in the Present State of the Information. *The Strategies of Modern Science Development: Proceedings of the III International Conference*. Yelm, WA, Science Book Publishing House, 2013, pp.183–186.
20. Ziegler I. The Effect of SO₂ Pollution on Plants Metabolism. *Residue Reviews*. New York, Springer-Verlag, 1975, vol. 56, pp. 79–105. DOI: [10.1007/978-1-4613-9388-7_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9388-7_2)

INFLUENCE OF CHRONIC IONIZING RADIATION ON THE VARIABILITY OF MITOTIC ACTIVITY OF *Pinus sylvestris* L. TISSUES

*Anna V. Skok*¹, Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-8102>

*Vladimir N. Sorokopudov*², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [B-1520-2018](https://orcid.org/0000-0002-0133-6919),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>

*Igor' N. Glazun*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABC-9610-2020](https://orcid.org/0000-0001-6625-4845),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6625-4845>

¹Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: s.anna.v@mail.ru, iglasunn@mail.ru

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: sorokopud2301@mail.ru

Abstract. The development of nuclear power engineering will increase in the future, due to the continued likelihood of radionuclides entering the environment. The relevance of studying the genetic material of conifers as a reliable bioindicator was revealed. It is known that under the influence of ionizing radiation there is an accumulation of genetic abnormalities in pine (*Pinus sylvestris* L.) progeny. The stages of gametogenesis, zygotes and young seedlings of plant organisms are most sensitive to ionizing radiation. It is important to determine the variability of the mitotic index (MI) of tissues of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) progeny in areas with different levels of ionizing radiation, including in the exclusion zone. The exposure dose rate was measured at the soil level and 1 m from the ground surface. Germination of seeds was carried out in a thermostat on wet filter paper. Roots of seedlings 0.5–1 cm long were fixed in a mixture of 96 % ethanol and glacial acetic acid. Root staining was carried out in a solution of acetocarmine. Tissue softening was carried out with a strong chloral hydrate solution. The total number of dividing cells, as well as pathological mitoses (PM) were counted on squash preparations using a microscope. The mitotic index and the duration of the phases of mitosis were determined. An increase in the level of radioactive contamination increases the cell

division rate in prophase, anaphase, and telophase, but decreases the duration of metaphase, and also changes the relative duration of mitosis phases. With an increase in the exposure dose rate, the number of pathological mitoses naturally increases. The spectrum of mitosis disorders is represented by various abnormalities of the chromosome apparatus in anaphase: exit and lagging of chromosomes, bridges. Herewith, the number of anaphases with bridges increases significantly with simultaneous exit and lagging of chromosomes.

For citation: Skok A.V., Sorokopudov V.N., Glazun I.N. Influence of Chronic Ionizing Radiation on the Variability of Mitotic Activity of *Pinus sylvestris* L. Tissues. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 112–119. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-112-119

Keywords: *Pinus sylvestris* L., exposure dose rate, mitosis phases, anaphase abnormalities, bridges, chromosome lagging, chromosome exit.

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

Поступила 28.09.19 / Received on September 28, 2019



УДК 630*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137

ТИПИЗАЦИЯ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ УСЛОВИЯМ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

И.Р. Шегельман, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: P-9793-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-4586>

П.В. Будник, *канд. техн. наук, начальник отдела защиты интеллектуальной собственности и изобретательства*; *ResearcherID: E-1782-2015*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: budnikpavel@yandex.ru

Аннотация. Степень адаптации лесозаготовительной техники к природно-производственным условиям (ППУ) характеризует ее эффективность и уровень негативного воздействия на окружающую среду. Для выбора техники необходимо выделение групп территорий с близкими ППУ. Цель исследования – формирование методологического инструментария для лесопромышленной типизации лесных территорий по ППУ. Решение задачи предложено осуществлять на основе кластерного анализа. Для этого разработана методология, включающая: постановку цели типизации территорий по ППУ; сбор данных о ППУ; проведение кластерного анализа; принятие решения по типизации территорий. Задача кластерного анализа заключается в разбиении (на основании некоторой совокупности данных) множества лесных территорий на группы со схожими ППУ. В качестве меры, указывающей на принадлежность к одной из групп, предложено использовать евклидово расстояние, а совокупность данных определять индикаторами, характеризующими ППУ. Предлагаемая методика апробирована на примере Европейского Севера России. Результаты исследования показали, что на этой территории могут быть выделены следующие зоны: А (Мурманская область); В (Республика Карелия, Республика Коми и Архангельская область); С (Вологодская область). Дополнительно в зоне В выделяются две подзоны: Западно-Карельская возвышенность и территории, относящиеся к Северному, Приполярному и Полярному Уралу. Предложенная методика позволяет повысить степень формализации и удобство процесса типизации лесных территорий по ППУ, учитывать широкий спектр различных аспектов ППУ, их вероятностный характер, а также гибко осуществлять типизацию территорий под конкретные цели. Результаты исследований могут быть применены при решении задач поиска эффективных технологий и рациональных параметров систем лесосечных машин.

Для цитирования: Шегельман И.Р., Будник П.В. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 120–137. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по проекту «Разработка среды конструкторского проектирования оптимальных параметров технологического оборудования лесных многооперационных машин» (МК-5321.2018.8).

Ключевые слова: типизация лесных территорий, природно-производственные условия, лесосечные работы, кластерный анализ.

Введение

Эффективность лесозаготовительных машин, их надежность, уровень негативного воздействия на окружающую среду в значительной мере определяются степенью адаптации техники к природно-производственным условиям (ППУ) [20, 24, 31]. Разработка методологии выделения ограниченного числа территорий со схожими ППУ из существующего множества позволит получить инструментарий для более эффективного управления лесопромышленными процессами и ресурсами, а также сформировать основу для сужения диапазона выбора из множества параметров лесозаготовительных машин при их проектировании.

В лесной науке известны фундаментальные исследования, связанные с лесоводственной типологией, например Г.Ф. Морозова, акад. В.Н. Сукачева, П.С. Погребняка, А.К. Каяндера и др. [10, 14]. Применение результатов этих исследований для типизации ППУ при выборе рациональных параметров лесозаготовительных машин для определенных условий, по нашему мнению, крайне затруднительно. Это обусловлено тем, что известная типология базируется на выделении большого количества таксономических классов по различным признакам, влияние которых на работу лесозаготовительных машин окончательно не установлено.

Исследования, связанные с типизацией ППУ в масштабах СССР, проводились ЦНИИМЭ в конце прошлого века [13]. Типизация основывалась на экономико-географическом районировании. Основными типобразующими факторами являлись крупномерность деревьев и рельеф, характеризующиеся либо средними, либо средневзвешенными значениями. Ограниченно, в частных случаях, применялись дополнительные факторы: категория грунтов, запас леса на 1 га, состав насаждения. Несмотря на колоссальный объем проделанной работы в современных условиях типизация ЦНИИМЭ имеет ряд значительных недостатков.

Многие современные исследования свидетельствуют, что для выделения территорий со схожими ППУ недостаточно учитывать только средние размеры деревьев и рельеф [30, 35, 36]. Необходимо рассматривать на постоянной основе и ряд других факторов: почвенно-грунтовые условия, запас древесины на единицу площади, породный состав древостоев, расположение эксплуатационного фонда и доступность его освоения, а также их вероятностный характер.

Увеличение числа типобразующих факторов, учет их вероятностного характера приводят к проблеме принятия решений при отнесении конкретной территории к тому или иному таксиметрическому классу. Решение этой проблемы может основываться на разработке инструмента, позволяющего формализовать процесс типизации. В работах [7, 11] предложен один из примеров такого подхода. Процедура типизации сводится к задаче распознавания образов, состоящей в том, чтобы отнести новый распознаваемый объект (в приложении к рассматриваемой задаче – лесную территорию) к какому-либо классу [1]. Информация о лесных территориях представляется в виде совокупности точек в заданной системе координат. Каждая территория представляет собой единич-

ный точечный элемент. Множество территорий в системе координат имеют неоднородную плотность. Задача типизации сводится к поиску и обособлению сгустков, а затем к выделению параметров этих сгустков и степени их плотности. Несмотря на привлекательность данного подхода, для его реализации, как отмечают сами авторы, требуется разработка алгоритма классификации территорий, включающего комбинаторный анализ с эвристическими допущениями. Это существенно ограничивает его практическую ценность. Задача выделения территорий со схожими ППУ является актуальной и к настоящему моменту не решенной окончательно. Цель исследования – формирование методологического инструментария для лесопромышленной типизации лесных территорий (участков) по ППУ.

Объекты и методы исследования

Решение задачи выделения территорий со схожими ППУ, по нашему мнению, может быть осуществлено на основе кластерного анализа, нашедшего широкое применение в экономике [5, 8, 16], социологии [12, 19], медицине [17], сельском хозяйстве [2, 6], управлении [15] и в других областях науки и сферах деятельности человека. Задача кластерного анализа заключается в разбиении множества объектов $T_i \in T$ на основании некоторой совокупности данных I на M (M – целое число) подмножеств (кластеров, M_1, M_2, \dots, M_j) так, чтобы каждый объект T_i принадлежал только одному подмножеству, причем объекты в одном подмножестве должны быть однородными, а принадлежащие разным подмножествам – разнородными. Такое разбиение осуществляется на основе переменной, являющейся качественным фактором, указывающим на принадлежность к одному из подмножеств M_1, \dots, M_j .

Применительно к задаче выделения территорий со схожими ППУ множество I определяется следующим образом:

$$I = \{T_1, T_2, \dots, T_i\},$$

где T_i – исследуемый объект.

В качестве исследуемого объекта выступает территория, характеризующаяся определенными ППУ, в качестве рассматриваемой территории – делянка, лесосека, некоторая совокупность лесосек, лесничество, регион и др. Масштаб территории может быть различным и определяться целями типизации, а также доступными источниками информации о ППУ.

Каждый из множества объектов $T_i \in T$ характеризуется набором параметров:

$$T_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}\}.$$

В качестве параметров $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}$ принимаются индикаторы, характеризующие определенные аспекты ППУ лесосечных работ. Исходные данные для всех $T_i \in T$ могут быть заданы матрицей:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где каждый столбец соответствует значениям определенного индикатора для рассматриваемых объектов $T_i \in T$, а каждая строка – значениям всех рассматриваемых индикаторов для конкретного объекта $T_i \in T$.

Каждую строку в матрице (1) можно представить как координаты некоторой точки в m -мерном пространстве. Например, i -я строка матрицы (1) соответствует точке с координатами $T_i(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$, а k -я строка матрицы – точке с координатами $T_k(y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{km})$. В этом случае в качестве переменной, являющейся качественным фактором, указывающим на принадлежность к одному из подмножеств $M_1, M_2 \dots M_j$, может выступать евклидово расстояние между данными точками:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{z=1}^m (y_{iz} - y_{kz})^2}. \quad (2)$$

Отметим, что мерой сходства могут быть и другие метрики [4]: квадрат евклидова расстояния; обобщенное степенное расстояние Минковского; расстояние Чебышева; Манхэттенское расстояние.

Если индикаторы, характеризующие ППУ, измеряются в различных единицах, то для использования выражения (2) потребуется стандартизация, т. е. приведение всех значений индикаторов к единому диапазону. Для этого применяется следующее выражение:

$$\tilde{y}_{iz} = \frac{y_{iz} - E[y_z]}{\sqrt{V[y_z]}}, \quad (3)$$

где

$$E[y_z] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{iz};$$

$$V[y_z] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{iz} - E[y_z])^2.$$

Отметим, что существуют и другие способы стандартизации [4].

Для матрицы Y с использованием выражений (2) и (3) формируется матрица расстояний:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица (4) содержит значения переменной d_{ik} (i : от 1 до n ; k : от 1 до m) между соответствующими точками, характеризующими рассматриваемые объекты T_i в m -мерном пространстве. На основе матрицы (4) осуществляется процесс последовательного объединения объектов в кластеры. Первоначально все объекты считаются различными кластерами. Затем на первом этапе наиболее близкие друг к другу объекты объединяются в кластер, на последующих этапах объединение продолжается, при этом могут использоваться различные алгоритмы [4]: метод ближайшего соседа, метод дальнего соседа, метод средней связи, метод взвешенной средней связи и др.

Разные алгоритмы могут приводить к отличающимся результатам. Однозначно рекомендовать тот или иной алгоритм не представляется возможным, так как адекватность разбиения на кластеры зависит от большого количества факторов, в частности от степени сходства или различия рассматриваемых объектов. Поэтому на практике для принятия решения целесообразно применять несколько алгоритмов. Мы рекомендуем использовать метод средней связи или метод взвешенной средней связи при большом количестве рассматриваемых территорий и небольшом количестве выделяемых кластеров. Метод средней связи заключается в присоединении к кластеру объекта с наименьшим средним расстоянием между объектами кластера и рассматриваемым объектом. Метод взвешенной средней связи аналогичен предыдущему, но отличается тем, что при вычислении средних расстояний применяются весовые коэффициенты. Когда требуется выделить кластеры из небольшого числа территорий, удобно использовать метод ближайшего соседа, заключающийся в присоединении к кластеру объекта с максимальной мерой сходства с одним из объектов кластера.

Результаты кластерного анализа представляются в виде дендрограммы. На дендограмме схематично изображаются последовательность объединения объектов в кластеры и значения расстояний между кластерами в соответствии с выбранным алгоритмом. На основе анализа дендограмм осуществляется принятие решения по выделению групп территорий со схожими ППУ. Каждый из алгоритмов и метрик мер сходства имеет свои достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать при анализе дендограмм и принятии решения по выделению кластеров.

Одним из важных вопросов при приложении кластерного анализа к рассматриваемой проблеме является задача выбора индикаторов, характеризующих ППУ. Это может быть выполнено на основе анализа исследований влияния ППУ на эффективность работы лесозаготовительных машин. Здесь под эффективностью понимаем как экономическую эффективность, так и экологическую безопасность.

Известно, что на производительность лесозаготовительных машин влияют средний запас древесины на 1 га и размер деревьев [25, 26, 29, 32, 33]. Например, производительность харвестера возрастает с увеличением размера деревьев [21, 29]. Отметим, что такое увеличение не бесконечно. Для некоторых моделей машин существуют определенные размеры деревьев, повышение которых приводит не к увеличению эффективности, а наоборот к ее потере [26, 31]. Многие исследования свидетельствуют о росте расхода дизельного топлива с увеличением размеров обрабатываемых деревьев и в зависимости от изменения их породы [20, 27]. Крупные размеры стволов деревьев могут становиться серьезным ограничением на лесозаготовках с применением машин [23].

Широко изучено влияние запаса леса на 1 га и размеров деревьев на работу форвардеров [42]. Исследования показывают, что с увеличением этих параметров производительность машин возрастает.

Почвенно-грунтовые условия часто являются определяющими в решении вопросов производительности лесозаготовительной техники [36, 37]. Скорость трелевочной машины зависит от качества поверхности волока. На грунтах с низкой несущей способностью при трелевке или транспортировке древесины быстро образуется колея, увеличивающая сопротивление движению, что

приводит к снижению производительности, повышению расхода топлива и нагрузок на трансмиссию.

Многочисленные исследования свидетельствуют о негативном воздействии лесозаготовительных машин на почву в процессе лесозаготовок [28, 38]. Оно выражается в образовании колеи и уплотнении почвы, препятствующих дальнейшему лесовосстановлению. Особенно этому воздействию подвержены переувлажненные почвы.

Фактор рельефа местности существенно влияет на производительность лесозаготовительных машин и накладывает ограничения на их применение [39, 41]. Например, в Финляндии и на севере России редко используются харвестеры на базе экскаваторов, несмотря на их определенные преимущества перед харвестерами на специализированном шасси [22, 34]. Это обусловлено трудностями их эксплуатации на пересеченной местности.

Породы деревьев обуславливают специфические особенности строения и развития, существенно влияющие на эффективность работы лесозаготовительной техники. Поэтому при анализе ППУ необходимо учитывать породный состав древостоев. Кроме того, этот показатель определяет коммерческую ценность древостоя, зависящую от большого числа факторов: строения лесонасаждения, возраста, условий местопроизрастания и др. Наиболее ценны древостои с преобладанием хвойных пород, наименее – леса с доминированием мягколиственных пород. Коммерческая ценность древостоя позволяет лесному предпринимателю за счет формируемой прибыли использовать более прогрессивную технику, обладающую наибольшей эффективностью в отношении производительности и экологической безопасности.

Особенности строения породы влияют в большей степени на эффективность работы лесозаготовительных машин, осуществляющих операции валки, обрезки сучьев, раскряжевки на сортименты, однако данное влияние изучено не так широко, как другие ранее упомянутые факторы ППУ [35]. В целом многими специалистами признано, что работа этой техники в хвойных древостоях более производительна и менее проблематична, чем в лиственных.

ППУ характеризуются расположением эксплуатационного фонда и доступностью его освоения. Размеры лесосек, плотность дорог часто ограничивают в выборе систем лесозаготовительных машин, делая одни системы более удобными на практике [40].

Таким образом, в качестве индикаторов, характеризующих ППУ, должны выбираться параметры, относящиеся к породному составу древостоев, размерам деревьев в них, рельефу и размерам лесосек, почвенно-грунтовым условиям, запасу древесины на единице площади, расположению эксплуатационного фонда и доступности его освоения. Многие из указанных параметров имеют вероятностный характер [3], а следовательно, требуют учета при типизации ППУ, что может осуществляться на основе построения вариационных рядов изменения параметра. Однако для этого потребуется наличие массового фактического материала. Если невозможно получить необходимый объем информации, то вместо вариационных рядов могут использоваться такие характеристики, как среднее, минимальное и максимальное значения, размах.

В табл. 1 приведен перечень индикаторов, характеризующих ППУ, который может использоваться при проведении кластерного анализа для типизации лесных территорий по схожим ППУ. Данный список демонстрирует принцип формирования индикаторов и не является исчерпывающим.

Таблица 1

Перечень индикаторов, характеризующих ППУ

№	Наименование индикатора	№	Наименование индикатора
1	Средний диаметр древостоя	28	Доля ели в древостое
2	Наиболее вероятная ступень толщины	29	Доля березы в древостое
3	Максимальная ступень толщины	30	Доля осины в древостое
4	Минимальная ступень толщины	31	Доля других пород в древостое
5	Средний объем хлыста	32	Плотность дорог
6	Максимальный объем хлыста	33	Средняя площадь лесосеки
7	Минимальный объем хлыста	34	Максимальная площадь лесосеки
8	Средняя высота дерева	35	Минимальная площадь лесосеки
9	Наиболее вероятный класс высоты	36	Средний разряд высот
10	Минимальный класс высоты	37	Наиболее вероятный разряд высот
11	Максимальный класс высоты	38	Максимальный разряд высот
12	Средний класс бонитета	39	Минимальный разряд высот
13	Доля лесов I класса бонитета	40	Доля лишайниковых типов лесов
14	Доля лесов II класса бонитета	41	Доля брусничниковых типов лесов
15	Доля лесов III класса бонитета	42	Доля черничниковых типов лесов
16	Доля лесов IV класса бонитета	43	Доля молодняков лесов
17	Доля уклонов до 15°	44	Доля средневозрастных лесов
18	Доля уклонов от 16 до 25°	45	Доля приспевающих лесов
19	Доля уклонов более 26°	46	Доля спелых лесов
20	Доля первой категории грунтов	47	Доля перестойных лесов
21	Доля второй категории грунтов	48	Средняя полнота древостоев
22	Доля третьей категории грунтов	49	Доля редин
23	Доля четвертой категории грунтов	50	Доля древостоев с низкой полнотой
24	Средний запас на 1 га	51	Доля древостоев со средней полнотой
25	Минимальный запас на 1 га	52	Доля древостоев с высокой полнотой
26	Максимальный запас на 1 га	53	Средняя длительность простоя по причине сильных морозов и снегопадов
27	Доля сосны в древостое	54	Средняя длительность простоя по причине распутицы

При наличии фактического материала дополнительно или вместо индикаторов 2–11, 17–19, 25, 26, 34, 35, 37–39, 49–52 могут использоваться индикаторы, характеризующие интервалы вариационных рядов соответствующих характеристик. Индикаторы 13–16, 27–31 и 40–42 могут дополняться индикаторами, отражающими наличие лесов других классов бонитетов, деревьев других пород и типов лесов.

Рекомендуется проводить кластерный анализ не только по всем доступным индикаторам, но также на основе сформированных из них наборов. Это позволит проанализировать схожесть объектов (территорий) по отдельным

аспектам ППУ и принять рациональное решение при объединении территорий в кластеры. В табл. 2 приведены примеры вариантов формирования наборов индикаторов, содержащихся в табл. 1.

Таблица 2

Перечень наборов индикаторов для кластеризации

Включаемые индикаторы	Примечание
Все индикаторы	По всем доступным индикаторам
5, 12, 24, дополнительно можно включить 12, 27–31 и 36, 48	По средним таксационным характеристикам древостоев
1, 5, 8	По средним размерам деревьев
3, 6, 11	По максимальным размерам деревьев
9–15	По почвенно-грунтовым условиям и рельефу
27–31	По породному составу

Первичными источниками информации для определения индикаторов ППУ являются материалы отвода лесосек или их материально-денежной оценки, сведения средств объективного контроля лесозаготовительных машин, карты и планы лесосырьевых баз предприятий, вторичными – лесные планы субъектов Российской Федерации, открытые данные Федерального агентства лесного хозяйства РФ, результаты исследований в области лесного хозяйства и ППУ, а также ряд карт РФ и ее регионов (физических, топографических, климатических, ландшафтных, почвенных карт, карт растительности и т. п.). На практике первичные источники информации не всегда доступны, полны и систематизированы. Поэтому требуется дополнение их вторичными источниками, которые, как правило, имеют большую систематизацию, но меньшую достоверность. Использование вторичных источников информации позволяет охватить общую структуру ППУ, что является важным при решении задачи типизации лесных территорий.

На основании вышеизложенного типизация территорий по ППУ при помощи кластерного анализа должна включать следующие этапы: постановку цели типизации территорий по ППУ; сбор данных о ППУ; проведение кластерного анализа; принятие решения по типизации лесных территорий по ППУ (рис. 1).



Рис. 1. Этапы типизации территорий по ППУ на основе кластерного анализа

Fig. 1. Stages of typification of areas by natural-production conditions based on cluster analysis

Результаты исследования и их обсуждение

Для апробации предлагаемой методики выбрана территория Европейского Севера России (ЕСР). На этой территории сосредоточено более 40 % лесных ресурсов европейской части РФ, а лесная и деревообрабатывающая промышленность является одной из главных в структуре экономики. Поэтому типизация лесных территорий по ППУ актуальна. В качестве объектов T_i для кластерного анализа приняты территории Мурманской (М), Архангельской (А), Вологодской (В) областей, Республик Карелия (РК) и Коми (К). Перечень индикаторов и их значения, учитываемые при типизации ППУ, приведены в работе [18]. Источники данных указаны в табл. 3, на основании которой была сформирована матрица Y ; индикаторы сгруппированы в наборы согласно табл. 4.

Таблица 3

Источники значений индикаторов ППУ

№	Индикатор	Источник
1	Степень толщины, см: средняя	Исследования ЦНИИМЭ [3, 13]
2	наиболее встречающаяся	
3	максимальная	
4	Объем хлыста, м ³ : средний	Лесные планы регионов РФ, геопортал Республики Коми (gis.rkomi.ru)
5	максимальный	
6	минимальный	
7	Средняя высота древостоя, м	–
8	Средний класс бонитета	Открытые данные Федерального агентства лесного хозяйства РФ
9	Уклон поверхности, %: до 15°	Данные, приведенные в работе Р.А. Люманова [9] и уточненные в соответствии с информацией из лесных планов, физических, ландшафтных и почвенных карт
10	16...25°	
11	более 26°	
12	Грунты, %: первой категории	
13	второй категории	
14	третьей категории	
15	четвертой категории	
16	Запас на 1 га, м ³ : средний	Лесные планы регионов РФ
17	минимальный	
18	максимальный	

Окончание табл. 3

№	Индикатор	Источник
19	Доля в древостоях, %: сосны	Схематические карты распределения лесов по доминирующим видам, лесные планы субъектов РФ
20	ели	
21	березы	
22	осины	
23	других пород	
24	Плотность автомобильных дорог, км/га	Карты распределения арендованных лесных участков, карты дорожных сетей, лесные планы субъектов РФ

Таблица 4

Порядок группировки индикаторов в наборы

Набор	Перечень включенных индикаторов
NPS	Все индикаторы
ATD	4, 8, 16, 19–23
TMed	1, 4, 7
TMax	3, 5, 7
CLC	9–15
SC	19–23

В качестве метрики схожести объектов T_i использовалось евклидово расстояние, рассчитываемое согласно выражению (2), в качестве алгоритма формирования кластеров – метод ближайшего соседа. На рис. 2 приведены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору NPS. По всем выбранным индикаторам, характеризующим ППУ, Республика Карелия и Архангельская область наиболее близки среди рассматриваемых регионов (евклидово расстояние – 3,63). Наиболее различными являются Мурманская и Вологодская области (евклидово расстояние – 9,91).

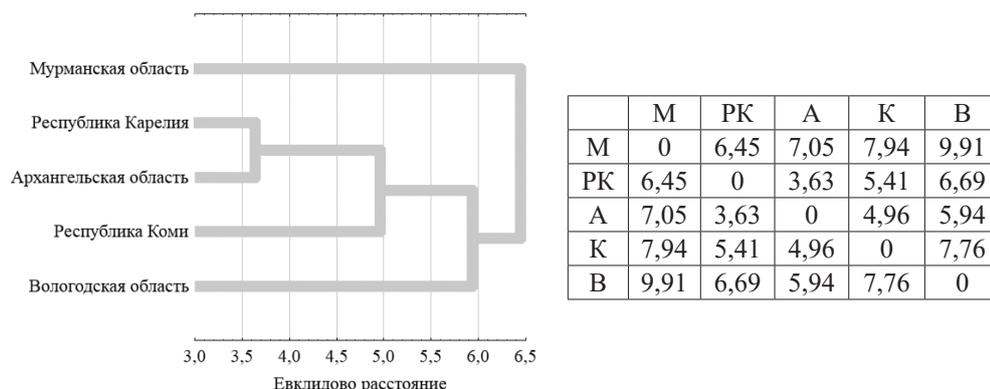


Рис. 2. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору NPS (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний (D))

Fig. 2. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of NPS (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix (D))

На рис. 3 представлены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору АТД, характеризующему средние таксационные характеристики древостоев. Анализ показал, что средние таксационные показатели древостоев Мурманской области более близки к показателям Республики Карелия (евклидово расстояние – 1,98). Средние таксационные показатели древостоев Архангельской области близки к показателям Республики Коми (евклидово расстояние – 2,08). От всех регионов ЕСР наиболее отличаются средние таксационные показатели Вологодской области.

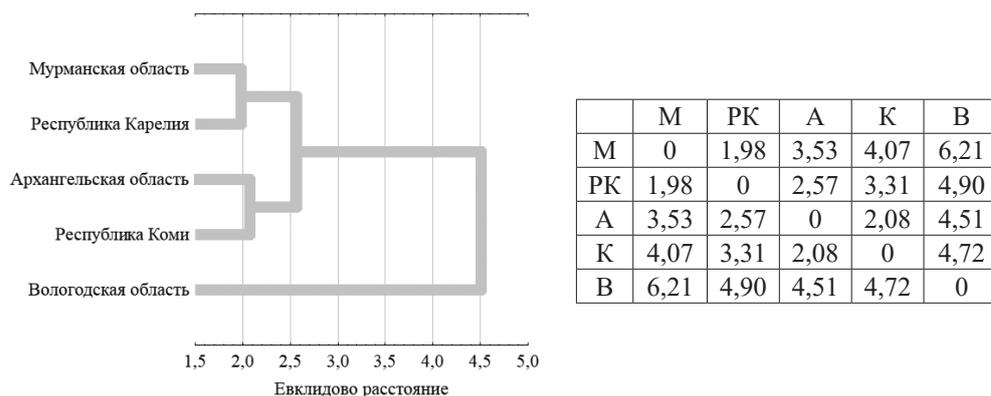


Рис. 3. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору АТД (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний (D))

Fig. 3. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of АТД (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix (D))

На рис. 4 приведены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору ТМед, на рис. 5 – по набору ТМак. Наборы характеризуют соответственно средние и максимальные (близкие к максимальным) по размеру дерева. Анализ показал, что размеры деревьев Архангельской области, Республик Карелия и Коми близки. Для наборов ТМед евклидово расстояние находится в диапазоне 0,60–1,07 и для наборов ТМак – в диапазоне 0,63–1,79. Наиболее различаются по рассматриваемым индикаторам древостои Вологодской и Мурманской областей (евклидово расстояние – 3,91).

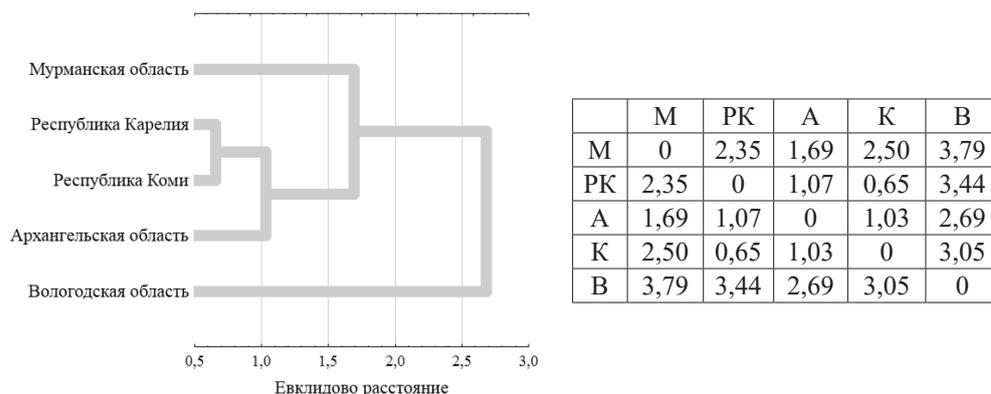


Рис. 4. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору ТМед (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний (D))

Fig. 4. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of ТМед (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix (D))

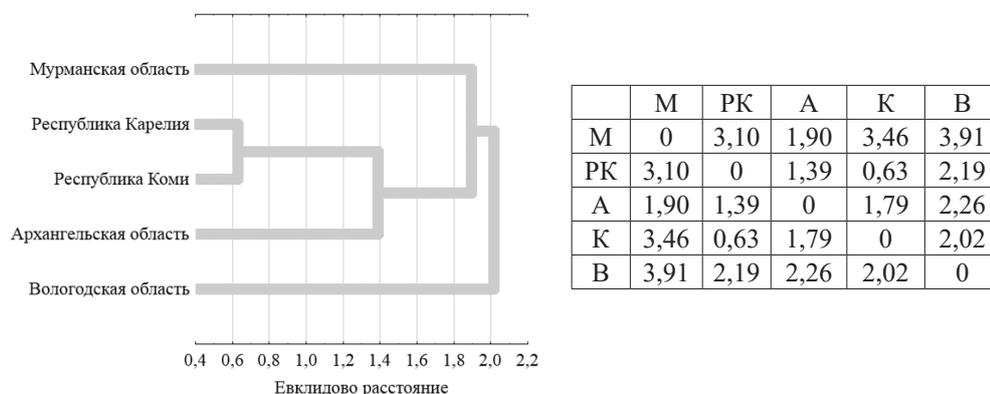


Рис. 5. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору TMax (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний (D))

Fig. 5. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of TMax (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix (D))

На рис. 6 представлены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору CLC, характеризующему почвенно-грунтовые условия и условия рельефа. Среди рассматриваемых регионов наиболее близкими по этим показателям являются Вологодская и Архангельская области (евклидово расстояние – 0,67). Почвенно-грунтовые условия Мурманской области и Республики Коми значительно отличаются от других регионов ЕСР.

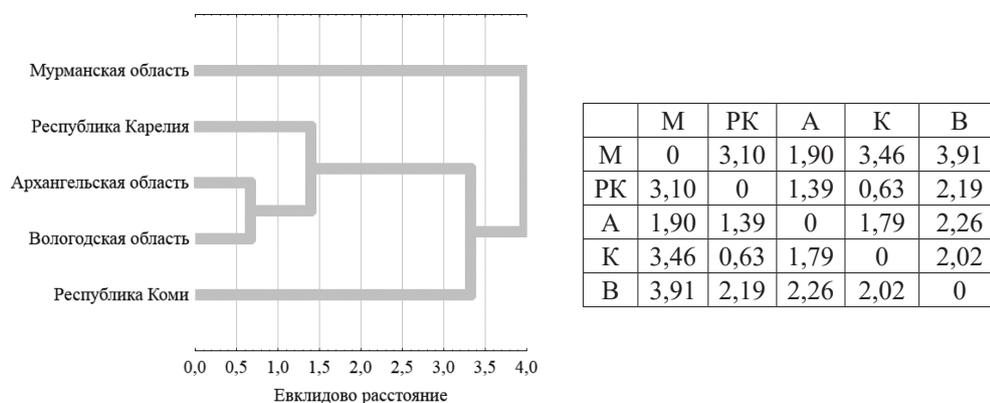


Рис. 6. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору CLC (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний (D))

Fig. 6. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of CLC (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix (D))

На рис. 7 приведены результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору SC, характеризующему породный состав древостоя. Результаты анализа свидетельствуют, что по породному составу древостоя Мурманской области близки к древостоям Республики Карелия (евклидово расстояние – 0,41), а породный состав древостоев Архангельской области наиболее близок к древостоям республики Коми (евклидово расстояние – 2,01). Наиболее по породному составу древостоев от других регионов ЕСР отличается Вологодская область (евклидово расстояние превышает значение 3,60).

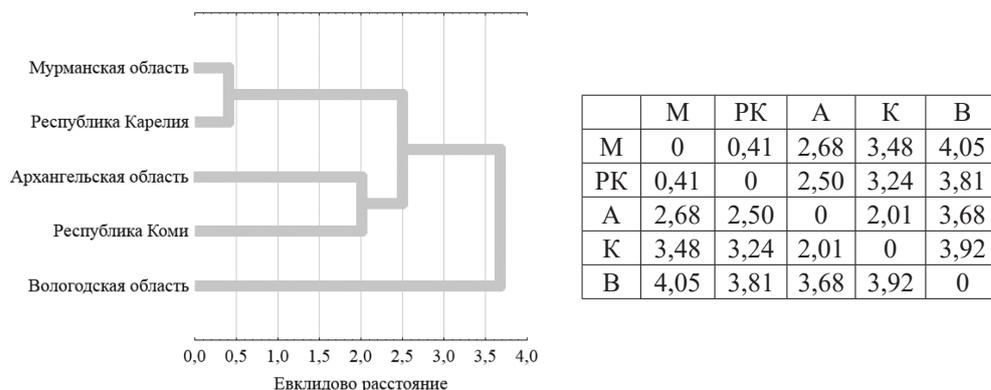


Рис. 7. Результаты кластерного анализа регионов ЕСР по набору SC (слева – дендограмма, справа – матрица расстояний (D))

Fig. 7. Results of cluster analysis of the regions of the European North of Russia by the set of SC (on the left – dendrogram, on the right – distance matrix (D))

На основании анализа полученных дендограмм и матриц расстояний можно выделить три зоны ППУ для ЕСР: зона А, включающая Мурманскую область; зона В, включающая Республику Карелия, Республику Коми и Архангельскую область; зона С, включающая Вологодскую область. Следует отметить, что индикаторы 9–15 характеризуют средние почвенно-грунтовые условия и условия рельефа по областям. Анализ физических, ландшафтных и почвенных карт выявил наличие территорий с нетипичными условиями, которые не отражаются индикаторами. Такие территории отмечены в Республике Карелия (Западно-Карельская возвышенность) и Республике Коми (Северный, Приполярный и Полярный Урал). Поэтому в зоне В целесообразно выделить дополнительные подзоны – В1 и В2. Общая схема типизации территорий ЕСР по ППУ приведена в работе [18].

Предложенная методика позволяет повысить степень формализации и удобство процесса типизации территорий по ППУ. Качество типизации сильно зависит от выбранных индикаторов, характеризующих ППУ, их достоверности и сформированных из них наборов. Очевидно, что чем больше размеры территории, принятые в качестве объекта T_i , тем сложнее обеспечить достоверность индикаторов, так как их значения могут не в полной мере отражать всю вариативность ППУ. При типизации требуется понимание того, какие аспекты ППУ учитываются индикаторами, а какие остаются за рамками анализа. Без этого невозможно обоснованно интерпретировать результаты кластерного анализа и делать необходимые корректировки в рекомендациях по типизации рассматриваемых территорий. В конечном итоге методика является инструментом, требующим принятия окончательного решения специалистом. Очевидно, что, несмотря на формализованный характер объединения лесных территорий в группы, качество типизации зависит от профессионализма специалиста.

Заключение

Типизация лесных территорий по ППУ лесозаготовительных работ может быть осуществлена на основе кластерного анализа. В зависимости от целей

типизации задачу кластерного анализа ППУ целесообразно определять в виде списка индикаторов, характеризующих их отдельные параметры. При типизации лесных территорий необходимо учитывать вероятностный характер ППУ, что может быть осуществлено на основе применения индикаторов, характеризующих вариационные ряды соответствующих параметров ППУ. Для определения значений индикаторов предлагается использовать как первичные, так и вторичные источники информации. Для повышения качества типизации лесных территорий задачу кластерного анализа следует решать не только при помощи всего перечня выбранных индикаторов, но и на основе сформированных из них наборов, характеризующих отдельные аспекты ППУ, а также применять различные алгоритмы формирования кластеров.

Предлагаемая методика позволяет учитывать широкий спектр различных аспектов ППУ, их вероятностный характер, а также гибко выполнять типизацию территорий под конкретные цели. На основе выделяемых таким образом территорий может быть осуществлен поиск эффективных технологий и рациональных параметров систем лесосечных машин для конкретных территориальных зон. Предложенные методологические принципы могут быть перенесены на другие сферы лесопромышленного комплекса и применены, например, для типизации условий деревообрабатывающих производств, транспорта леса, а также для классификации машин и оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов: статистические проблемы обучения. М.: Наука, 1974. 416 с. [Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. *Theory of Pattern Recognition: Theoretical Problems of Learning*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 416 p.].
2. Васильев А.А., Фрумин И.Л. Оценка эффективности применения Мивал-агро на картофеле с использованием кластерного анализа // Перм. аграр. вестн. 2016. № 2(14). С. 16–22. [Vasiliev A.A., Frumin I.L. Evaluation of Agro Mival for Potatoes Using Cluster Analysis. *Permskii Agrarnyi Vestnik* [Perm Agrarian Journal], 2016, no. 2(14), pp. 16–22].
3. Виногоров Г.К. К методике обоснования расчетных деревьев при решении лесоэксплуатационных задач // Тр. ЦНИИМЭ. 1972. № 122. С. 52–64. [Vinogorov G.K. To the Methodology of Justification of Settlement Trees When Solving Forest Exploitation Problems. *Trudy TsNIME*, 1972, no. 122, pp. 52–64].
4. Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ: моногр. М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. 157 с. [Gitis L.Kh. *Statistical Classification and Cluster Analysis*: Monograph, Moscow, MSMI Publ., 2003. 157 p.].
5. Зинчук Г.М., Яшкин А.В. Кластерный анализ аграрных территорий Центрального федерального округа // Вестн. ТвГУ. Сер.: Экономика и управление. 2016. № 4. С. 143–149. [Zinchuk G.M., Yashkin A.V. Cluster Analysis of Agrarian Territories in the Central Federal District. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravleniye* [Bulletin Tver State University. Series: Economics and Management], 2016, no. 4, pp. 143–149].
6. Игошин А.Н., Черемухин А.Д. Кластерный анализ зернового сектора региона // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 7(50). С. 21–29. [Igoshin A.N., Cheryomukhin A.D. Cluster Analysis of the Grain Sector in the Region. *Vestnik NGIEI* [Vestnik NGIEI], 2015, no. 7(50), pp. 21–29].
7. Казаков Н.В., Рябухин П.Б., Садетдинов М.А. Метод типизации лесного фонда // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10. С. 157–161. [Kazakov N.V., Ryabukhin P.B., Sadetdinov M.A.

The Method of the Forest Stock Typification. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2013, no. 10, pp. 157–161].

8. Лантева Е.В. Статистический анализ и прогнозирование уровня доходов населения в Российской Федерации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 12. С. 64–69. [Lapteva E.V. Statistical Analysis and Forecasting of Population Incomes in Russian Federation. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovation. Investments], 2016, no. 12, pp. 64–69].

9. Люманов Р.А. Машинная валка леса. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 280 с. [Lyumanov R. *Machine Forest Felling*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 280 p.].

10. Обыдёнников В.И., Кожухов Н.И., Коротков С.А. Актуальные проблемы отечественной лесной типологии // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 2. С. 5–11. [Obydyonnikov V.I., Kozhukhov N.I., Korotkov S.A. Domestic Forest Typology Current Issues. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 2, pp. 5–11]. DOI: [10.18698/2542-1468-2019-2-5-11](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-5-11)

11. Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Бурлов А.Н. Метод лесопромышленной типизации лесосек по природно-производственным условиям на примере ельников Дальневосточного федерального округа // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2(6). С. 52–57. [Ryabukhin P.B., Cozakov N.V., Burlov A.N. Method of Timber Industry Typification of Cutting Areas According to Natural and Industrial Conditions (Spruce Forest of Far East Federal District as an Example). *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Sistemy. Methods. Technologies], 2010, no. 2(6), pp. 52–57].

12. Рябченко Н.А., Катермина В.В., Гнедаш А.А., Малышева О.П. Политический контент социальных движений в online-пространстве современных государств: методология анализа и исследовательская практика // Южно-рос. журн. соц. наук. 2018. Т. 19, № 3. С. 139–162. [Ryabchenko N.A., Katermina V.V., Gnedash A.A., Malyshcheva O.P. Political Content of Social Movements in the Online Space of Modern States: Methodology of the Analysis and Research Practices. *Yuzhno-rossiyskiy zhurnal sotsial'nykh nauk* [South Russian Journal of Social Sciences], 2018, vol. 19, no. 3, pp. 139–162]. DOI: [10.31429/26190567-19-3-139-162](https://doi.org/10.31429/26190567-19-3-139-162)

13. Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов: рекомендации. Химки: ЦНИИМЭ, 1986. 23 с. [*Typification of the Natural-Production Conditions of Logging Areas: Recommendations*. Khimki, TsNIIME Publ., 1986. 23 p.].

14. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С. Лесная типология: теория и перспективы использования в лесах Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 1-2. С. 143–148. [Farber S.K., Kuz'mik N.S. Forest Typology: Theory and Prospects for Use in Siberian Forests. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2013, vol. 31, no. 1-2, pp. 143–148].

15. Феклистова И.С. Использование кластерного анализа при оценке эффективности стратегического управления предприятиями региона // Траектория науки. 2016. № 2(7). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-klaster-nogo-analiza-pri-otsenke-effektivnosti-strategicheskogo-upravleniya-predpriyatiyami-regiona> (дата обращения: 06.08.19). [Feklistova I.S. Using Cluster Analysis for the Estimation of Efficiency of Strategic Management of the Region Enterprises. *Traektoriya nauki* [Path of Science], 2016, no. 2(7)].

16. Филипова А.Г., Еськова А.В., Инзарцев А.В. Социальный потенциал региона: опыт использования кластерного анализа // Регионология. 2017. Т. 25, № 3(100). С. 438–455. [Filipova A.G., Eskova A.V., Inzartsev A.V. Social Potential of a Region: Experience of Using Cluster Analysis. *Regionologiya* [Regionology], 2017, no. 3(100), pp. 438–455].

17. Хромушин В.А., Есков В.М., Хетагурова А.К. Инновационные методы анализа, обработки и управления информацией в практике здравоохранения // Вестн.

нов. мед. технологий. 2016. № 1. С. 15–21. Режим доступа: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2016-1/1-2.pdf> (дата обращения: 06.08.19). [Khromushin V.A., Eskov V.M., Khetagurova A.K. Innovative Methods of Analyzing, Processing and Information Management in Health System. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy* [Journal of New Medical Technologies], 2016, no. 1, pp. 15–21]. DOI: [10.12737/18446](https://doi.org/10.12737/18446)

18. Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н. Минимизация техногенного воздействия лесных машин на экосистемы лесов на основе кластеризации природно-производственных условий лесозаготовок // Успехи современного естествознания. 2018. № 11(ч. 1). С. 72–78. [Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. Minimization of Technogenic Effects of Forest Machines on Forest Ecosystems Based on the Clustering of Natural-Production Conditions for Forestry. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2018, no. 11 (part 1), pp. 72–78]. DOI: [10.17513/use.36908](https://doi.org/10.17513/use.36908)

19. Щемелева И.И. Социальная активность студенческой молодежи: факторный и кластерный анализ // Социол. исслед. 2019. № 4. С. 133–141. [Shchemeleva I.I. Social Activity of the Student Youth: Factor and Cluster Analysis. *Sotsiologicheskie issledovaniya* [Sociological Studies], 2019, no. 4, pp. 133–141]. DOI: [10.31857/S013216250004594-6](https://doi.org/10.31857/S013216250004594-6)

20. Ackerman P.A., Williams C., Ackerman S., Nathi C. Diesel Consumption and Carbon Balance in South African Pine Clear-Felling CTL Operations: A Preliminary Case Study. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, no. 38, iss. 1, pp. 65–72.

21. Alam M., Walsh D., Strandgard M., Brown M. A Log-by-Log Productivity Analysis of Two Valmet 475EX Harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 25, iss. 1, pp. 14–22. DOI: [10.1080/14942119.2014.891668](https://doi.org/10.1080/14942119.2014.891668)

22. Bergroth J., Palander T., Kärhä K. Excavator-Based Harvesters in Wood Cutting Operations in Finland. *Forestry Studies*, 2006, vol. 45, pp. 74–88.

23. Castro G.P., Nutto L., Malinovski J.R., Malinovski R.A. Harvesting Systems. *Tropical Forestry Handbook*. Berlin, Springer, 2016, pp. 2445–2485. DOI: [10.1007/978-3-642-54601-3_184](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54601-3_184)

24. Häggström C., Lindroos O. Human, Technology, Organization and Environment – a Human Factors Perspective on Performance in Forest Harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 27, iss. 2, pp. 67–78. DOI: [10.1080/14942119.2016.1170495](https://doi.org/10.1080/14942119.2016.1170495)

25. Jiroušek R., Klvač R., Skoupý A. Productivity and Costs of the Mechanised Cut-to-Length Wood Harvesting System in Clear-Felling Operations. *Journal of Forest Science*, 2007, vol. 53, iss. 10, pp. 476–482. DOI: [10.17221/2088-JFS](https://doi.org/10.17221/2088-JFS)

26. Kärhä K., Rönkkö E., Gumse S.-I. Productivity and Cutting Costs of Thinning Harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 2004, vol. 15, iss. 2, pp. 43–56. DOI: [10.1080/14942119.2004.10702496](https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702496)

27. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–52. DOI: [10.1080/08435243.1994.10702659](https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659)

28. Klaes B., Struck J., Schneider R., Schüler G. Middle-Term Effects after Timber Harvesting with Heavy Machinery on a Fine-Textured Forest Soil. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, iss. 6, pp. 1083–1095. DOI: [10.1007/s10342-016-0995-2](https://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2)

29. Kormanek M., Baj D. Analysis of Operation Performance in the Process of Machine Wood Harvesting with FAO FAR 6840 Mini-Harvester. *Agricultural Engineering*, 2018, vol. 22, iss. 1, pp. 73–82. DOI: [10.1515/agriceng-2018-0007](https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0007)

30. Laitila J., Väätäinen K. The Cutting Productivity in Integrated Harvesting of Pulpwood and Delimbed Energy Wood with a Forestry-Equipped Peat Harvesting Tractor. *Suo*, 2013, vol. 64(2-3), pp. 97–112.

31. McNeel J.F., Rutherford D. Modeling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 6, iss. 1, pp. 7–14. DOI: [10.1080/08435243.1994.10702661](https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661)
32. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, pp. 335–363. DOI: [10.14214/sf.346](https://doi.org/10.14214/sf.346)
33. Ovaskainen H. Comparison of Harvester Work in Forest and Simulator Environments. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 89–101. DOI: [10.14214/sf.398](https://doi.org/10.14214/sf.398)
34. Palander T., Bergroth J., Kärhä K. Excavator Technology for Increasing the Efficiency of Energy Wood and Pulp Wood Harvesting. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 40, pp. 120–126. DOI: [10.1016/j.biombioe.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.010)
35. Pētersons J. Productivity of Harvesters in Commercial Thinnings in the Forest Stands of Different Composition of Species. *Research for Rural Development*, 2014, vol. 2, pp. 76–82.
36. Proto A.R., Macri G., Visser R., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European Journal of Forest Research*, 2018, vol. 137, iss. 2, pp. 143–151. DOI: [10.1007/s10342-017-1088-6](https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6)
37. Rozītis A., Zimelis A., Lazdiņš A. Evaluation of Productivity and Impact on Soil of Tracked ProSilva F2/2 Forwarder in Forest Thinning. *Research for Rural Development*, 2017, vol. 1, pp. 94–100. DOI: [10.22616/rrd.23.2017.014](https://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.014)
38. Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. Different Responses in Bulk Density and Saturated Conductivity to Soil Deformation by Logging Machinery on a Ferral-sol under Native Forest. *Soil Use and Management*, 2007, vol. 23, iss. 3, pp. 286–293. DOI: [10.1111/j.1475-2743.2007.00096.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00096.x)
39. Strandgard M., Mitchell R., Acuna M. Time Consumption and Productivity of a Forwarder Operating on a Slope in a Cut-to-Length Harvest System in a *Pinus radiata* D. Don Pine Plantation. *Journal of Forest Science*, 1972, vol. 63, iss. 7, pp. 324–330. DOI: [10.17221/10/2017-JFS](https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS)
40. Syunev V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V., Seliverstov A., Gerasimov Y., Karvinen S., Välkky E. Comparison of Wood Harvesting Methods in the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 120*. Joensuu, MELTA, 2009. 117 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp120.htm> (accessed 04.09.19)
41. Tiernan D., Zeleke G., Owende P.M.O., Kanali C.L., Lyons J., Ward S.M. Effect of Working Conditions on Forwarder Productivity in Cut-to-Length Timber Harvesting on Sensitive Forest Sites in Ireland. *Biosystems Engineering*, 2004, vol. 87, iss. 2, pp. 167–177. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2003.11.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.009)
42. Tufts R.A. Productivity and Cost of the Ponsse 15-Series, Cut-to-Length Harvesting System in Southern Pine Plantations. *Forest Products Journal*, 1997, vol. 47, no. 10, pp. 39–46.

TYPIFICATION OF FOREST AREAS BY NATURAL-PRODUCTION CONDITIONS BASED ON CLUSTER ANALYSIS

Ilya R. Shegelman, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [P-9793-2019](https://orcid.org/0000-0001-5133-4586),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-4586>

Pavel V. Budnik, Candidate of Engineering, Head of the Department of Intellectual Property and Invention Protection; ResearcherID: [E-1782-2015](https://orcid.org/0000-0002-8701-4442),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: budnikpavel@yandex.ru

Abstract. The effectiveness of harvesting machines, their reliability, and the level of negative environmental impact depends on the degree of adaptation of the equipment to natural-production conditions (NPC). To choose the equipment it is necessary to allocate groups of areas with close NPC. The purpose of the study is to form methodological tools for forest industry typification of forest areas by NPC. It is proposed to carry out the typification of forest areas based on cluster analysis. For this purpose, a methodology has been developed, including: setting the goal of typing areas by NPC; data collection on NPC; conducting cluster analysis; decision making on typification of areas by NPC. The task of cluster analysis is to divide, on the basis of a certain set of data, the set of forest areas into groups with similar NPCs. It is proposed to use Euclidean distances as a measure of belonging to one of the groups, and to determine the data set by indicators describing the NPC. The proposed methodology has been tested on the example of the European North of Russia (ENR). The study showed that three zones can be distinguished in ENR: zone A, including the Murmansk region; zone B, including the Republic of Karelia, the Republic of Komi and the Arkhangelsk region; zone C, including the Vologda region. Additionally, two subzones are distinguished in zone B: the West Karelian Upland and the territories belonging to the Northern, Subpolar and Polar Urals. The proposed methodology allows to increase the degree of formalization and convenience of the typification process of forest areas by NPC, to take into account a wide range of various aspects of natural-production conditions, their probabilistic nature, as well as to flexibly carry out the typification of areas for specific purposes. The research results may be applicable in solving problems of searching for effective technologies and rational parameters of logging machine systems.

For citation: Shegelman I.R., Budnik P.V. Typification of Forest Areas by Natural-Production Conditions Based on Cluster Analysis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 120–137. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-120-137

Funding: The work was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists on the project “Development of the Environment for the Design of Optimal Parameters of Technological Equipment of Forest Multiple-Function Machines” (МК-5321.2018.8).

Keywords: typification of forest areas, natural-production conditions, logging operations, cluster analysis.

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

Поступила 04.09.19 / Received on September 4, 2019

УДК 630*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-138-149

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Э.Ф. Герц, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

А.В. Мехренцев, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-5378-2020](https://orcid.org/0000-0002-2186-0152)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>

В.В. Побединский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [G-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-6318-3447)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>

Н.Н. Теринов, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

А.Ф. Уразова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: gerz.e@mail.ru, mehrentsev@yandex.ru, n_n_terinov@mail.ru, ura-alina@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен метод интенсификации лесного хозяйства способом комплексной механизации лесохозяйственных и лесозаготовительных работ. В качестве технической основы предлагается использовать машины манипуляторного типа: харвестеры, форвардеры и экскаваторы. Повышение эффективности машин манипуляторного типа может быть достигнуто за счет комплекта дополнительного сменного оборудования. Это позволит создавать культуры посадкой саженцев с открытой и закрытой корневой системой, выполнять обработку почвы, посев семян, прореживание молодняков и проводить борьбу с вредителями, мульчирование волоков после осуществления основных работ на лесосеке, а также земляные работы при устройстве лесовозных дорог. Использование дополнительного сменного оборудования превращает машину манипуляторного типа в мультифункциональную. Доказано, что приобретение дополнительного оборудования для лесохозяйственных и лесозаготовительных работ, даже если их объем небольшой, экономически оправдано. Основу интенсивного лесного хозяйства составляют в первую очередь мероприятия по рубкам спелых и перестойных насаждений, уходу за лесом и лесовосстановлению. Предложен ряд технологических схем с использованием мультифункционального агрегата при выполнении рубок как в режиме харвестера, так и в режиме валочно-пакетирующей машины. В последнем варианте раскряжевка хлыстов и обрезка ветвей обеспечивают концентрацию всех порубочных остатков на верхнем складе и создают благоприятные условия для их переработки в сырье для производства биотоплива и уменьшения захламленности лесосек. Рассмотрен вариант использования малогабаритной техники для подтрелевки деревьев в зону действия мультифункциональной машины с установленной харвестерной головкой при выполнении селективных (выборочных) рубок по широкопосечной технологии лесосечных работ. Предлагается предварительная подготовка лесосеки малогабаритной техникой (уборка тонкомерных, сухостойных и валежных деревьев), что существенно снизит повреждение компонентов насаждения и обеспечит большую степень сохранности природной среды в процессе основной работы мультифункциональной машины. Ее использование в наиболее благоприятные сроки за счет выполнения работ по квартально-блочной схеме, уменьшение числа простоев по природно-производственным условиям и числа перебазировок и, соответственно, увеличение количества машино-часов

позволят минимизировать общие затраты на проведение комплекса лесохозяйственных и лесозаготовительных работ.

Для цитирования: Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Побединский В.В., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Повышение эффективности multifunctionальных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 138–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-138-149

Финансирование: Статья подготовлена по результатам работы над темой «Экологические аспекты рационального природопользования» (номер госрегистрации FEUG-2020-0013).

Ключевые слова: комплексная механизация, multifunctionальные машины, сменное оборудование, квартално-блочная организация работ.

Введение

Интенсивная модель ведения лесного хозяйства в ближайшей перспективе должна стать приоритетной на территории всех основных лесных регионов Российской Федерации, что закреплено в принятой Концепции интенсивного использования и воспроизводства лесов [7]. В основе Концепции лежит опыт исследовательских работ, выполненных в России за последние 15 лет, а также исторический опыт применения интенсивной модели в разных странах. Основу интенсивного лесного хозяйства составляют в первую очередь эффективные мероприятия по лесовосстановлению и лесосечные работы [3]. Качество выполненных работ и снижение затрат являются ключевыми показателями для получения прибыли. Постоянное увеличение потребности в кадрах для ведения лесного хозяйства, а также рост стоимости ручного труда заставляют минимизировать затраты и стимулируют интерес к комплексной механизации лесохозяйственных работ [16, 19]. Например, обработка почвы, посев или посадка лесных культур могут проводиться одной и той же машиной одновременно, что позволяет завершить весь комплекс работ на объекте лесовосстановления за один проход. За рубежом активно исследуется механизированная посадка лесных культур с применением разных видов посадочных агрегатов [14]. В качестве базовой машины используется экскаватор или форвардер [8, 15, 17]. К сожалению, в российской лесохозяйственной практике механизация лесного хозяйства ограничивается применением мотокусторезов, бензодвигательных пил, а также общепромышленных гусеничных и колесных тракторов с навесными орудиями для обработки лесной почвы. Ряд исследователей считает, что использование гусеничного шасси как единой базы для выполнения широкого спектра работ на лесосеке актуально с учетом трендов развития современного лесного машиностроения [4].

В мировой практике для лесопосадочных работ в качестве базовой машины чаще всего применяется экскаватор. Стрела базовой машины должна быть достаточно прочной для создания микроповышений, а рабочий просвет и ширина колеи машины – соответствовать необходимым требованиям для производства работ. Лесопосадочное устройство устанавливается на рукояти манипулятора базовой машины. С его помощью выполняются как обработка почвы, так и посадка растений. В настоящее время на рынке представлены лесопосадочные устройства следующих производителей: M-Planter (M-Planter Oy, Финляндия) и Risutec (Risutec Oy, Финляндия), а также Bracke (Bracke Forest Ab,

Швеция) [20]. Компания M-Planter выпускает лесопосадочные устройства не только с одной, но и с двумя посадочными головками [18]. Саженцы перевозятся в стеллаже, установленном на раме базовой машины, в объеме, необходимом для обеспечения работы в течение одной смены или одного рабочего дня.

С точки зрения комплексной экономичности эксплуатации лесной техники общее количество рабочих часов является столь важным фактором, что приобретение дополнительного оборудования для лесохозяйственных работ становится для арендатора рентабельным вложением денежных средств даже при выполнении небольшого объема дополнительных работ. На рис. 1 приведены данные, отражающие изменение объема затрат на 1 ч эксплуатации базовой ма-

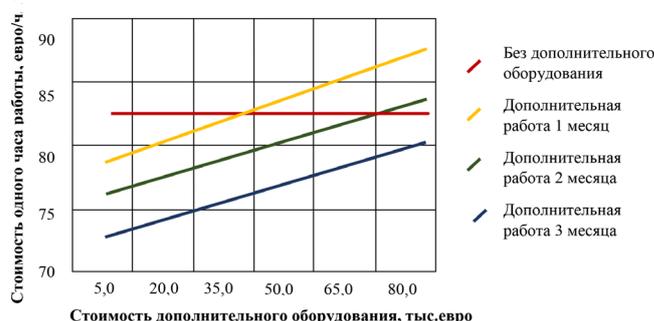


Рис. 1. Затраты на эксплуатацию харвестера при использовании дополнительного оборудования разной стоимости
Fig. 1. Harvester operating expenses when using optional equipment of various cost

шины стоимостью 10,5 млн р. при использовании дополнительного оборудования разной стоимости в случае, когда с помощью инвестиций на приобретение последнего можно увеличить рабочее время на 1–3 мес. в году по сравнению с исходной ситуацией, при которой работы ведутся лишь 8 мес.

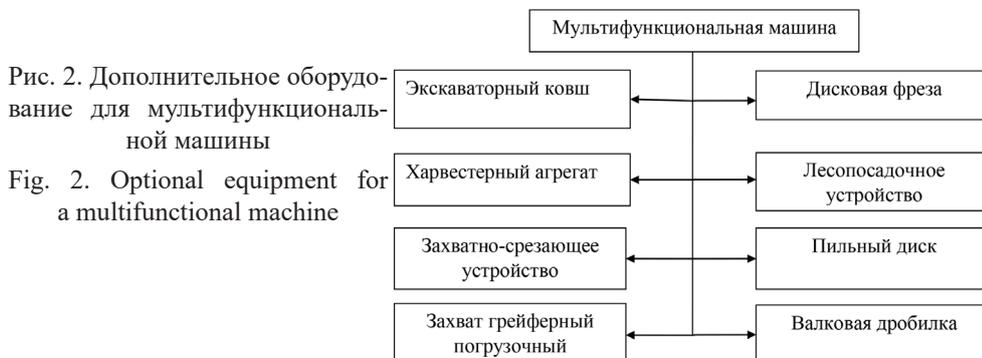
Объекты и методы исследования

Многофункциональность универсальной манипуляторной машины многоцелевого назначения на базе гусеничного экскаваторного шасси ЭО-41211А, разработанной и изготовленной АО «Уральское конструкторское бюро транспортного машиностроения» (г. Нижний Тагил), предполагает возможность ее применения для выполнения необходимых при ведении интенсивного лесного хозяйства операций. Для этого машину планируется оснастить дополнительными функциональными модулями, монтируемыми на рукояти манипулятора.

Харвестерный агрегат Х600 разработан для установки на экскаватор и имеет повышенные прочность и жесткость, что позволяет компенсировать ряд погрешностей работы операторов и извлекать из лесного массива крупные и поваленные деревья без опасности повреждения вилки механизма подъема харвестерной головки. Технические характеристики харвестерной головки:

оптимальная толщина ствола в месте спила.....	400...600 мм
масса головки.....	1980 кг
максимальное открытие передних ножей головки.....	750 мм
максимальное открытие протаскивающих вальцов.....	850 мм
максимальное открытие задних ножей головки.....	950 мм
длина пильной шины.....	820...880 мм
скорость протяжки ствола дерева.....	5 м/с
максимальное усилие протяжки.....	37 кН

Дополнительное сменное технологическое оборудование для мультифункциональной машины представлено на рис. 2.



Оно позволяет производить практически весь комплекс лесохозяйственных и лесозаготовительных работ, в том числе:

харвестерный агрегат или захватно-срезающее устройство (ЗСУ) обеспечивают работу универсальной машины в качестве харвестера или валочно-пакетирующей машины;

дисковая фреза с высевальным аппаратом осуществляет обработку почвы, совмещая это с посевом семян;

лесопосадочное устройство револьверного типа используется для создания культур путем посадки саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС);

пильный диск с форсунками предназначен для осветления и прореживания молодняков и обработки древостоя препаратами от насекомых-вредителей;

экскаваторный ковш используется при прокладке усов и подготовке погрузочных пунктов, локального водоотвода и других земляных работ;

валковая дробилка предназначена для измельчения порубочных остатков;

захват грейферный обеспечивает погрузку заготовленных круглых лесоматериалов.

Проект освоения лесов содержит комплекс лесохозяйственных мероприятий, которые должны быть осуществлены в пределах одного квартала или группы смежных кварталов. При составлении технологической карты разработки лесосеки максимально учитываются все существующие лесные дороги, лесовозные усы, верхние склады (погрузочные площадки): действует принцип минимума затрат на строительство дорог. Учитывается необходимость заготовки ликвидной древесины и затрат на восстановление и уход за лесом. Выбор маршрута прокладки лесовозных усов, их протяженность, а также численность и местоположения погрузочных пунктов определяются из условия

$$C^{lv}l_v + \sum_1^n C_i^{nn} + \sum_1^n \sum_1^m \sum_1^p C_{ijk}^{cc} q_j^{cc} + C_b + C_y = C_{01} \Rightarrow \min,$$

где $C^{lv}l_v$ – произведение стоимости строительства 1 км лесовозного уса (лесных дорог) на их протяженность в квартале; C_i^{nn} – себестоимость строительства i -го погрузочного пункта; n – количество погрузочных пунктов; m – число выделов, на которых планируется проведение рубок; p – число систем машин, используемых для выполнения работ; C_{ijk}^{cc} – себестоимость заготовки 1 м³ ликвидной древесины k -й системой машин на j -м выделе и ее трелевки к i -му

погрузочному пункту; q_j^{cc} – объем ликвидной древесины в j -м выделе; C_b – затраты на выполнение работ по лесовосстановлению; C_y – затраты на выполнение мероприятий по уходу за лесом; C_{01} – общая стоимость выполнения работ в квартале (блоке кварталов).

Планирование баланса рабочего времени мультифункциональной машины определяется объемом запланированных в квартале (блоке кварталов) лесохозяйственных мероприятий:

$$T = t^{r1} + t^{r2} + t^{r3} + t^d + t^{ol} + t^{p1} + t^{p2} + t^{p3},$$

где t^{r1} – затраты времени на выполнение рубок в спелых и перестойных древостоях; t^{r2} – затраты времени на выполнение рубок ухода в средневозрастных и приспевающих древостоях; t^{r3} – затраты времени на выполнение рубок ухода в молодняках; t^d – затраты времени харвестера (базовой машины) на выполнение работ по формированию сети лесных дорог (лесовозных усов); t^{ol} – затраты времени на очистку мест рубок (мульчирование порубочных отходов); t^{p1} – затраты времени на посев семян; t^{p2} – затраты времени на посадку культур с открытой корневой системой (ОКС); t^{p3} – затраты времени на посадку культур с ЗКС.

Результаты исследования и их обсуждение

Эффективной формой организации интенсивно проводимых лесохозяйственных работ в комплексе с лесопромышленным производством, реализуемым арендаторами, может быть поквартальный или поквартально-блочный метод [10]. Он предполагает ежегодное планирование работ в рамках отдельных лесных кварталов или группы кварталов. Это позволяет концентрировать трудовые и материальные ресурсы и тем самым увеличивать коэффициент использования оборудования за счет снижения числа перебазировок.

Наличие мультифункциональной машины с комплектом съемного оборудования дает возможность существенно повысить эффективность использования дорогостоящей техники в течение календарного года. Вместе с тем следует обратить внимание на восстановление прежних машино-тракторных станций (МТС), которые могут быть созданы на базе государственных лесохозяйственных предприятий. Эти предприятия, продавая услуги по прокату лесохозяйственного оборудования, поддерживали бы индивидуальных предпринимателей, работающих в данной сфере. Продажа услуг МТС, в том числе и сервисных, в настоящее время может стать выгодным бизнесом. При интенсивной модели ведения лесного хозяйства лесопользователю потребуется целый комплекс техники и оборудования для выполнения работ. Предоставление так называемой услуги «tracksharing», или прокат лесохозяйственной техники, может быть интересно и поставщикам оборудования. Здесь же реально воспользоваться возможностями подрядчиков-специалистов и организаций по выполнению тех или иных работ в лесу [6].

Система машин включает мультифункциональную машину с харвестерной головкой или ЗСУ и трелевочный трактор. Харвестерный агрегат обеспечивает валку, раскряжевку хлыстов и обрезку ветвей (рис. 3, 4).

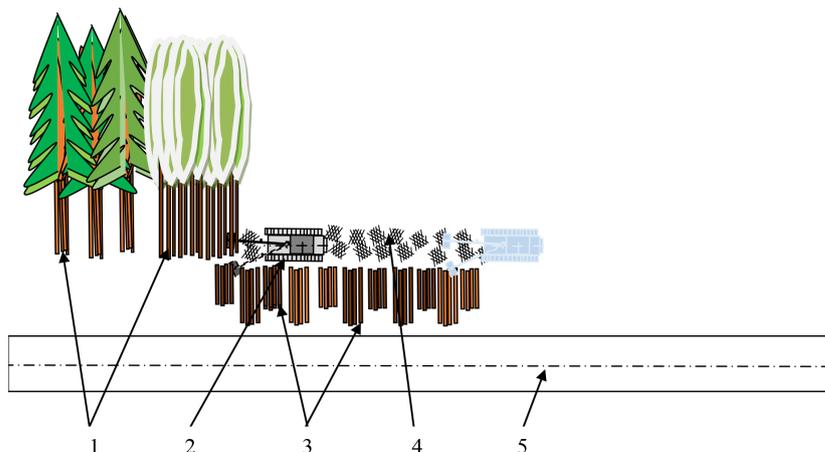


Рис. 3. Технологическая схема заготовки древесины с использованием мультифункциональной машины с харвестерным агрегатом: 1 – пакеты деревьев; 2 – харвестер; 3 – пакеты сортиментов; 4 – порубочные остатки; 5 – лесовозный ус

Fig. 3. Process flow diagram of timber harvesting using a multifunctional machine with a harvester head: 1 – packages of trees; 2 – harvester; 3 – packages of logs; 4 – logging residues; 5 – haul road spur



Рис. 4. Раскряжевка хлыстов мультифункциональной машиной на верхнем складе

Fig. 4. Tree length bucking with a multifunctional machine in the upper depot

Мультифункциональная машина, оборудованная ЗСУ, работает в режиме валочно-пакетирующего агрегата. В спелых и перестойных древостоях сплошные рубки ведутся по ленточной технологии, позволяющей реализовывать максимальную производительность лесозаготовительных машин с ЗСУ. В процессе работы выполняется предварительная попородная подсортировка деревьев. Трелевка заготовленной древесины на верхний склад в виде деревьев с кронами осуществляется чокерным или бесчокерным трелевочным трактором.

В предлагаемой технологии предварительная попородная подсортировка деревьев позволит произвести сортировку с использованием погрузочно-штабелевочного грейфера на большее число сортотроп. Концентрация всех порубочных остатков на верхнем складе создаст благоприятные условия для производства биотоплива, уменьшит захламленность лесосек.

При валке деревьев бензомоторными пилами и хлыстовой трелевке древесины трелевочными тракторами мультифункциональная машина может использоваться на верхнем складе в качестве процессора для раскряжевки хлыстов, а при трелевке деревьев с кронами – и для обрезки ветвей.

В ходе проведения селективных или выборочных рубок целесообразно применять схемы, позволяющие рубить широкие пасаки. При выполнении рубок ухода с вырубкой деревьев незначительного объема мультифункциональную машину в режиме харвестера рекомендуется эксплуатировать с использованием телескопического элемента рукояти, что увеличит ширину разрабатываемой пасеки. После рубки центральной ленты, включающей технологический коридор и смежные сортиментные ленты, осуществляется разработка периферийных лент. Подлежащие рубке деревья валят в направлении волока бензомоторной пилой в промежутки между деревьями, оставляемыми на дорасщивание. Ширина полупасаки при этом должна быть меньше суммы вылета манипулятора и средней высоты вырубаемых деревьев, что обеспечит досягаемость вершин деревьев, поваленных в направлении технологического коридора манипулятором харвестера [1].

При большей ширине пасеки необходимо подтрелевывать вырубленные деревья в зону действия мультифункциональной машины с установленной харвестерной головкой [5]. В ходе выборочных рубок это может достигаться посредством привлечения дополнительного оборудования, в зависимости от объема хлыста – малогабаритными тракторами или мини-тракторами, оборудованными лебедками и способными работать под пологом древостоя без прокладки технологических коридоров (рис. 5) [12].

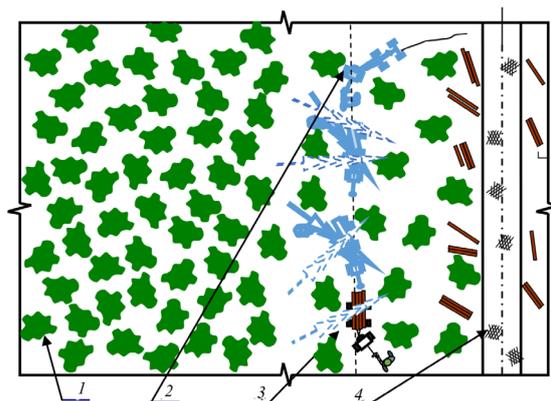


Рис. 5. Схема подтрелевки деревьев из глубины пасеки: 1 – растущие деревья; 2 – мини-трактор и маршрут его перемещения; 3 – порубочные остатки; 4 – граница зоны работы харвестера

Fig. 5. Scheme of hauling trees using wide-strip technology: 1 – growing trees; 2 – mini tractor and its movement route; 3 – logging residues; 4 – borders of the harvester working area

В технологической цепочке с использованием мультифункциональной машины малогабаритная техника успешно применима для предварительной подготовки лесосеки к рубке. Это мероприятие включает в себя вырубку тонкомерных, больных, поврежденных, сухостойных деревьев и уборку валежа (рис. 6), что



Рис. 6. Предварительная подготовка лесосеки мини-трактором

Fig. 6. Preliminary preparation of the cutting area by a mini tractor

было успешно опробовано при проходной рубке на участке с подпологовыми лесными культурами [11].

Предварительная подготовка лесосеки и подтрелевка хлыстов в процессе ее освоения с помощью дополнительного малогабаритного оборудования позволяют снизить повреждение компонентов насаждения, обеспечивая в большей степени сохранение природной среды.

Существенное влияние на лесозаготовительные работы оказывают погодные условия [9]. Основной объем лесозаготовительных работ приходится в основном на зимние месяцы. В остальное время работа возможна только на дренированных сухих и свежих почвах. В среднем простои харвестеров и других тяжелых лесозаготовительных машин, в первую очередь трелевочных, по погодным условиям составляют примерно 30 %. Степень эксплуатации базовой машины удастся повысить за счет лесохозяйственных работ, выполняемых в теплое время, когда грунт оттаял, при этом постоянные расходы распределяются в соответствии с увеличившимся числом машино-часов, что означает сокращение объема затрат на 1 ч эксплуатации техники. Гусеничное шасси имеет меньший показатель удельного давления на грунт (от 0,3 до 0,6 кгс/см²) по сравнению с колесными аналогами (от 1,7 до 2,1 кгс/см²) [13], что существенно в условиях «слабых» грунтов. Возможность установки широких траков (до 900 мм) превращает multifункциональную машину на базе экскаватора в болотоходную технику. Это особенно актуально при выполнении работ в период межсезонья. Например, посев и посадку ценных древесных пород проводят в основном в весенний период, т. е. в момент снижения интенсивности лесозаготовок в связи с сезонными условиями и при относительно прогретой и влажной почве. В 2–3-недельный период в мае–июне при совмещенном механизированном посеве (обработка почвы боронованием или частичной минерализацией с одновременным посевом) семена попадают в свежую и влажную обработанную

почву. Узел для дозирования семян прикрепляется к дисковой бороне, установленной на универсальной манипуляторной машине. При минерализации площадками узел для дозирования семян монтируется к ее ковшу.

В ближайшие годы должны значительно возрасти объемы лесовосстановления с применением посадочного материала с ЗКС, что потребует применения современных высокопроизводительных лесопосадочных устройств [2]. При механизированной посадке особое значение имеют высокое качество саженцев и их одинаковые размеры в каждой партии. Корневая система должна быть неповрежденной и здоровой, а почвенный ком с корнями достаточно плотным и способным сохранить целостность в условиях вибрации лесопосадочной машины. Этим требованиям в полной мере отвечает посадочный материал с ЗКС. Преимуществом механизированной посадки, по сравнению с отдельно выполняемой обработкой почвы и ручной посадкой, является то, что все работы на объекте можно завершить за один проход агрегата и саженцы всегда высаживаются в центре микроповышений в свежеобработанную почву. Это обеспечивает хорошую приживаемость. К плюсам механизированной посадки относится также и стабильное качество работ, поскольку при высадке саженцев лесопосадочная машина прижимает их с одинаковой силой. Кроме того, успешная приживаемость саженцев с ЗКС возможна при значительно более длительном периоде посадки в условиях, когда низкая влажность почвы не обеспечивает приживаемость посадочного материала с ОКС.

Заключение

Таким образом, наличие в машинном парке предприятия мультифункциональной машины для осуществления комплекса операций по ведению интенсивного лесного хозяйства позволит:

создать условия для выполнения работ в наиболее благоприятные сроки с учетом изменчивости климатических и производственных условий;

минимизировать затраты на перебазировки технологических машин при организации работ по поквартально-блочной схеме;

повысить энергоэффективность технологического процесса;

значительно снизить непроизводительные простои базовой манипуляторной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Азаренок В.А., Залесов С.В.* Экологизированные рубки леса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 97 с. [Azarenok V.A., Zalesov S.V. *Ecological Forest Cuttings*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2015. 97 p.].

2. *Бартенев И.М., Попов И.В.* Современное развитие конструкций лесопосадочных машин за рубежом // Лесотехн. журн. 2014. Т. 4, № 2(14). С. 203–216. [Bartenev I.M., Popov I.V. Modern Development of Designs of Tree Planting Machines Abroad. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 2(14), pp. 203–216]. DOI: [10.12737/4528](https://doi.org/10.12737/4528)

3. *Васильев А.С.* Выбор базовых технологий лесопромышленных производств для формирования новых объектов интеллектуальной собственности // Образование и наука в современных условиях. 2016. № 1(6). С. 256–257. [Vasil'yev A.S. The Choice

of Basic Technologies of Timber Industries to Form New Objects of Intellectual Property. *Obrazovaniye i nauka v sovremennykh usloviyakh*, 2016, no. 1(6), pp. 256–257].

4. Васильев А.С., Ивашиев М.В., Шукин П.О. Многофункциональное оборудование для выполнения широкого спектра работ на лесосеке // Научное и образовательное пространство: перспективы развития: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 24 апр. 2016 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. С. 272–274. Режим доступа: <https://interactive-plus.ru/e-articles/251/Action251-79319.pdf> (дата обращения: 08.02.20). [Vasil'yev A.S., Ivashnev M.V., Shchukin P.O. Multifunctional Equipment for Carrying out a Wide Range of Works at the Logging Site. *Scientific and Educational Space: Prospects for Development: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, April 24, 2016*. Cheboksary, TsNS «Interaktiv plus» Publ., 2016, pp. 272–274].

5. Герц Э.Ф., Теринов Н.Н. К вопросу об организации рубок с применением бензомоторных пил и мини-тракторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 86–94. [Gerts E.F., Terinov N.N. On the Issue of Thinning Schedule Using Gasoline Saws and Mini Skidders. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 86–94]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.2.86](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.86), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/1ed/86_94.pdf

6. Каштелян Т.В., Ермалицкий А.А., Юреня Е.Г. Совершенствование системы подрядных отношений в лесном комплексе Беларуси // Тр. БГТУ. № 7. Экономика и управление. 2014. № 7. С. 131–133. [Kashatelyan T.V., Ermalitskiy A.A., Yurenya E.G. Improvement of the System of Contractual Relations in the Forestry Complex of Belarus. *Trudy BGTY. Ekonomika i upravleniye* [Proceedings of BSTU. Economics and Management], 2014, no. 7, pp. 131–133].

7. Концепция интенсивного использования и воспроизводства лесов. СПб.: СПбНИИЛХ, 2015. 16 с. [*The Concept of Intensive Use and Regeneration of Forests*. Saint Petersburg, SPbNIILH Publ., 2015. 16 p.].

8. Кречетников Е.Г., Слезов М.А., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Обзор конструкций харвестеров для подготовительных работ при строительстве дорог // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы междунар. науч.-техн. конф. (г. Тюмень, 08 февр. 2016 г.) Тюмень: Тюмен. индустр. ун-т, 2016. С. 145–148. [Krechetnikov E.G., Slezov M.A., Kostyrchenko V.A., Madyarov T.M. Review of Structures Harvesters for Preparatory Works in Road Construction. *Ground Transport and Technological Systems and Facilities: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Tyumen, February 8, 2016*. Tyumen, TyuIU Publ., 2016, pp. 145–148].

9. Мельник М.А., Волкова Е.С. Природные опасности как реорганизующий фактор лесопользования в южной тайге Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 3, № 2. С. 245–249. [Melnik M.A., Volkova E.S. Natural Hazards as a Reorganizing Factor of Forest Management in the Southern Taiga of West Siberia. *Interekspo Geo-Sibir*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 245–249].

10. Рукомойников К.П. Выбор рациональной технологии и обоснование параметров поквартального освоения лесных участков: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. 296 с. [Rukomojnikov K.P. *Choosing a Rational Technology and Justification of Parameters of Quarterly Development of Forest Areas*: Monograph. Yoshkar-Ola, Volgatech Publ., 2016. 296 p.].

11. Теринов Н.Н., Герц Э.Ф. Выборочные рубки в насаждении с подпологовыми лесными культурами // Леса России и хозяйство в них. 2017. № 3(62). С. 19–26. [Terinov N.N., Gerts E.F. Selective Cuttings in the Forest Stand Including Forest Culture. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh*, 2017, no. 3(62), pp. 19–26].

12. Теринов Н.Н., Луганский Н.А. Уральский учебно-опытный лесхоз УГЛТУ – проблемы и перспективы // Леса России и хозяйство в них. 2016. № 2(57). С. 21–26. [Terinov N.N., Lugansky N.A. The Ural Educational-Research Forestry of USFEU – Problems and Prospects. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh*, 2016, no. 2(57), pp. 21–26].

13. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И. О потенциале гусеничных движителей лесных машин // Инж. вестн. Дона. 2014. № 1(28). Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2231> (дата обращения: 08.02.20). [Shegelman I.R., Skrypnik V.I. The Potential Drivers of Tracked Forestry Machines. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 1(28)].
14. Ersson B.T., Jundén L., Bergsten U., Servin M. Simulated Productivity of One- and Two-Armed Tree Planting Machines. *Silva Fennica*, vol. 47, no. 2, art. 958. DOI: [10.14214/sf.958](https://doi.org/10.14214/sf.958)
15. Hall P. Mechanical Site Preparation Using Excavators. *New Zealand Journal of Forestry*, 1995, vol. 40(2), pp. 31–35.
16. Hallongren H., Laine T., Rantala J., Saarinen V.-M., Strandström M., Hämäläinen J., Poikela A. Competitiveness of Mechanized Tree Planting in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 2, pp. 144–151. DOI: [10.1080/02827581.2014.881542](https://doi.org/10.1080/02827581.2014.881542)
17. Laffan M.D., Naughton P., Hetherington S., Rees S. Comparison of the Effects of Spot and Strip Cultivation on the Early Growth of *Eucalyptus nitens* and *Pinus radiata* in Tasmania. *Tasforests*, 2003, vol. 14, pp. 137–144.
18. Laine T., Rantala J. Mechanized Tree Planting with an Excavator-Mounted M-Planter Planting Device. *International Journal of Forest Engineering*, 2013, vol. 24, iss. 3, pp. 183–193. DOI: [10.1080/14942119.2013.844884](https://doi.org/10.1080/14942119.2013.844884)
19. Nieuwenhuis M., Egan D. An Evaluation and Comparison of Mechanised and Manual Tree Planting on Afforestation and Reforestation Sites in Ireland. *International Journal of Forest Engineering*, 2002, vol. 13, iss. 2, pp. 11–23. DOI: [10.1080/14942119.2002.10702459](https://doi.org/10.1080/14942119.2002.10702459)
20. Rantala J., Laine T. Productivity of the M-Planter Tree-Planting Device in Practice. *Silva Fennica*, 2010, no. 44, no. 5, pp. 859–869. DOI: [10.14214/sf.125](https://doi.org/10.14214/sf.125)

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MULTIFUNCTIONAL MACHINES FOR INTENSIVE FORESTRY

Eduard F. Gerts, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

Andrey V. Mekhrentsev, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-5378-2020](https://orcid.org/0000-0002-2186-0152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>

Vladimir V. Pobedinsky, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [G-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-6318-3447), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>

Nikolay N. Terinov, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

Alina F. Urazova, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: gerz.e@mail.ru, mekhrentsev@yandex.ru, n_n_terinov@mail.ru, ura-alina@mail.ru

Abstract. The method of intensification of forestry by means of integrated mechanization of forestry and logging operations is considered. It is proposed to use manipulator-type machines, such as harvesters, forwarders and excavators, as a technical basis. Improving the efficiency of manipulator-type machines can be achieved through using a set of optional interchangeable equipment. This will allow to create crops by planting seedlings with open and closed root systems, to carry out soil cultivation, seed sowing, thinning of young plants and to carry out pest control, mulching of skidding tracks after major work in the logging site, as well

as earthworks during the construction of forest roads. The use of optional interchangeable equipment transforms a manipulator-type machine into a multifunctional machine. It has been shown that the purchase of optional equipment for forestry and logging is a cost-effective investment even for a small amount of works. Intensive forestry is primarily based on the measures of mature and overmature stands cutting, forest tending, and reforestation. Several technological schemes with the use of the multifunctional machine for felling both in the harvester and feller buncher modes are offered. In the latter option, tree length bucking and branch pruning ensure the concentration of all logging residues at the upper depot and create favorable conditions for their processing into raw material for biofuel production and reduce woodwaste in cutting areas. An option of using small size equipment for hauling trees into the area of operation of a multifunctional machine with an installed harvester head is offered when performing selective felling using wide-strip technology of harvesting. Preliminary preparation of the cutting area with small sized equipment (harvesting of small-sized, dead and fallen trees) is proposed. This will significantly reduce the damage to plantation components and provide a greater degree of preservation of the natural environment during the main work of the multifunctional machine. Its use in the most favorable terms due to the work execution on a quarter-block scheme, reducing the number of downtime due to natural-production conditions and the number of relocations and, accordingly, increasing the number of machine hours, will minimize total costs of the range of forestry and harvesting works.

For citation: Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Pobedinsky V.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Improving the Efficiency of Multifunctional Machines for Intensive Forestry. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 138–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-138-149

Funding: The article is based on the results of work on the topic “Environmental Aspects of Sustainable Nature Management” (state registration No. FEUG-2020-0013).

Keywords: complex mechanization, multifunctional machines, interchangeable equipment, quarter-block organization of works.

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

Поступила 26.03.20 / Received on March 26, 2020



УДК 674.093

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-150-158

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДРОБНОСТИ СОРТИРОВКИ БРЕВЕН
ПО ДИАМЕТРУ****В.В. Огурцов, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [AAZ-7418-2020](https://orcid.org/0000-0002-8995-0496),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-8995-0496>**Е.В. Каргина, инж.;** *ResearcherID:* [AAZ-7109-2020](https://orcid.org/0000-0003-0158-8259),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0158-8259>**И.С. Матвеева, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID:* [AAZ-7422-2020](https://orcid.org/0000-0002-4032-5091),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-4032-5091>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e-mail: vogurtsov@mail.ru, ev_kargina@mail.ru, matveevais.26@mail.ru

Аннотация. Данная работа является завершающей в ряде исследований, посвященных проблеме сортировки бревен по толщине при формировании распиловочных партий с оптимальным подбором пиловочника по группам диаметров. Ранее получены математические модели, связывающие характеристики бревен и процессов их раскря с объемным выходом пиломатериалов и рентабельностью лесопильного предприятия. Разработаны алгоритмы и программы имитационных исследований процесса производства пиломатериалов с воспроизведением случайной изменчивости размеров и формы распиливаемых бревен, а также случайного их смещения относительно центра постава пил. В качестве критерия оптимальности применяется рентабельность лесопильного производства, в качестве конкурирующего показателя – объемный выход пиломатериалов. Дробность сортировки бревен по толщине используется как управляемая оптимизируемая переменная, а эллиптичность, кривизна и смещенность относительно центра постава пил учитываются как случайные мешающие факторы. Рассматривая бревно как набор коротких секций, нанизанных на изогнутую ось, имитировали процесс его распиловки (были взяты случайные характеристики формы и размера). В результате определены закономерности изменения эффективности лесопильного производства при варьировании толщины, кривизны, эллиптичности и смещения бревен относительно центра постава пил. Установлено, что при распиловке оптимальным поставом одновременное влияние случайных факторов формы бревна и точности его базирования ослабляет зависимость объемного выхода пиломатериалов от дробности сортировки по закону, который близок к геометрическому суммированию отдельных влияний. Факторы с большим влиянием практически поглощают факторы с меньшим. Доминирующим среди них является кривизна бревна. Для неоптимальных поставов при одновременном влиянии трех рассмотренных факторов объемный выход пиломатериалов практически не зависит от дробности сортировки бревен по толщине. При распиловке бревен с дефектами формы неоптимальными поставами на оборудовании с несовершенной системой базирования их сортировка по толщине как способ повышения объемного выхода пиломатериалов не имеет смысла. Случайное варьирование формы бревна и точности его центрирования, а также отклонение параметров поставов от оптимальных вызывает уменьшение оптимальной дробности подбора бревен по толщине с 20 до 30 мм. Причем, чем большее число характеристик формы и базирования бревна отклоняет-

ся от идеальных значений и чем больше эти отклонения, тем активнее оптимум дробности сортировки бревен по толщине смещается к 3 и более четным диаметрам. При подготовке пиловочного сырья к массовой распиловке с использованием современных технологий и оборудования с жесткими поставками бревна целесообразно сортировать по толщине через 2 четных диаметра. При случайном одновременном варьировании эллиптичности сечений бревен со средним значением 6 мм, их кривизны со средним значением 0,25 % и смещения относительно центра поставки пил со средним значением 10 мм оптимальной является сортировка пиловочного сырья через 3 четных диаметра.

Для цитирования: Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С. Оптимизация дробности сортировки бревен по диаметру // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 150–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-150-158

Ключевые слова: бревно, эллиптичность, кривизна, базирование, сортировка, дробность, распиловка, рентабельность.

Введение

На протяжении десятков лет в массовом крупно-поточном лесопилении нерешенной остается проблема формирования оптимальных распиловочных партий бревен [2, 9]. Ключевым вопросом здесь является подбор пиловочника по группам толщин [1, 3–8]. Ожидалось, что острота вопроса будет автоматически снята при переходе лесопиления на головное оборудование с автоматическим генерированием поставок (гибких поставок) [8, 10]. Однако этого не происходит [11–24], поскольку использование гибких поставок без сортировки бревен по диаметрам приводит к резкому увеличению одновременно вырабатываемых сечений. Это в свою очередь вызывает лавинообразное нарастание затрат на всех последующих этапах производственного процесса лесопильного предприятия. Поэтому нашей целью стало определение оптимальной дробности сортировки бревен по диаметрам в два этапа. В данной работе рассматриваются жесткие поставки, которые не предусматривают их автоматическую генерацию для бревна текущей распиловки, в дальнейшем будут рассмотрены гибкие поставки. В качестве критерия оптимизации используется рентабельность лесопильного предприятия, в качестве дублирующего критерия оптимизации – объемный выход пиломатериалов.

Ранее нами представлены математическая модель рентабельности лесопильного предприятия [3] и алгоритмы имитационных исследований процесса производства пиломатериалов с учетом случайных характеристик формы распиливаемого пиловочника [4]. Исследовано [9] влияние случайных характеристик формы пиловочника (эллиптичности и кривизны), а также самопроизвольного его смещения относительно оси поставки на объемный выход пиломатериалов и рентабельность их производства. Следует отметить, что в предыдущих работах влияние случайных характеристик бревен и процессов их раскрытия на эффективность лесопильного производства рассматривались авторами по отдельности. В данной работе исследуется совокупное влияние этих факторов.

Объекты и методы исследования

Для определения влияния дробности подбора бревен по толщине при формировании распиловочной партии на показатели работы лесопильного

предприятия применяется метод имитационного моделирования. Принимается, что эллиптичность, кривизна и точность базирования бревен и брусьев являются случайными характеристиками с нормальным законом распределения, а толщина бревна подчиняется закону равномерного распределения. Объем распиловочной партии составляет 1000 бревен.

Машинный эксперимент проводится на распиловочных партиях пиломатериала размерами 22 см / 5,5 м с использованием следующих поставок: 4 (25 – 150 – 25; 25 – 50/3 – 25 с теоретическим объемным выходом 60,21 %); 5 (25/2 – 100 – 25/2; 25 – 50/3 – 25 с объемным выходом 58,51 %); 6 (25/2 – 100 – 25/2; 25/3 – 50 – 25/3 с выходом 57,04 % при длине досок 1,5...5,4 м с градацией 0,3 м).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований при средней эллиптичности 6 мм, средней кривизне 0,25 % и средней амплитуде смещения 10 мм представлены в таблице и на рис. 1, 2.

Рентабельность производства и объемный выход

Амплитуда, мм	Рентабельность, %			Объемный выход, %		
	Постав 4	Постав 5	Постав 6	Постав 4	Постав 5	Постав 6
2,5	-4,8	-6,1	-8,9	55,63	54,88	53,29
5,0	7,8	6,3	3,3	55,56	54,82	53,28
10,0	15,2	13,7	10,4	55,34	54,70	53,16
15,0	17,5	16,6	13,1	55,05	54,72	53,17
20,0	18,7	18,4	14,7	54,81	54,80	53,27
25,0	19,2	19,6	15,9	54,56	54,90	53,38
30,0	19,5	20,6	16,7	54,29	55,00	53,44

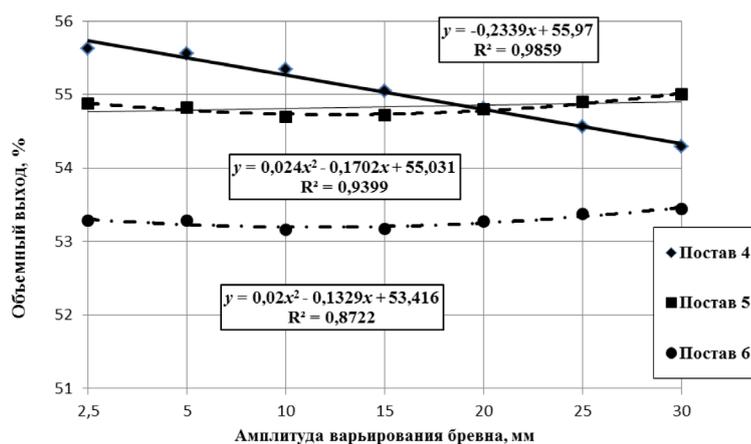


Рис. 1. Влияние точности подбора бревен по толщине в распиловочной партии на объемный выход пиломатериалов

Fig. 1. Influence of accuracy of logs selection by thickness in a sawing batch on the sawn timber volume output

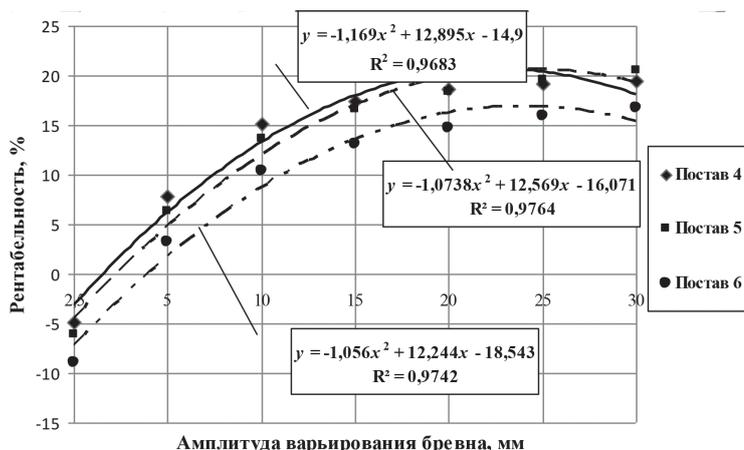


Рис. 2. Влияние точности подбора бревен по толщине в распиловочной партии на рентабельность лесопильного производства

Fig. 2. Influence of accuracy of logs selection by thickness in a sawing batch on the sawmill production profitability

Сравнение графиков, учитывающих только эллиптичность, только кривизну, только смещение, кривизну в паре с эллиптичностью [9] и одновременно все три фактора (рис. 1), показало, что при отдельном воздействии отрицательных факторов со средними значениями эллиптичности (6 мм), кривизны бревен (0,25 %), самопроизвольного поперечного смещения бревен (10 мм) зависимость выхода пиломатериалов от дробности подбора бревен по толщине снижается при переходе величины варьирования толщины от ± 5 к ± 20 мм для оптимального постава 4 соответственно на 0,10; 0,86; 0,88 % (угловые коэффициенты линейных моделей при отдельном влиянии эллиптичности, кривизны, смещения соответственно составляют: $-0,554$; $-0,360$; $-0,287$).

При одновременном воздействии этих факторов для оптимального постава 4 степень зависимости объемного выхода досок от точности подбора бревен по толщине снижается на 1,28 % (угловой коэффициент $-0,233$), т. е. наблюдается близкое к геометрическому суммирование отдельных влияний. Факторы с большим влиянием практически поглощают факторы с меньшим влиянием.

При неоптимальных поставках 5, 6 и одновременном влиянии трех факторов объемный выход пиломатериалов практически не зависит от дробности сортировки бревен по толщине.

Таким образом, при распиловке бревен с дефектами формы неоптимальными поставками на оборудовании с несовершенной системой базирования сортировка бревен по толщине как способ повышения объемного выхода пиломатериалов теряет смысл.

Как видно из рис. 2 и таблицы, зависимости эффективности производства пиломатериалов от точности подбора бревен по толщине имеют унимодальный характер. Причем характер этих зависимостей, так же как и зависимостей, полученных нами [9] при поочередном влиянии рассматриваемых случайных факторов, практически не зависит ни от поставов, ни от параметров формы пиловочника и точности его базирования. Однако более детальный анализ данных таблицы и работы [9] показывает, что случайное варь-

рование формы бревна и точности его центрирования, а также отклонение параметров поставов от оптимальных вызывают уменьшение оптимальной дробности сортировки пиловочника по диаметрам с 20 (2 четных диаметра) до 30 мм (3 четных диаметра). Причем, чем большее число характеристик формы бревна и его базирования отклоняется от идеальных значений и чем больше эти отклонения, тем активнее оптимум дробности сортировки бревен по толщине смещается к 3 и более четным диаметрам. Так, при использовании оптимального постава 4 для распиловки бревен идеальной формы и при абсолютной точности базирования переход от сортировки бревен по 2 четным диаметрам к сортировке по 3 четным диаметрам приводит к снижению рентабельности на 0,7 %, а этот же переход от дробности сортировки бревен по толщине от 2 к 3 четным диаметрам, но при случайном смещении бревен относительно центра постава пил со средним значением 10 мм, уже не снижает рентабельность на 0,7 %, а повышает ее на 0,4 %. При случайном варьировании эллиптичности бревен со средним значением 6 мм указанное уменьшение дробности сортировки понижает рентабельность на 0,1 %. При случайном варьировании кривизны бревен со средним значением 0,25 % указанное уменьшение дробности сортировки не влияет на рентабельность. При одновременном варьировании эллиптичности (6 мм) и кривизны (0,25 %) уменьшение точности сортировки бревен с ± 20 до ± 30 мм приводит к увеличению рентабельности на 0,7 %, а при одновременном варьировании эллиптичности (6 мм), кривизны (0,25 %) и смещения (10 мм) (см. таблицу) – на 0,8 %.

Таким образом, при использовании оптимальных поставов для распиловки бревен идеальной формы и абсолютной точности базирования оптимальной является сортировка пиловочного сырья через 2 четных диаметра (точность сортировки ± 20 мм); при случайном варьировании эллиптичности сечений бревен со средним значением 6 мм – также через 2 четных диаметра; при случайном варьировании кривизны бревен со средним значением 0,25 % альтернативно оптимальна сортировка бревен через 2 и 3 четных диаметра; при случайном смещении бревен относительно центра постава пил со средним значением 10 мм оптимальна сортировка пиловочного сырья через 3 четных диаметра; при случайном одновременном варьировании эллиптичности сечений бревен со средним значением 6 мм и кривизны бревен со средним значением 0,25 % – через 3 четных диаметра; при случайном одновременном варьировании эллиптичности сечений бревен со средним значением 6 мм, кривизны бревен со средним значением 0,25 % и смещения бревен относительно центра постава пил со средним значением 10 мм – через 3 четных диаметра.

Следовательно, при подготовке к распиловке на современном высокоточном оборудовании с жесткими поставами пиловочного сырья высокого качества его целесообразно сортировать по толщине через 2 четных диаметра. При формировании распиловочных партий бревен с существенными дефектами формы, при использовании неоптимальных поставов и оборудования с недостаточно высокой точностью центрирования следует подбирать бревна по толщине с позиций экономической эффективности через 3 и более четных диаметра.

Выводы

1. При распиловке бревен оптимальным поставом одновременное влияние случайных факторов формы бревна и точности его базирования ослабляет зависимость объемного выхода пиломатериалов от дробности сортировки бревен по закону, близкому к геометрическому суммированию отдельных влияний. Факторы с большим влиянием практически поглощают факторы с меньшим влиянием. Доминирующим фактором является кривизна бревна. Для неоптимальных поставов при одновременном влиянии 3 рассмотренных факторов объемный выход пиломатериалов практически не зависит от дробности сортировки бревен по толщине.

Таким образом, при распиловке бревен с дефектами формы неоптимальными поставами на оборудовании с несовершенной системой базирования сортировка бревен по толщине как способ повышения объемного выхода пиломатериалов не имеет смысла.

2. Случайное варьирование формы бревна и точности его центрирования, а также отклонение параметров поставов от оптимальных вызывают уменьшение оптимальной дробности подбора бревен по толщине с 20 до 30 мм. Причем, чем большее число характеристик формы бревна и его базирования отклоняется от идеальных значений и чем больше эти отклонения, тем активнее оптимум дробности сортировки бревен по толщине смещается к 3 и более четным диаметрам.

3. При подготовке пиловочного сырья к массовой распиловке с использованием современных технологий и оборудования с жесткими поставами его целесообразно сортировать по толщине через 2 четных диаметра.

4. При формировании распиловочных партий бревен с существенными дефектами формы, использовании неоптимальных поставов и оборудования с недостаточно высокой точностью центрирования подбирать бревна по толщине с позиций экономической эффективности следует через 3 и более четных диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Архипов И.В.* Математические модели и опыт реализации системы планирования раскроя лесосырья // Вестн. СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2014. № 3. С. 82–92. [Arkhipov I.V. Mathematical Model and Experience of Implementation of Wood Sawing Planning Software System. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Vestnik of Saint Petersburg University Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes], 2014, no. 3, pp. 82–92].

2. *Калитеевский Р.Е.* Лесопиление в XXI веке. Технология, оборудование, менеджмент. Изд. 2-е, испр. и доп. СПб.: ПрофиКС, 2008. 499 с. [Kaliteyevskiy R.E. *Sawmilling in the 21st Century. Technology, Equipment, Management*. Saint Petersburg, ProfiKS Publ., 2008. 499 p.].

3. *Каргина Е.В., Матвеева И.С., Огурцов В.В.* Теоретические основы расчета поставов для распиловки бревен с пороками формы // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28, № 1-2. С. 141–145. [Kargina E.V., Matveyeva I.S., Ogurtsov V.V. Theoretical Basis of Supply Calculation for Sawing of Logs with Form Defects. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2011, vol. 28, no. 1-2, pp. 141–145].

4. Каргина Е.В., Ридель Л.Н., Матвеева И.С., Огурцов В.В. Алгоритм имитационных исследований экономической эффективности лесопильных предприятий // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28, № 1-2. С. 146–153. [Kargina E.V., Ridel L.N., Matveyeva I.S., Ogurtsov V.V. Imitation Researches Algorithm of saw Mills Economical Efficiency. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2011, vol. 28, no. 1-2, pp. 146–153].

5. Корельская М.А. Особенности выбора схем раскроя пиловочного сырья в новых экономических условиях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-1. С. 220–224. [Korel'skaya M.A. Features of Choice of Sawing Patterns of Sawlogs in New Economic Conditions. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice], 2015, vol. 3, no. 5-1, pp. 220–224]. DOI: [10.12737/14492](https://doi.org/10.12737/14492)

6. Мецерьякова А.А., Желтоухова Н.А. Современные технологии лесопиления в России // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1. С. 404–407. [Meshcheryakova A.A., Zheltoukhova N.A. Modern Technologies of Sawmilling in Russia. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice], 2015, vol. 3, no. 2-1, pp. 404–407]. DOI: [10.12737/10186](https://doi.org/10.12737/10186)

7. Микрюкова Е.В., Пекменов В.М. Совершенствование раскроя бревен // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4. С. 319–322. [Mikryukova E.V., Pekmenov V.M. Improvement of Longitudinal Cutting of Logs. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 3-4, pp. 319–322]. DOI: [10.12737/4403](https://doi.org/10.12737/4403)

8. Новоселова И.В. Генерирование раскройных схем пиломатериалов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 2-1. С. 65–67. [Novoselova I.V. Generation of Lumber Cutting Schemes. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 2-1, pp. 65–67]. DOI: [10.12737/2969](https://doi.org/10.12737/2969)

9. 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.]

10. Ткаченко А.А. Компьютерное управление процессом раскроя в лесопильном цехе // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 5. С. 257–259. [Tkachenko A.A. Computer-Controlled Process of Sawing in the Sawmill. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice], 2018, vol. 6, no. 5, pp. 257–259].

11. Фергин В.Р. Развитие теории раскроя пиловочного сырья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 4. С. 107–117. [Fergin V.R. Development of the Sawing Process Theory. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 4, pp. 107–117]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.4.107](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.107), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f0d/107_117.pdf

12. Ширнин Ю.А., Рукомойников К.П., Виноградов В.П. Разработка способа продольной распиловки сортиментов и математической модели его реализации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 1. С. 77–84. [Shirnin Yu.A., Rukomoinikov K.P., Vinogradov V.P. Development of Assortments Length Cutting and Mathematical Models of its Realization. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2010, no. 1, pp. 77–84]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d0d/d0df8570193ec632aafe981034968e3d.pdf>

13. Blatner K.A., Keegan III C.E., Daniels J.M., Morgan T.A. Trends in Lumber Processing in the Western United States. Part III: Residue Recovered versus Lumber Produced. *Forest Products Journal*, 2012, no. 62, iss. 6, pp. 429–433. DOI: [10.13073/FPJ-D-12-00024.1](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00024.1)
14. Chang S.J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced. *Forest Products Journal*, 2009, vol. 59, iss. 11-12, pp. 56–59. DOI: [10.13073/0015-7473-59.11.56](https://doi.org/10.13073/0015-7473-59.11.56)
15. Héberta F., Grondinb F., Plaice J. Mathematical Modeling of Curve Sawing Techniques for Lumber Industry. *Applied Mathematical Modelling*, 2000, vol. 24, iss. 8-9, pp. 677–687. DOI: [10.1016/S0307-904X\(00\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(00)00009-3)
16. Hinostraza I., Pradenasa L., Parada V. Board Cutting from Logs: Optimal and Heuristic Approaches for the Problem of Packing Rectangles in a Circle. *International Journal of Production Economics*, 2013, vol. 145, iss. 2, pp. 541–546. DOI: [10.1016/j.ijpe.2013.04.047](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.047)
17. Ikami Y., Matsumura Y., Murata K., Tsuchikawa S. Effect of Crosscutting Crooked Sugi (*Cryptomeria japonica*) Logs on Sawing Yield and Quality of Sawn Lumber. *Forest Products Journal*, 2010, vol. 60, iss. 3, pp. 244–248. DOI: [10.13073/0015-7473-60.3.244](https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.3.244)
18. Koval V.S., Mazurchuk S.M. Optimization the Process of Sawing Lumber Taking into Account Dimension of Qualitative Characteristics. *Техніка та енергетика* [Machinery and Energetics], 2013, no. 185, part 2, pp. 137–142.
19. Lin W., Wang J., Wu J., DeVallance D. Log Sawing Practices and Lumber Recovery of Small Hardwood Sawmills in West Virginia. *Forest Products Journal*, 2011, no. 61, iss. 3, pp. 216–224. DOI: [10.13073/0015-7473-61.3.216](https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.3.216)
20. Montero R.S., Moya R. Reducing Warp and Checking in 4 by 4 Beams from Small-Diameter Tropical Species (*Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, and *Cordia alliodora*) Obtained by Turning the Pith Inside Out. *Forest Products Journal*, 2015, no. 65, iss. 5-6, pp. 285–291. DOI: [10.13073/FPJ-D-14-00089](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00089)
21. Murara Junior M.I., Rocha M.P., Trugilho P.F. Estimate of Pine Lumber Yield Using Two Sawing Methods. *FLORAM*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 556–563. DOI: [10.4322/loram.2013.037](https://doi.org/10.4322/loram.2013.037)
22. Petutschnigg A.J., Katz H. A Loglinear Model to Predict Lumber Quality Depending on Quality Parameters of Logs. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2005, vol. 63, pp. 111–112. DOI: [10.1007/s00107-004-0537-3](https://doi.org/10.1007/s00107-004-0537-3)
23. Trichkov N., Koynov D. Quantitative Yield in Sawing Thin Logs of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for Production of Dimensional Lumber without Defects. *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design*, 2018, no. 2, pp. 71–77.
24. Tumenjargal B., Ishiguri F., Takahashi Y., Nezu I., Baasan B., Chultem G., Aiso-Sanada H., Ohshima J., Yokota S. Bending Properties of Dimension Lumber Produced from Siberian Larch (*Larix sibirica*) in Mongolia. *Journal of Wood Science*, 2020, vol. 66, art. 17. DOI: [10.1186/s10086-020-01863-6](https://doi.org/10.1186/s10086-020-01863-6)

OPTIMIZATION OF LOG SORTING BY DIAMETER

Victor V. Ogurtsov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAZ-7418-2020](https://orcid.org/0000-0002-8995-0496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8995-0496>

Elena V. Kargina, Engineer; ResearcherID: [AAZ-7109-2020](https://orcid.org/0000-0003-0158-8259),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-8259>

Irina S. Matveeva, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAZ-7422-2020](https://orcid.org/0000-0002-4032-5091), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-5091>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety "Krasnoyarskiy rabochiy", 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; e-mail: vogurtsov@mail.ru, ev_kargina@mail.ru, matveevais.26@mail.ru

Abstract. This work is the final in the series of studies related to the issue of sorting logs by thickness while forming the sawing batches with optimal selection of sawlogs by diameter groups. In previous works, mathematical models linking the characteristics of logs and their cutting processes with the timber volume output and the sawmill profitability were obtained. Algorithms and programs for simulation studies of the sawn timber production process with reproduction of random variability of sizes and shapes of sawn logs, as well as their random displacement relative to the center of the sawing pattern were developed. Profitability of sawmill production was chosen as the criterion of optimality, the volume output of timber was used as a competing indicator. Fractional sorting of logs by thickness is used as a controllable optimizable variable, while ellipticity, curvature, and timber displacement from the center of the sawing pattern are treated as random interfering factors. Considering the log as a set of short sections threaded on a curved axis, we imitated its sawing process with random characteristics of shape and sizes. As a result, the change patterns of sawing production efficiency were determined while varying thickness, curvature, ellipticity and displacement of logs from the center of the sawing pattern. It was found that when sawing logs with an optimal sawing pattern, the simultaneous influence of random factors of log shape and accuracy of its location weakens the dependence of the timber volume output on the fractional sorting of logs according to the law close to the geometric summation of individual influences. Factors with large influence practically absorb factors with a smaller influence. The log curvature dominates among them. For suboptimal sawing patterns with the simultaneous influence of the three considered factors, the timber volume output is practically independent of the fractional sorting of logs by thickness. When sawing logs with shape defects by suboptimal sawing patterns on equipment with an imperfect basing system, sorting logs by thickness as a way to increase the volume output of sawn timber does not make sense. Random variation of log shape and accuracy of its centering, as well as the deviation of the parameters of sawing patterns from the optimal, causes a decrease in the optimal fractionality of selection of logs by thickness from 20 to 30 mm. Moreover, the greater the number of characteristics of log shape and its basing deviates from the ideal values and the greater these deviations, the more active the optimum fractional sorting of logs by thickness shifts to 3 or more even diameters. When preparing sawn material for mass sawing using modern technologies and equipment with rigid sawing patterns, it is advisable to sort logs by thickness through 2 even diameters. At random simultaneous variation of ellipticity of cross-sections of logs with an average value of 6 mm, their curvature with an average value of 0.25 % and displacement relative to the center of sawing pattern with an average value of 10 mm the optimum is sorting of sawn raw material through 3 even diameters.

For citation: Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Matveeva I.S. Optimization of Log Sorting by Diameter. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 150–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-150-158

Keywords: log, ellipticity, curvature, basing, sorting, fractionality, sawing, profitability.

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

Поступила 19.11.19 / Received on November 19, 2019

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

КОМПЛЕКСНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

В.К. Любов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

А.М. Владимиров², инж.; ResearcherID: [AAB-8889-2021](https://orcid.org/0000-0003-0469-1104)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0469-1104>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vk.lubov@mail.ru

²Акционерное общество «Архангельский ЦБК», ул. Мельникова д. 1, г. Новодвинск, Архангельская область, Россия, 164900; e-mail: vladimirovaleksandr23@gmail.com

Аннотация. В индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемого топлива биотопливом. Однако побочные продукты заготовки, обработки и переработки древесины ввиду их высокой влажности, низкой энергетической плотности и крайне неоднородного гранулометрического состава относятся к трудносжигаемым видам топлива. Перспективным направлением повышения энергетической плотности и транспортабельных показателей побочных продуктов лесопромышленного комплекса является их гранулирование. Сжигание гранулированного топлива в теплогенерирующих установках позволяет значительно повысить их энергетические и экологические показатели. Цель работы – экспериментальное и расчетное исследование энергетических и экологических показателей водогрейных котлов мощностью 4 МВт фирмы Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH при сжигании полученных из побочных продуктов деревообработки древесных гранул из сосны и ели. В ходе исследования определены составляющие теплового баланса котлов, эмиссии газообразных выбросов и твердых частиц. С использованием программного продукта трехмерного моделирования Ansys Fluent проведено численное моделирование термодинамических и аэродинамических процессов, происходящих в топочной камере котла. Оно в совокупности с промышленно-эксплуатационными испытаниями показало возможность снижения суммарной доли рециркуляции дымовых газов в топочные камеры котлоагрегатов до значений, не превышающих 0,45, при обеспечении допустимой температуры продуктов сгорания на выходе из камеры догорания и поддержании минимально низких эмиссий оксидов углерода и азота. При этом доля газов, подаваемых дымососами рециркуляции в надслоевую область топки, должна быть больше, чем доля подаваемых под наклонно-переталкивающие решетки котлов. Разработаны и внедрены рекомендации по комплексному повышению эффективности сжигания древесных гранул в топках водогрейных котлов мощностью 4 МВт. Первоочередными являются: использование воздуха, прошедшего по каналам охлаждения обмуровки, в качестве вторичного; снижение разрежения в топочных камерах до 30...70 Па; оптимизация соотношения первичного и вторичного воздуха, при этом доля первичного в общем расходе должна составлять 0,26–0,35. Внедрение разработанных рекомендаций позволило поднять КПД брутто котлов на 0,5...1,8 %, снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта на 15...20 % и обеспечить стабильно низкие эмиссии оксидов углерода, азота и сажевых частиц. При проектировании котлоагрегатов для сжигания гранулированного древесного топлива целесообразно размещать в топочной камере поверхности нагрева, включенные в циркуляционный контур котла, что увеличит эффективность работы и жизненный цикл котлоагрегата.

Для цитирования: Любов В.К., Владимиров А.М. Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 159–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

Ключевые слова: котел, гранулированное древесное топливо, вредные вещества, численное моделирование, потери тепла, коэффициент полезного действия.

Введение

Переход от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии является ключевой стратегией, направленной на сохранение климата, защиту окружающей среды, решение проблем с энергообеспечением и полностью соответствует положениям Парижского соглашения по сдерживанию климатических изменений, которое было принято консенсусом 12.12.2015 г. и подписано 22.04.2016 г. [16, 20, 22]. Современные проблемы энергетики могут быть решены только при рациональном использовании всех существующих источников энергии. Среди них биомасса как постоянно возобновляемый источник энергии занимает существенное место [1–3, 6, 8, 10, 23].

В России необходимость совершенствования систем энергоснабжения и повышения энергетической безопасности богатых лесными ресурсами регионов делает актуальной проблему расширения масштабов использования возобновляемых источников энергии и в первую очередь энергии биомассы. Однако побочные продукты лесопромышленного комплекса относятся к трудносжигаемым видам топлива. Перспективным направлением облагораживания отходов переработки биомассы является их гранулирование, которое позволяет в 2,5–3,5 раза увеличить их удельную теплоту сгорания, в 3–4 раза – их транспортабельные характеристики [3, 14]. По этому пути пошли страны Скандинавии, Австрия, Германия, Италия, Канада, США и другие, где гранулы используются как в промышленных котельных и на тепловых электрических станциях, так и в быту. С начала XXI в. данное направление интенсивно развивается и в нашей стране, имеющей огромные сырьевые ресурсы. Оценка объемов органических отходов в лесо- и агропромышленном комплексе, проведенная Институтом энергетической стратегии, позволила установить, что гранулы и брикеты – универсальные виды твердого биотоплива для всех регионов России.

Для уменьшения техногенного влияния объектов энергетики на окружающую среду и повышения эффективности их работы в Архангельской области в 2010–2012 гг. были смонтированы и введены в эксплуатацию восемь котельных, оборудованных полностью автоматизированными теплогенерирующими установками, работающими на древесных гранулах. Данное обстоятельство позволило сформировать внутренний рынок обогороженного биотоплива [3].

Цель работы – экспериментальное и расчетное исследование энергетических и экологических показателей водогрейных котлов мощностью 4 МВт фирмы Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH при сжигании полученных из побочных продуктов деревообработки древесных гранул из сосны и ели.

Объекты и методы исследования

Исследовательские работы проводились на теплогенерирующих установках самой мощной из смонтированных котельных, расположенной в пос. Катунь.

нино Архангельской области. Запуск в работу (в 2011 г.) котельной, имеющей 3 водогрейных котлоагрегата мощностью по 4 МВт фирмы Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH, позволил вывести из эксплуатации энергоисточник, работавший на высокосернистом мазуте.

Установленные котлы одинаковы по конструкции и номенклатуре основного и вспомогательного оборудования, рассчитаны на выработку горячей воды давлением до 0,6 МПа и температурой до 110 °С, имеют 2 контура, при этом в первом с помощью насоса производительностью 135 м³/ч циркулирует химочищенная вода. Система водоподготовки включает установки: GENO-mat FE-Z – для удаления железа и марганца; GENO-mat duo WF – для умягчения воды; GENODOS – для дозирования реагентов. Расчетный температурный режим для рабочей среды первого контура составляет 100/80 °С. Нагрев сетевой воды второго контура (70/95 °С) осуществляется с помощью 2 пластинчатых теплообменников. На обратной линии теплосети установлены (параллельно) 3 циркуляционных насоса и 1 подпиточный. В топочных камерах котлоагрегатов реализована 3-ступенчатая схема сжигания топлива, для дополнительного снижения выбросов оксидов азота, продления жизненного цикла колосников и обмуровки камеры оборудованы 2 системами рециркуляции продуктов сгорания. Изменением расхода рециркулирующих газов обеспечивается поддержание оптимальной температуры в топочной камере. Все тягодутьевые установки котлоагрегатов имеют частотное регулирование производительности.

Котлоагрегаты оборудованы 2-ходовыми дымогарными газоводяными теплообменниками, расположенными горизонтально, вдоль продольной оси, непосредственно над камерами догорания. Продукты сгорания, совершив два хода в каналах топочной камеры, поступают в поворотную камеру, в которой разворачиваются и проходят по дымогарным трубам первого хода (194 шт.). В поворотной камере у задней стены котла они разворачиваются на 180° и проходят по дымогарным трубам второго хода (168 шт.). Суммарная поверхность нагрева котлоагрегата составляет 245 м².

Котлы оборудованы необходимыми приборами безопасности, обеспечивающими защиту от закипания рабочей среды, и предохранительными клапанами. Система автоматического регулирования поддерживает требуемое соотношение топливо/воздух, заданный уровень разрежения в топке и концентрации кислорода в продуктах сгорания, температуру воды на выходе из котла в соответствии с установленной. Каждый котел оборудован комплексным щитом управления с автоматическими предохранителями и автоматикой управления, обеспечивающим визуализацию параметров работы всех трактов. Система автоматики предусматривает 5 ступеней регулирования нагрузки котла и предполагает ее постепенное изменение от 1-й к 5-й и наоборот.

Из газоводяного теплообменника котла дымовые газы направляются в мультициклон, где очищаются от твердых частиц, поступающих в сборный контейнер. Для очистки от золовых частиц внутренних поверхностей дымогарных труб котлоагрегат оборудован системой пневмообдудки. Эта система состоит из баллона со сжатым воздухом, из которого воздух поступает к группе клапанов, управляемых электронным модулем. Каждый котел оснащен 44 клапанами, открывающимися по очереди автоматически и обеспечивающими очистку определенной группы труб поверхности нагрева.

Балансовые опыты, предполагающие выполнение замеров при установившемся тепловом состоянии котла и определение всех составляющих теплового баланса, проводились в соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленно-эксплуатационным испытаниям второй категории сложности [13]. При исследовании состава продуктов сгорания использовался газоанализатор Testo-350 XL. Теплотехнический анализ топлива проводился с помощью установок лаборатории термического анализа и калориметра ИКА С 2000 basic Version 2 с жидкостным криотермостатом, исследование гранулометрического состава топлива и очаговых остатков – на анализаторах AS 200 Control и BC 1C-15-01. Механическая прочность и истираемость гранулированного топлива определялись в соответствии со стандартом EN 15210-1 с использованием портативного тестера NHP 100 фирмы Holmen, поля скоростей и расход дымовых газов – прецизионным прибором Testo-435 с пневмометрической трубкой и микроанометром. Результаты исследования поля скоростей требуются для определения концентрации твердых частиц в дымовых газах. При этом применялся метод внешней фильтрации [11, 13], для реализации которого использовались аспирационная установка ОП-442 ТЦ, пылезаборная трубка, фильтродержатель АФА и др. Температуры наружных поверхностей основного и вспомогательного оборудования котлов измерялись с помощью пирометра. Расход топлива вычислялся по уравнению обратного теплового баланса. Экспериментальные данные обрабатывались многомодульным программно-методическим комплексом [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Комплексное исследование эффективности работы водогрейных котлов проводилось в два этапа. В ходе первого был выполнен анализ энергетической и экологической эффективности реализованного проекта. По его результатам были разработаны рекомендации, подтвержденные, в том числе, данными численного моделирования. После частичного внедрения разработанных рекомендаций была осуществлена вторая часть исследований (второй этап), позволяющая определить эффективность реализации этих рекомендаций и создать режимные карты.

На первом этапе было проведено 10 опытов при различных режимах работы котлоагрегатов. При этом в топку котлов подавались древесные гранулы (диаметром 8 мм, ЗАО «Лесозавод 25»), качественные показатели которых соответствовали требованиям международных и российских стандартов (см. таблицу). При производстве гранул использовалась древесина ели (опилки – 80 %, рубленая щепа – 20 %). Механическая прочность гранул имела довольно высокие значения ($DU = 98,47\%$), средняя кажущаяся плотность составляла $1,21\text{ т/м}^3$, насыпная – $0,67\text{ т/м}^3$.

Балансовые опыты проводились в диапазоне нагрузок от 42 до 90 % от номинальной, при этом температура воды на входе в котлы изменялась от $58,2$ до $60,0\text{ }^\circ\text{C}$, что позволяло обеспечивать достаточно глубокое охлаждение дымовых газов (см. таблицу). Диапазон возможного изменения нагрузки котлов был ограничен потребностями в тепловой энергии объектов пос. Катунино. Полный расход древесных гранул в исследованном диапазоне нагрузок на котлах № 2, 3 составлял $0,405\dots 0,831\text{ т/ч}$.

Основные показатели работы котлов при сжигании древесных гранул

Показатель	Обозначение, размерность	Котел № 2		Котел № 3	
		Опыт 2	Опыт 5	Опыт 1	Опыт 2
Теплопроизводительность	Q , МВт	2,93	3,65	3,25	2,97
Рабочее давление воды на выходе	$P_{в}$, МПа	0,33	0,33	0,35	0,35
Температура воды на выходе	$t_{вых}$, °С	73,1	77,0	73,8	72,7
Влажность гранул	W_r , %	5,82		6,83	
Зольность гранул	A_r , %	0,64		0,62	
Выход летучих веществ	V^{daf} , %	84,97		84,64	
Низшая теплота сгорания	$Q_{r,2}$, МДж/кг	17,46		17,23	
Доля вторичного воздуха	$r_{вт}$, %	65,6	71,9	70,6	68,6
Разрежение в топке	S_p , Па	106	53	100	110
Соппротивление котла	ΔS_k , Па	484	787	430	390
Температура уходящих газов	J	169,0	188,4	165,0	162,0
Избыток воздуха в уходящих газах	a	1,50	1,45	1,83	1,56
Потери тепла:					
с уходящими газами	q_2 , %	7,23	8,12	8,49	7,11
с химнедожогом	q_3 , %	0,02	0,02	0,01	0,00
с мехнедожогом	q_4 , %	0,18	0,18	0,17	0,16
в окружающую среду	q_5 , %	1,50	1,21	1,35	1,48
КПД брутто котла	$\eta_{бр}$, %	89,70	90,45	89,97	91,23
Полный расход биотоплива	B , т/ч	0,666	0,831	0,752	0,681
Теплонапряжение объема топки	q_v , кВт/м ³	198,67	248,26	221,62	200,63
Эмиссия:					
NO _x	NO _x , мг/МДж	71,2	80,1	113,9	82,5
СО	СО, мг/МДж	15,3	16,2	5,1	4,1
сажевых частиц	Э _с , мг/МДж	4,72	5,31	5,02	4,68

Анализ результатов балансовых опытов показал, что конструкция котлоагрегатов и систем автоматического регулирования режимов их работы обеспечивают высокую полноту выгорания монооксида углерода даже при повышенных коэффициентах избытка воздуха в топочных камерах. Концентрация угарного газа составляла 9...270 мг/м³ (при $K_{O_2} = 6$ %), а потери тепла с химическим недожогом топлива изменялись в диапазоне 0...0,16 %. КПД брутто: $\eta_{ка} = 88,17...91,23$ % – для котлоагрегата № 3; 89,00...91,06 % – для № 2.

Суммарная доля рециркуляции дымовых газов в топочную камеру имела очень большие значения: 0,640–0,660 – для котла № 2, 0,500–0,520 – для котла № 3. При этом доля газов, подаваемых дымососами рециркуляции в надслесовую область топки, особенно у котлоагрегата № 2, была выше (0,285–0,464), чем под наклонно-переталкивающую решетку (0,228–0,193). Учитывая, что температура дымовых газов, забираемых дымососами, составляла 122...183 °С, их ввод вызывал значительное снижение температурного уровня в топочных камерах и их балластирование избыточным кислородом и продуктами полного горения. Температура обмуровки топочных камер не превышала

701 °С, температура продуктов сгорания на выходе из камеры догорания котла № 3 составляла 825...870 °С, у котла № 2 – 872...896 °С, что существенно ниже допустимой.

Суммарное сопротивление котлоагрегата с газодынным теплообменником изменялось в диапазоне: 300...787 Па – для котла № 2, 130...430 Па – для котла № 3. Более высокое сопротивление газового тракта котла № 2 объясняется большими нагрузкой и долей рециркуляции продуктов сгорания.

Изучение гранулометрического состава летучей золы, оставшейся в золоуловителях, показало, что она имеет высокую степень полидисперсности ($n = 0,66–0,681$) и относится к тонкодисперсным материалам ($b = 0,115–0,084$) [13]. В ней преобладает фракция с размером частиц менее 45 мкм, на которую приходится более 72 % (по массе) для котла № 3 и более 63 % для котла № 2.

Отбор запыленного потока проводился при изокинетических условиях [11], при этом использовались данные предварительно проведенных тарировок. Выполненные исследования позволили определить степень очистки дымовых газов при их прохождении через золоуловитель и систему отбора газов в линии рециркуляции. Максимальное суммарное значение степени очистки продуктов сгорания получено для котла № 3 – 79,84 %, для котла № 2 этот показатель составил 79,45 %.

На основании исследования распределения горючих веществ по фракциям в летучей золе установлено, что максимальное содержание этих веществ имеют частицы размером 500 мкм и более (рис. 1, *a*). Однако их массовая доля в летучей золе мала, поэтому определяющее влияние на величину механического недожога топлива оказывает содержание горючих веществ в частицах менее 45 мкм (рис. 1, *b*).

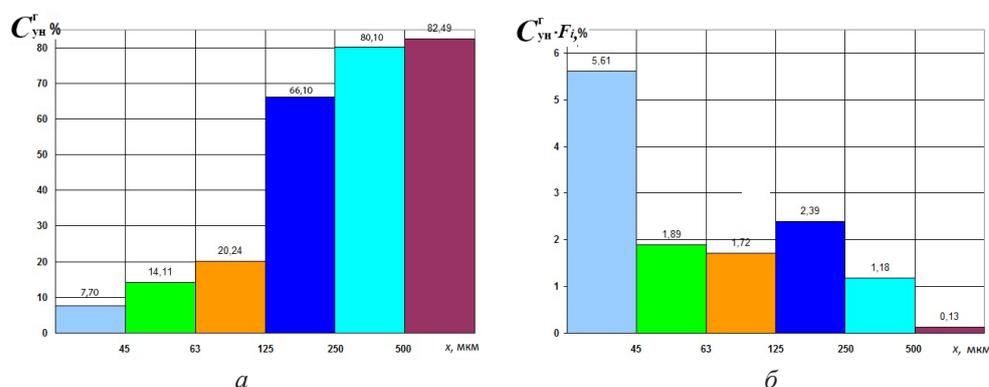


Рис. 1. Содержание горючих веществ в летучей золе котла № 3: *a* – по фракциям; *b* – с учетом массовых долей различных фракций, F_i

Fig. 1. The content of combustible substances in fly ash of the boiler No. 3: *a* – by fractions; *b* – taking into account the mass fractions of various size fractions, F_i

Анализ условий тепловой работы котлов показал, что потери тепла с уходящими газами составляют 5,94...8,49 %. Однако имеется резерв для их уменьшения за счет дополнительной настройки системы автоматики, снижения коэффициента избытка воздуха и доли рециркуляции газов в топочные камеры. Потери тепла с механической неполнотой сгорания составили 0,16...0,18 %, что существенно ниже допустимой.

с физической теплотой шлака – $q_6 \leq 0,02$ %. Низкий уровень потерь с механической неполнотой сгорания объясняется наличием системы позонного распределения воздуха, ступенчатой схемой подачи окислителя, повышенной сепарационной способностью топочной камеры и низкой зольностью древесных гранул. Данные факторы обеспечили высокую полноту выгорания углеродной основы топлива ($C_{\text{шл}}^r = 12,00 \dots 13,71$ %, $C_{\text{ун}}^r = 11,28 \dots 11,96$ %). Конструкция наклонной переталкивающей решетки, а также системы охлаждения ее рамы создает условия для отсутствия шлаковых наростов и надежной работы установки шлакоудаления. Шлак имеет полифракционный мелкодисперсный гранулометрический состав.

Для определения потерь тепла в окружающую среду была разработана уточненная методика, базирующаяся на применении относительного метода, дополненного тепловизионной съемкой [5]. Экспериментальные исследования показали, что потери тепла в окружающую среду при номинальной производительности водогрейного котла не превышают 1,1 %, что значительно меньше, чем по российским нормам [12]. Низкие значения данной потери (см. таблицу) определяются умеренными габаритными показателями котла, высоким качеством обмуровочных и теплоизоляционных материалов, а также наличием охлаждаемых каналов. Организация полезного использования тепла, полученного воздухом в каналах охлаждения обмуровки, позволила повысить КПД брутто данных котлов не менее чем на 1,3 %.

Удельный расход условного топлива на выработку 1 ГДж для котлов № 2, 3 составил 37,37...38,67 кг/ГДж, эмиссия вредных веществ – $\mathcal{E}_{\text{CO}} = 4,1 \dots 77,5$ мг/МДж и $\mathcal{E}_{\text{NOx}} = 71,2 \dots 114,0$ мг/МДж.

Для разработки максимально обоснованных рекомендаций по дальнейшему комплексному повышению эффективности работы исследованных водогрейных котлов было выполнено численное моделирование с использованием программного продукта трехмерного моделирования Ansys Fluent. На начальном этапе была построена трехмерная модель топочной камеры котла (рис. 2) с помощью встроенного модуля Ansys Icem Cfd. Учитывая специфическую геометрию топки, было принято решение выполнить построение неструктурированной тетраэдральной сетки с количеством расчетных элементов 8 млн.

Анализ качества созданной сетки показал ее приемлемость для задач данного уровня. В целях упрощения расчета было принято решение отказаться от построения подколосниковой области топочной камеры, а также снизить

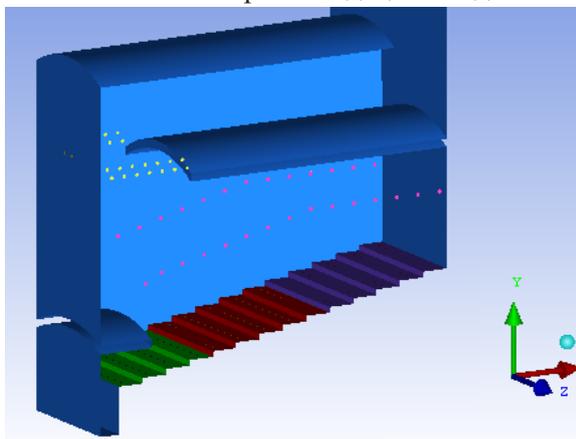


Рис. 2. Трехмерная геометрия топки котла с разделением наклонно-переталкивающей решетки по зонам (третья зона выделена зеленым цветом)

Fig. 2. Three-dimensional geometry of the boiler furnace with division of the reciprocating grate into zones (the third zone is highlighted in green)

число межколосниковых зазоров в несколько раз, соответственно увеличив их размеры в заданных пропорциях. Данное упрощение не вызывает появления существенных погрешностей [19, 24].

Все топочные процессы (аэродинамика, воспламенение, выгорание, тепломассообмен, химические реакции) рассмотрены в их взаимосвязи. Принимается, что газовая среда состоит из диоксида углерода, молекулярного азота, водяных паров, кислорода и летучих веществ. Расчет траекторий движения твердых частиц биотоплива был выполнен в лагранжевой постановке [18, 25]. Для дисперсной фазы описывались тепло- и массообмен, определялись траектории движения частиц. Влияние турбулентности потока на движение топливных частиц учитывалось с использованием Realizable k-ε модели.

Расчет твердой фазы биотоплива производился при помощи Discrete Phase Model, при этом гранулометрический состав топлива учитывался по уравнению Розина–Раммлера:

$$R = 100 \exp(-bx^n),$$

где R – полный остаток на сите с размером ячейки x ; b – коэффициент, характеризующий тонкость гранулометрического состава; n – коэффициент полидисперсности.

Определяющие коэффициенты для данного уравнения были найдены ситовым методом [3, 13]. Принималось, что топливные частицы имеют сферическую форму и состоят из древесного кокса и зольного остатка. В расчете учитывались следующие стадии термической подготовки и горения этих частиц: прогрев, испарение влаги, воспламенение и горение летучих веществ, выгорание коксового остатка. В топке топливная частица подвергается термообработке за счет радиационно-конвективного теплообмена.

При моделировании лучистого теплообмена в топочной камере применялась модель Discrete Ordinates [19, 25]. При расчете процесса образования оксидов азота учитывались все известные механизмы образования термических, «быстрых» и топливных оксидов, а также процессы, протекающие с участием N_2O и восстановлением оксида азота на поверхности коксовых частиц [3].

В граничных условиях на входе задавались расходы первичного и вторичного воздуха, рециркулирующих газов, а также их состав. При проведении моделирования учитывалось, что наибольшая доля топлива выгорает во второй зоне, наименьшая – в зоне догорания коксового остатка (зона 3).

Для повышения точности результатов решения изменялась схема дискретизации конвективных членов основных уравнений. На первом этапе была выбрана схема дискретизации первого порядка (First Order Upwind), которая обеспечила быструю сходимость итерационного процесса, но недостаточную точность, на втором этапе – схема дискретизации второго порядка (Second Order Upwind) с использованием алгоритма связывания полей скорости и давления SIMPLE [17–19, 25].

Результаты моделирования показали, что в топке водогрейного котла поддерживается стабильное горение древесных гранул. Основной факел локализован выше промежуточного свода, над соплами вторичного воздуха (рис. 3). Компоновка сопел вторичного воздуха обеспечивает формирование двух вихревых потоков, занимающих большую часть поперечного сечения (рис. 3, б). Над соплами вторичного воздуха, в зоне вихревых потоков, температурный уровень

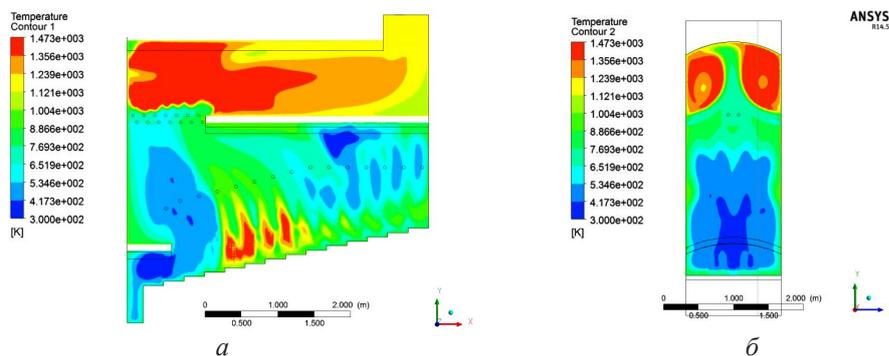


Рис. 3. Поля температур (К): в продольном (*a*) и в поперечном (*б*) сечении топки на расстоянии 1 м от задней стенки

Fig. 3. Temperature fields (K): in the longitudinal (*a*) and cross (*b*) sections of the furnace at a distance of 1 m from the rear wall

имеет максимальные значения ($\sim 1200^\circ\text{C}$). Наличие вихревых зон подтверждается результатами расчета концентраций летучих веществ (рис. 4, *a*), углекислого газа (рис. 4, *б*) и аэродинамикой движения топливных частиц (рис. 5).

Температура продуктов сгорания на выходе из камеры догорания котла составила 848°C , что является допустимым и хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в ходе промышленно-эксплуатационных испытаний. Концентрация монооксида углерода имеет минимальные значения. Численное моделирование показало, что наиболее активное горение биотоплива на наклонно-переталкивающей решетке происходит над ее центральной частью (рис. 3, *a*), где температура составляет около 1200°C . Полученные результаты полностью согласуются с расчетными значениями концентраций углекислого газа (рис. 4, *б*).

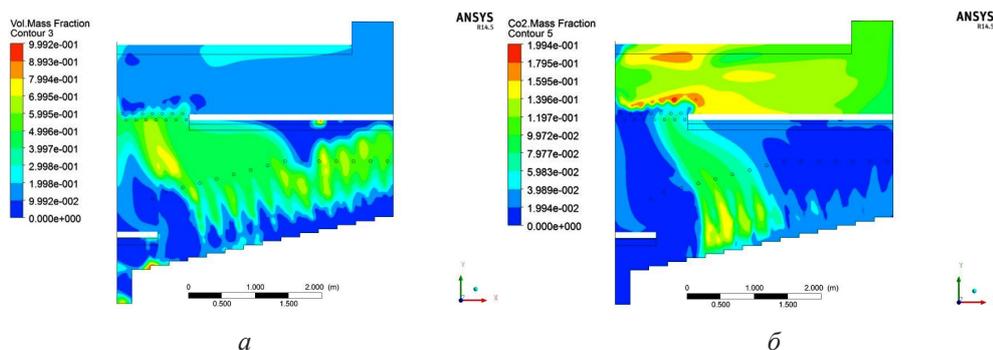


Рис. 4. Расчетные концентрации (моль/м³) летучих веществ (*a*) и диоксида углерода (*б*)

Fig. 4. Calculated concentrations (mol/m³) volatile substances (*a*) and carbon dioxide (*b*)

При работе котла в диапазоне нагрузок 45...100 % от номинальной обеспечивается высокая полнота выгорания горючих компонентов топлива. Топочный процесс имеет устойчивый характер и гарантирует высокий уровень выгорания монооксида углерода при низкой генерации оксидов азота.

Аэродинамика факела (рис. 5) в области подвода вторичного воздуха, а также над промежуточным сводом благодаря арочному типу потолка

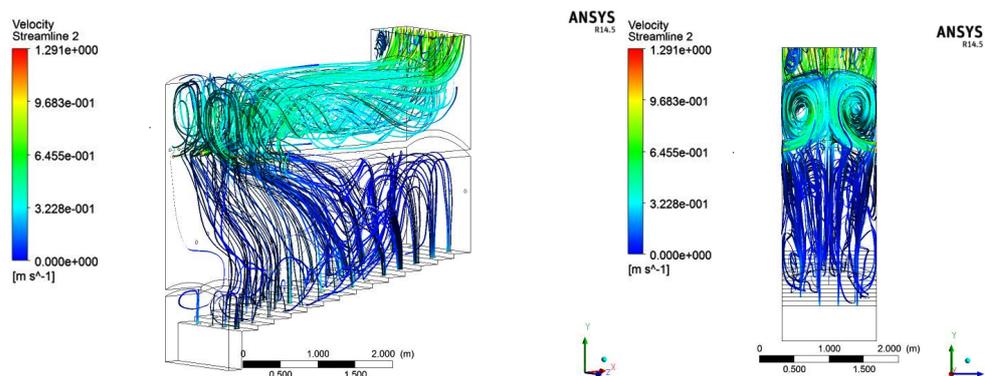


Рис. 5. Траектории движения топливных частиц (м/с)

Fig. 5. Trajectories of fuel particles, m/s

топки и встречному расположению цилиндрических сопел характеризуется зоной завихрения потока, где происходит интенсивное догорание летучих компонентов, не выгоревших в надслоевой области топки ввиду малой доли первичного воздуха.

Как следует из результатов расчетов и сопоставления численных исследований с экспериментальными данными, выбранная модель горения может быть использована при изучении работы котлоагрегатов со слоевым сжиганием твердого топлива различного состава.

Численное моделирование и промышленно-эксплуатационные испытания показали возможность снижения суммарной доли рециркуляции дымовых газов в топочную камеру до 0,40 (котел № 3) и 0,45 (котел № 2) при обеспечении допустимой температуры продуктов сгорания на выходе из камеры догорания (до 950 °С) и поддержании минимально низких эмиссий оксидов углерода 2...23 и азота 42...57 мг/МДж. При этом доля газов, подаваемых дымососами рециркуляции в надслоевую область топки, должна быть больше, чем доля подаваемых под наклонно-переталкивающие решетки котлов.

Исходя из энергетических показателей работы данных водогрейных котлов, было бы целесообразно снизить суммарную долю рециркуляции дымовых газов в топочную камеру до 0,30. Однако при нагрузках близких к номинальной температура продуктов сгорания на выходе из камеры догорания превысит допустимые значения, поэтому при проектировании котлоагрегатов для сжигания гранулированного биотоплива целесообразно размещать в топочной камере поверхности нагрева, охлаждаемые рабочей средой, что позволит повысить эффективность и жизненный цикл работы котлов при оптимальной доле рециркуляции продуктов сгорания.

Промышленно-эксплуатационные испытания водогрейных котлов показали, что снижение рециркуляции дымовых газов и разрежения в топочной камере, а также оптимизация распределения первичного и вторичного воздуха позволили поднять КПД брутто котлов на 0,5...1,8 %, снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта на 15...20 % и обеспечить стабильно низкие эмиссии оксидов углерода, азота и твердых частиц.

Определение количества выбросов сажевых частиц проводилось в соответствии с [4, 7, 9, 11], при этом эмиссия частиц размером 2,5 мкм и менее с использованием коэффициентов пересчета, предложенных в [15, 21], изменялась в диапазоне 0,52...0,75 г/ГДж.

Заключение

Комплексное исследование эффективности работы водогрейных котлов в диапазоне нагрузок 42...90 % от номинальной (4 МВт) показало, что они обеспечивают достаточно экономичное сжигание древесных гранул. Результаты промышленно-эксплуатационных испытаний и данные численного моделирования, выполненного с помощью программного пакета Ansys Fluent, позволили разработать следующие рекомендации по дальнейшему повышению энергоэкологических показателей работы данных котлоагрегатов:

снизить суммарную долю рециркулирующих дымовых газов до значений, не превышающих 0,45;

использовать воздух, прошедший по каналам охлаждения обмуровки, в качестве вторичного;

уменьшить разрежение в топочных камерах до 30...70 Па;

оптимизировать соотношение первичного и вторичного воздуха, при этом доля первичного в общем расходе должна составлять 0,26–0,35.

Внедрение разработанных рекомендаций позволило поднять КПД брутто котлов на 0,5...1,8 %, снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта на 15...20 % и обеспечить стабильно низкие эмиссии оксидов углерода, азота и сажевых частиц.

При проектировании котлоагрегатов для сжигания гранулированного древесного топлива целесообразно размещать в топочной камере поверхности нагрева, включенные в циркуляционный контур котла, что повысит эффективность и жизненный цикл его работы и обеспечит оптимальную долю рециркуляции продуктов сгорания с энергоэкологических позиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 года // *Вопр. экономики*. 2014. № 8. С. 70–91. [Bashmakov I.A., Myshak A.D. Costs and Benefits of the Transition to Low-Carbon Economy in Russia: Perspectives up to 2050. *Voprosy Ekonomiki*, 2014, no. 8, pp. 70–91]. DOI: [10.32609/0042-8736-2014-8-70-91](https://doi.org/10.32609/0042-8736-2014-8-70-91)

2. Кокорин А. Новые факторы и этапы глобальной и российской климатической политики // *Экон. политика*. 2016. Т. 11, № 1. С. 157–176. [Kokorin A. New Factors and Stages of the Global and Russian Climate Policy. *Ekonomicheskaya Politika*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 157–176]. DOI: [10.18288/1994-5124-2016-1-10](https://doi.org/10.18288/1994-5124-2016-1-10)

3. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с. [Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Efficiency Improvement of the Biofuels Energy Use*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 533 p.]

4. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Исследование эффективности работы водогрейного котла при сжигании биотоплив // *Биотехнологии в хими-*

ко-лесном комплексе: материалы междунар. науч. конф., Архангельск, 11–12 сент. 2014 г. Архангельск: САФУ, 2014. С. 201–205. [Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Biofuel Combustion Efficiency of the Hot-Water Boiler. *Biotechnology in the Chemical and Forest Complex: Proceedings of the International Scientific Conference, Arkhangelsk, September 11–12, 2014*. Arkhangelsk, NArFu Publ., 2014, pp. 201–205].

5. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Определение потерь тепла в окружающую среду на основе комплексного исследования эффективности работы котлов // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 36–41. [Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Determining Heat Loss into the Environment Based on Comprehensive Investigation of Boiler Performance Characteristics. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2015, no. 8, pp. 36–41]. DOI: [10.1134/S004060151506004X](https://doi.org/10.1134/S004060151506004X)

6. Макаров И.А., Чен Х., Пальцев С.В. Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // Вопр. экономики. 2018. № 4. С. 76–94. [Makarov I.A., Chen H., Paltsev S.V. Impacts of Paris Agreement on Russian Economy. *Voprosy Ekonomiki*, 2018, no. 4, pp. 76–94]. DOI: [10.32609/0042-8736-2018-4-76-94](https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-76-94)

7. Методика измерения массовой концентрации сажи в промышленных выбросах и в воздухе рабочей зоны: утв. ОАО НИИ «Техуглерод». Ярославль, 2005. 10 с. [*Measurement Procedure of the Mass Concentration of Soot in Industrial Emissions and in the Air of the Working Area*. ОАО Scientific Research Institute “TEKhUGLEROD”, 2005. 10 p.].

8. Мохирев А.П., Безрукых Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инж. вестн. Дона. 2015. № 2, ч. 2. С. 81. [Mokhirev A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, no. 2, part 2, art. 81].

9. Попова Е.И., Попов А.Н., Любов В.К., Варакин Е.А. Сжигание твердых топлив в водогрейном котле Firematic 60 // Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. 1-й Рос. науч.-практ. конф., Якутск, 22–25 сент. 2015 г. Якутск: СВФУ, 2015. С. 464–473. [Popova E.I., Popov A.N., Lyubov V.K., Varakin E.A. Solid Fuels Combustion in the Hot Water Boiler Firematic 60. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference “Nature Management in the Arctic: Current State and Development Potential”, Yakutsk, September 22–25, 2015*. Yakutsk, NEFU Publ., 2015, pp. 464–473].

10. Сафонов Г.В., Стеценко А.В., Дорина А.Л., Авалиани С.Л., Сафонова Ю.А., Беседовская Д.С. Стратегия низкоуглеродного развития России. Возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии М.: ТЕИС, 2016. 48 с. [Safonov G.V., Stetsenko A.V., Dorina A.L., Avaliani S.L., Safonova Yu.L., Besedovskaya D.S. *The Strategy of Low-Carbon Development of Russia. Opportunities and Benefits of Substitution of Fossil Fuels with Green Energy Sources*. Moscow, TEIS Publ., 2016. 48 p.].

11. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 270 с. [*Collection of Methods for Determining the Concentrations of Pollutants in Industrial Emissions*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 270 p.].

12. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / РАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с. [*Thermal Calculation of Boilers (Standard Method)*. Saint Petersburg, ОАО Unified Energy System of Russia, 1998. 257 p.].

13. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с. [Trem-

bovlya V.I., Finger E.D., Avdeyeva A.A. *Heating Tests of Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p.].

14. Arshadi M., Gref R., Geladi P., Dahlqvist S.-A., Lestander T. The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality. *Fuel Processing Technology*, 2008, vol. 89, iss. 12, pp. 1442–1447. DOI: [10.1016/j.fuproc.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001)

15. Borchsenius H., Borgnes D. *Black Carbon Emissions from the District Heating Sector in the Barents Region*. NORSK ENERGI. Ministry of Environment of Norway. Project Name: RUS-11/0060. Norway, 2013. 56 p.

16. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. *EU-27. Biofuels Annual Report No. NL3034*. The Hague, USDA Foreign Agricultural Service, 2013. 34 p.

17. Gera D., Mathur M.P., Freeman M.C., Robinson A. Effect of Large Aspect Ratio of Biomass Particles on Carbon Burnout in a Utility Boiler. *Energy & Fuels*, 2002, vol. 16, iss. 6, pp. 1523–1532. DOI: [10.1021/ef0200931](https://doi.org/10.1021/ef0200931)

18. Kruggel-Emden H., Wirtz S., Scherer V. An Experimental Investigation of Mixing of Wood Pellets on a Forward Acting Grate in Discontinuous Operation. *Powder Technology*, 2013, vol. 233, pp. 261–277. DOI: [10.1016/j.powtec.2012.08.029](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.08.029)

19. Kurz D., Schnell U., Scheffknecht G. CFD Simulation of Wood Chip Combustion on a Grate Using an Euler-Euler Approach. *Combustion Theory and Modelling*, 2012, vol. 16, iss. 2, pp. 251–273. DOI: [10.1080/13647830.2011.610903](https://doi.org/10.1080/13647830.2011.610903)

20. Magdziarz A., Wilk M., Straka R. Combustion Process of Torrefied Wood Biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, pp. 1339–1349. DOI: [10.1007/s10973-016-5731-0](https://doi.org/10.1007/s10973-016-5731-0)

21. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.-M., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X.-Y. Recommendations for Reporting “Black Carbon” Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, iss. 16, pp. 8365–8379. DOI: [10.5194/acp-13-8365-2013](https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013)

22. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., Santana R.M.C. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, pp. 148–153. DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.122](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122)

23. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on Renewable Sources: Prospects for the World and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, iss. 6, pp. 433–440. DOI: [10.1134/S101933161606006X](https://doi.org/10.1134/S101933161606006X)

24. Scharler R., Obernberger I. Numerical Modelling of Biomass Grate Furnaces. *Industrial Furnaces and Boilers: Proceedings of the 5th European Conference, April 11–14, 2000, Porto, Portugal*. Porto, 2000. 17 p.

25. Simsek E., Brosch B., Wirtz S., Scherer V., Krüll F. Numerical Simulation of Grate Firing Systems Using a Coupled CFD/Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology*, 2009, vol. 193, iss. 3, pp. 266–273. DOI: [10.1016/j.powtec.2009.03.011](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.011)

COMPLEX EFFICIENCY OF USING WOOD PELLETS IN POWER PLANTS

Victor K. Lyubov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

Aleksandr M. Vladimirov², Engineer; ResearcherID: [AAB-8889-2021](https://orcid.org/0000-0003-0469-1104),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0469-1104>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vk.lubov@mail.ru

²Arkhangelsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk region, 164900, Russian Federation; e-mail: vladimirovaleksandr23@gmail.com

Abstract. In advanced countries, the dramatic impact of greenhouse gases on the global climate is reduced by replacing fossil fuels with biofuels. This method is being actively encouraged. However, by-products of logging, processing and conversion of wood are classified as difficult to burn fuels due to their high moisture content, low energy density and extremely heterogeneous granulometric composition. A promising direction to increase the energy density and transportability of the timber industry by-products is their granulation. Wood pellet fuel burning in heat-generating plants results in significant increase in their energy and environmental performance. The purpose of the paper is an experimental and calculation study of the energy and environmental performance of 4 MW hot water boilers produced by Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH in the process of burning pine and spruce wood pellets obtained from by-products woodworking. When performing studies, the components of the boiler's heat balance, gas release, and particulate emissions were determined. Numerical modeling of thermochemical and aerodynamic processes taking place in the boiler combustion chamber was carried out by using the Ansys Fluent three-dimensional simulation software. Together with industrial-operational tests it showed the possibility to reduce the total share of flue gas recirculation into combustion chambers of boiler units to values not exceeding 0.45, in providing an acceptable temperature of combustion products at the combustion chamber outlet and maintaining minimum emissions of carbon and nitrogen monoxides. At the same time, the share of gases fed by recirculation smoke exhausters to the over-bed area of the burner should have higher values than under the reciprocating grates of boilers. Guidelines for comprehensive improvement of wood pellet combustion efficiency in combustion chamber of 4 MW hot water boilers have been developed and implemented. The priorities are: using the air passed through the cooling channels of the setting as secondary air; reducing the rarefaction in the combustion chambers to 30–70 Pa; optimizing the ratio of primary and secondary air, herewith, the share of primary air in the total flow should be 0.26–0.35. Implementation of the developed guidelines allowed to increase the boiler gross efficiency by 0.5–1.8 %, to reduce the aerodynamic resistance of the gas path by 15–20 % and to ensure consistently low emissions of carbon and nitrogen monoxides and soot particles. When designing boiler units for burning wood pellet fuel it is advisable to place heating surfaces in the combustion chamber, included in the circulation circuit of the boiler. This will increase the efficiency and life cycle of the boiler unit.

For citation: Lyubov V.K., Vladimirov A.M. Complex Efficiency of Using Wood Pellets in Power Plants. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 159–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

Keywords: boiler, wood pellet fuel, harmful substances, numerical modeling, heat losses, efficiency.

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

Поступила 25.10.19 / Received on October 25, 2019



УДК 502.55

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-173-179

STUDYING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF A POLYLACTIDE MELT MIXED WITH WOOD FILLER

Gul'naz A. Sabirova, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABE-3992-2020](https://orcid.org/0000-0002-5867-6850),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5867-6850>

Ruslan R. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Nour R. Galyavetdinov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-8681-2016](https://orcid.org/0000-0003-4360-7112), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>

Aigul R. Shaikhutdinova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAC-6718-2020](https://orcid.org/0000-0001-8570-4872), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8570-4872>

Ruslan Z. Khayrullin, Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [B-4051-2014](https://orcid.org/0000-0002-4214-012X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4214-012X>

Kazan National Research Technological University, ul. Karla Marksa, 68, Kazan, 420215, Russian Federation; e-mail: TalipovaTTT@mail.ru, cfaby@mail.ru, nour777@mail.ru, aigulsha@mail.ru, khayrullinz@gmail.com

Abstract. Composite materials based on wood filler are promising materials that are actively conquering the market. This is due to the advantages of using these materials in various fields: weather resistance and environmental compatibility, easy machining and possibility of recycling. Furthermore, it is sustainable use of wastes of timber sawing and furniture and woodworking industries, as well as low-grade wood. Wood powder is also known to be one of the components of consumables used in additive 3D printing technologies. Over the last decade, the commercial use of 3D printers has increased rapidly due to the fact that it allows creating prototype objects of complex shape based on a computer model. Experimental studies were carried out to determine the tensile strength and rheological properties of a composite made of polylactide 4043D, untreated wood powder brand 140 and wood powder thermally modified at 200 and 240 °C. The composite is intended for creation of three-dimensional objects by extrusion using a 3D printer. It was found that with an increase in the amount of filler in the composite, the tensile strength decreases. Also, samples with thermally modified filler show an increase in tensile strength in comparison with samples with untreated filler. Prototypes of 3D threads with different composition were obtained, during the study of which the melt flow index was examined. It was found that with increasing temperature of wood filler treatment the melt flow index increases. With a lower content of wood powder in the melt composition, there is a 2-fold increase in the melt flow index. The knowing of the rheological properties of the resulting compositions will allow achieving maximum performance and reduction of energy and production costs.

For citation: Sabirova G.A., Safin R.R., Galyavetdinov N.R., Shaikhutdinova A.R., Khayrullin R.Z. Studying the Rheological Properties of a Polylactide Melt Mixed with Wood Filler. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 173–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-173-179

Funding: The reported study was funded by RFBR, project number 19-33-90249.

Keywords: polylactide, biodegradable polymers, wood filler, thermal modification, 3D thread, rheological properties, melt flow index.

Introduction

In recent decades, traditional hydrocarbon polymers have become the most commonly used materials in almost all areas of modern life owing to their high resistance to various external influences, low cost, reliability and a huge variety of properties. However, low degradability of polymers has become a real problem for such sectors as packaging, consumer goods, biomedicine, etc. For this reason, many countries have focused on products based on biodegradable materials like polylactic acid (PLA), polyhydroxybutyrate (PHB) and starch [10, 13, 15, 21].

Among biodegradable polymers, polylactide is the most widely used in the above areas. PLA is a partially crystalline biodegradable polymer with high mechanical properties, which is obtained from renewable sources, such as cane, corn and other plant materials. The decomposition time of PLA in natural environmental conditions is from 6 months to 2 years, as opposed to 500–1000 years for conventional synthetic polymers like polyethylene [1, 2, 7, 9].

PLA as a consumable is widely used in 3D printers that use Fused Deposition Modeling (FDM) technology. The thread is melted and fed through a special nozzle to the working surface of the 3D printer. As a result of building a 3D model with melted thermoplastics, a completely ready-to-use object that is not supposed to be used for a long time is created [3, 4].

However, due to the relatively high cost of equipment for the PLA production, the price for the biopolymer is sufficiently high. This is one of the reasons holding back the widespread introduction of polylactide as a replacement for conventional polymers. [14, 16].

The solution to this problem is the development and production of new composite mixtures and materials with the addition of filler, for instance, woodworking waste.

Due to the fact that global logging volumes have reached a value close to the growth rate of wood, the problem of maximum use of wood raw materials and above all processing wastes is also becoming more and more acute. Soft wastes in the form of sawdust and wood powder is processed in conditions of large-scale production with high energy intensity. Therefore, the development of inexpensive zero waste technology for wood waste recycling is an urgent issue [20].

Wood powder is a light organic filler of plant origin. As a material of local collection and production, wood powder is a cost-effective production waste. This is primarily due to the availability of sufficient amounts of both wood powder and wood waste of sawmilling and woodworking production. It is possible to obtain from them the necessary amount of powder with additional introduction of the grinding stage into the process. Its low cost and sufficiently high thixotropic properties are ideal for use as a filler for many materials [5, 8].

One of the ways to improve the properties of wood is its preliminary thermal treatment. This wood particle processing method involves the removal of hemicellulose from the material, which leads to the service life extension of products [12, 19].

The application of the proposed method of using wood powder will provide an environmental effect, which includes the release of areas previously used for its storage

and the exclusion of the powder dispersion in the areas adjacent to the enterprise, both industrial and residential. The use of thermal modification of powder will give it such properties as durability, increased hardness and absolute environmental safety.

The research purpose is to create the samples of 3D threads and study the tensile strength of composites and the rheological properties of melts.

Research objects and methods

Studies on the tensile strength determination were carried out in order to identify the optimal quantitative ratio of composite material (CM) components. Tensile strength is one of the most important characteristics of CM, which determines its maximum tensile strength at critical loads [17].

The test method was performed in accordance with GOST R 56785–2015 “Polymer Composites. Test Method for Tensile Properties of Flat Specimens” and involved stretching the CM sample with a constant rate of loading or deformation until the moment of rupture.

Five batches of samples were prepared. Samples contained polylactide 4043D and wood filler brand 140, thermally modified at 200 °C and 240 °C, as well as untreated filler, which was dried at a temperature of 130 °C. The moisture content of wood powder was less than 1 %, since the formation of steam caused the formation of microbubbles and voids in the material [18].

Samples in the form of a rectangular cross-section strip 250 mm long, 15 mm wide and 2 mm thick were used for testing. The JLTTC LDS-5L breaking machine was used as a testing machine.

The main technological characteristic of polymers is the melt flow index (MFI). Initially, samples of 3D threads were made using the Rondol Microlab Twin Screw extruder.

The obtained samples of 3D threads (fig. 1) were used to evaluate the rheological properties of melts of thermoplastic polymer materials.

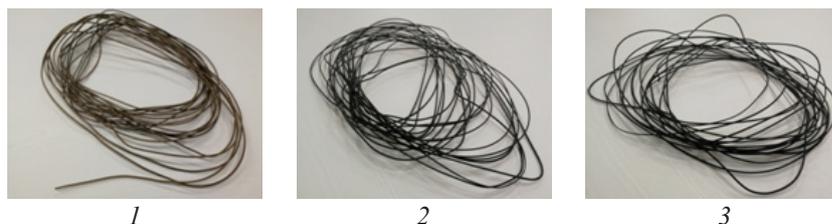


Fig. 1. Samples of 3D threads: 1 – untreated filler (dried at 130 °C); 2 – filler thermally modified at 200 °C; 3 – filler thermally modified at 240 °C

The determination of MFI of thermoplastics was carried out in accordance with GOST 11645–73 “Plastics. Determination of Flow Index of Thermoplastics Melt by Extrusion Plastometer” using the extrusion plastometer GT 7100 MIB.

The cut threads were placed in the device preheated to 190 °C for 15 min. After holding the samples under a pressure of 5 kg/s for 5 min, the material was allowed to flow. To measure MFI, pieces of extruded material were selected, sequentially cut off every 30 s. After cooling, each obtained segment was weighed with an error of not more than 0.001 g. The number of segments was at least three. The mass of

the segment was determined as the arithmetic average of the weighing results of all segments.

MFI was calculated for each parallel measurement using the following equation:

$$MFI_{(T,P)} = \frac{tm}{\tau},$$

where T – test temperature, K; P – load, N; t – standard time, s; m – average mass of the extruded segments, g; τ – time interval between 2 cut-off segments, s.

Research results and discussion

According to fig. 2, it can be concluded that the tensile strength of the composites gradually decreases with an increase in the mass content of the wood filler (WF), which is explained by the weakening of the bonds between wood particles and binder. However, the tensile strength of the composite with thermally modified filler was higher than that of the samples with untreated filler. Thus, based on the results presented in fig. 2, it can be concluded that the loosening of composites occurs due to the formation of voids, which subsequently reduce the tensile strength, since cracks can easily spread through the areas containing inter-fiber voids [6, 11].

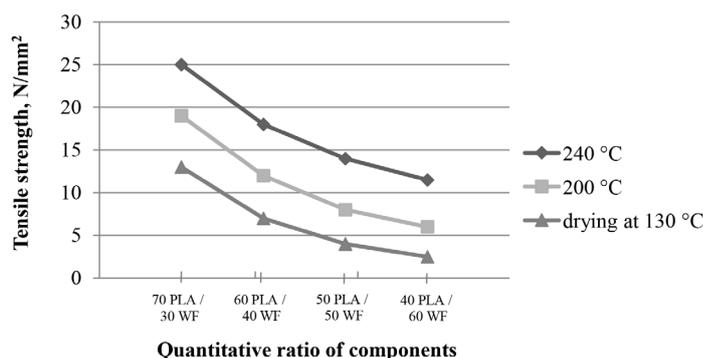


Fig. 2. Dependence of the tensile strength on the quantitative ratio of composite components

Therefore, the inclusion of wood filler in the composite by more than 50 % of the composite weight significantly reduces the tensile strength of the polymer matrix. However, to reduce the cost of the composite material, it is necessary to reduce the

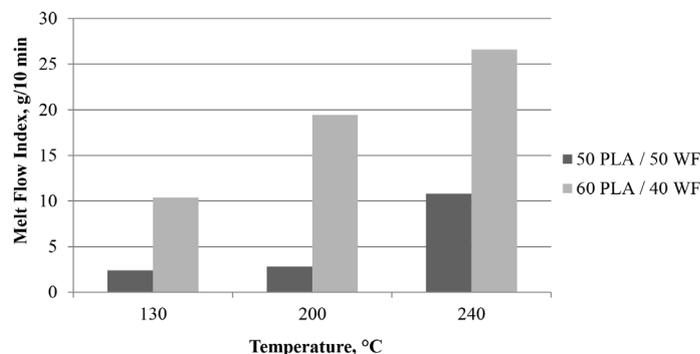


Fig. 3. Dependence of MFI on the temperature of the filler treatment

amount of polymer used. For this purpose, samples with 50 and 60 % PLA content were considered in further studies.

The results allow concluding that with an increase in the temperature of wood filler treatment, MFI increases (fig. 3). Moreover, the content of wood powder in the composition of the composite material affects the MFI value: an increase in MFI is observed with a decrease in the filler amount.

Conclusion

In the course of the study, we found the patterns presented below.

Tensile strength depends on the mass content of wood filler. With an increase in the amount of wood powder, the tensile strength of composites decreases. Since the preliminary thermal modification gives the wood such a property as increased strength, it was found that an increase in the tensile strength of the samples was observed with an increase in the temperature of the filler processing.

As the polymer content and the processing temperature of the wood filler increased, the melt flow rate increased. Thus, the extrusion rate of the melt from the extruder nozzle increased, which increased the productivity of the equipment.

REFERENCES

1. Касьянов Г.И. Биоразрушаемая упаковка для пищевых продуктов // Вестн. науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1, № 1. С. 112–119 [Kasyanov G.I. Biodegradable Food Packaging. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of the North-West Russia], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 112–119].
2. Левченко Е.В., Чернышева Н.Л. Производство биоразлагаемого полимера полилактида // Вестн. молодеж. науки. 2016. № 4(6). С. 1–5. [Levchenko E.V., Chernysheva N.L. Production of biodegradable Polymer Polylactide. *Vestnik molodezhnoy nauki* [Journal of Youth Science], 2016, no. 4(6), pp. 1–5].
3. Лысыч М.Н., Белинченко Р.А., Шкильный А.А. Технологии 3D печати // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. № 4-3(9-3). С. 215–219. [Lysych M.N., Belinchenko R.A., Shkil'nyy A.A. Technologies 3D Printing. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, no. 4-3(9-3), pp. 215–219]. DOI: [10.12737/6147](https://doi.org/10.12737/6147)
4. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D печати // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 6. С. 26–30. [Lysych M.N., Shabanov M.L., Kachurin A.A. Review Modern Technologies 3D Printing. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high technologies], 2015, no. 6, pp. 26–30].
5. Черкасова Н.Г., Стрижун В.В. Влияние древесной пыли на качество композиционных строительных материалов // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. XXXV, № 1-2. С. 106–110. [Cherkasova N.G., Strikun V.V. Influence of Wood Dust on Quality Composite Construction Materials. *Hvoynye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2017, vol. 35, no. 1-2, pp. 106–110].
6. Ayrlimis N., Kariž M., Kitek Kuzman M. Effect of Wood Flour Content on Surface Properties of 3D Printed Materials Produced from Wood Flour/PLA Filament. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2019, vol. 24, iss. 7, pp. 659–666. DOI: [10.1080/1023666X.2019.1651547](https://doi.org/10.1080/1023666X.2019.1651547)
7. Ayrlimis N., Kaymakci A., Ozdemir F. Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Polypropylene Composites Filled with Walnut Shell Flour. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, vol. 19, iss. 3, pp. 908–914. DOI: [10.1016/j.jiec.2012.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.11.006)

8. Butylina S., Martikka O., Timo K. Comparison of Water Absorption and Mechanical Properties of Wood-Plastic Composites Made from Polypropylene and Polylactic Acid. *Wood Material Science & Engineering*, 2010, vol. 5(3-4), pp. 220–228. DOI: [10.1080/17480272.2010.532233](https://doi.org/10.1080/17480272.2010.532233)
9. Hammiche D., Boukerrou A., Azzeddine B., Guermazi, N., Budtova T. Characterization of Polylactic Acid Green Composites and Its Biodegradation in a Bacterial Environment. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2019, vol. 24, iss. 3, pp. 236–244. DOI: [10.1080/1023666X.2019.1567083](https://doi.org/10.1080/1023666X.2019.1567083)
10. Hizioglu S., Zarate S. Mechanical Properties and Surface Characteristics of Colombian Wood Composites. *Journal of Composite Materials*, 2007, vol. 41, iss. 18, pp. 2225–2234. DOI: [10.1177/0021998307075432](https://doi.org/10.1177/0021998307075432)
11. Kariz M., Sernek M., Obućina M., Kitek Kuzman M. Effect of Wood Content in FDM Filament on Properties of 3D Printed Parts. *Materials Today Communications*, 2018, vol. 14, pp. 135–140. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016)
12. Khasanshin R.R., Safin R.R., Razumov E.Y. High Temperature Treatment of Birch Plywood in the Sparse Environment for the Creation of a Waterproof Construction Veneer. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1541–1546. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.07.108](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.108)
13. Li Y., Shimizu H. Toughening of Polylactide by Melt Blending with a Biodegradable Poly(ether)urethane Elastomer. *Macromolecular Bioscience*, 2007, vol. 7, iss. 7, pp. 921–928. DOI: [10.1002/mabi.200700027](https://doi.org/10.1002/mabi.200700027)
14. Mandal D.K., Bhunia H., Bajpai P.K. Thermal Degradation Kinetics of PP/PLA Nanocomposite Blends. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2019, vol. 32, iss. 12, pp. 1714–1730. DOI: [10.1177/0892705718805130](https://doi.org/10.1177/0892705718805130)
15. Moetazedian A., Gleadall A., Han X., Silberschmidt V.V. Effect of Environment on Mechanical Properties of 3D Printed Polylactide for Biomedical Applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, vol. 102, art. 103510. DOI: [10.1016/j.jmbbm.2019.103510](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103510)
16. Murphy W.L., Kohn D.H., Mooney D.J. Growth of Continuous Bonelike Mineral within Porous Poly(lactide-co-glycolide) Scaffolds *in vitro*. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2000, vol. 50, iss. 1, pp. 50–58. DOI: [10.1002/\(sici\)1097-4636\(200004\)50:1<50::aid-jbm8>3.0.co;2-f](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4636(200004)50:1<50::aid-jbm8>3.0.co;2-f)
17. Qiang T., Yu D., Gao H., Wang Y. Polylactide-Based Wood Plastic Composites Toughened with SBS. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2012, vol. 51, iss. 2, pp. 193–198. DOI: [10.1080/03602559.2011.618518](https://doi.org/10.1080/03602559.2011.618518)
18. Qiang T., Yu D., Wang Y., Gao H. Polylactide-Based Wood Plastic Composites Modified with Linear Low Density Polyethylene. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2010, vol. 52, iss. 2, pp. 149–156. DOI: [10.1080/03602559.2012.734359](https://doi.org/10.1080/03602559.2012.734359)
19. Razumov E.Y., Safin R.R., Barcik S., Kvietková M., Romelevich K.R. Studies on Mechanical Properties of Composite Materials Based on Thermo Modified Timber. *Drvna industrija*, 2013, vol. 64, no. 1, pp. 3–8. DOI: [10.5552/drind.2013.1206](https://doi.org/10.5552/drind.2013.1206)
20. Vančo M., Mazáň A., Barcik S., Rajko L., Koleda P., Vyhňáliková Z., Safin R.R. Impact of Selected Technological, Technical, and Material Factors on the Quality of Machined Surface at Face Milling of Thermally Modified Pine Wood. *BioResources*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 5140–5154. DOI: [10.15376/biores.12.3.5140-5154](https://doi.org/10.15376/biores.12.3.5140-5154)
21. Vert M., Santos I.D., Ponsart S., Alauzet N., Morgat J.-L., Coudane J., Garreau H. Degradable Polymers in a Living Environment: Where Do You End Up? *Polymer International*, 2002, vol. 51, iss. 10, pp. 840–844. DOI: [10.1002/pi.903](https://doi.org/10.1002/pi.903)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЛАВА ПОЛИЛАКТИДА В СМЕСИ С ДРЕВЕСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Г.А. Сабирова, аспирант; ResearcherID: [ABE-3992-2020](https://orcid.org/0000-0002-5867-6850),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5867-6850>

Р.Р. Сафин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Н.Р. Галяветдинов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [N-8681-2016](https://orcid.org/0000-0003-4360-7112),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>

А.Р. Шайхутдинова, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAC-6718-2020](https://orcid.org/0000-0001-8570-4872),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8570-4872>

Р.З. Хайруллин, канд. биол. наук, доц.; *ResearcherID*: [B-4051-2014](https://orcid.org/0000-0002-4214-012X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4214-012X>

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420215; e-mail: TalipovaTTT@mail.ru, cfaby@mail.ru, nour777@mail.ru, aigulsha@mail.ru, khayrullinz@gmail.com

Аннотация. Композиционные материалы на основе древесного наполнителя, являясь перспективными, активно завоевывают рынок. Это связано с преимуществами применения данных материалов в различных областях: стойкость к атмосферным воздействиям и экологичность, легкость механической обработки и возможность утилизации отходов. Кроме того, это и рациональное использование низкосортной древесины, а также отходов лесопиления, мебельной и деревообрабатывающей промышленности. Известно применение древесной муки в качестве одного из компонентов в аддитивных технологиях 3D-печати. За последнее десятилетие коммерческое использование 3D-принтеров возросло благодаря тому, что они позволяют создавать объекты-прототипы сложной формы на основе компьютерной модели. Проведены экспериментальные исследования по определению предела прочности на разрыв и реологических свойств композита из полилактида 4043D и термически обработанной при температуре 200 и 240 °С и необработанной древесной муки марки 140, предназначенного для создания трехмерных объектов методом экструзии с помощью 3D-принтера. Установлено, что с увеличением количества наполнителя в композите уменьшается предел прочности при растяжении, а также что по сравнению с образцами из необработанного наполнителя у образцов из термически модифицированного наполнителя наблюдается возрастание предела прочности. Получены опытные образцы различных по составу 3D-нитей, для которых был исследован показатель текучести расплава. Показано, что с ростом температуры обработки древесного наполнителя этот показатель повышается. При меньшем содержании древесной муки в составе расплава отмечается его увеличение в 2 раза. Знание реологических свойств получаемых композиций позволит достигнуть максимальной производительности, снизить энергозатраты и себестоимость готовой продукции.

Для цитирования: Sabirova G.A., Safin R.R., Galyavetdinov N.R., Shaikhutdinova A.R., Khayrullin R.Z. Studying the Rheological Properties of a Polylactide Melt Mixed with Wood Filler // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 173–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-173-179

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90249.

Ключевые слова: полилактид, биodeградируемые полимеры, древесный наполнитель, термическая модификация, 3D-нить, реологические свойства, показатель текучести расплава.

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

Поступила 10.02.20 / Received on February 10, 2020

УДК 676.085.2;544.77.023.523

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-180-191

ОСОБЕННОСТИ СОЛЮБИЛИЗИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ АМФИФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ОБЕССМОЛИВАНИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Р.А. Смит¹, аспирант; ResearcherID: [O-2661-2019](https://orcid.org/0000-0002-9665-4636).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9665-4636>

Е.Ю. Демьянцева¹, канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: [P-5165-2019](https://orcid.org/0000-0001-9570-1827).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9570-1827>

О.С. Андранович¹, аспирант; ResearcherID: [P-5570-2019](https://orcid.org/0000-0002-7947-7068).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7947-7068>

А.П. Филиппов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук; ResearcherID: [A-9157-2013](https://orcid.org/0000-0002-8729-6275).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8729-6275>

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; e-mail: zz1234567@yandex.ru, demyantseva@mail.ru, ilonichka3377@mail.ru

²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Большой просп. В.О., д. 31, Санкт-Петербург, Россия, 199004; e-mail: afil@imc.macro.ru

Аннотация. Необходимость совершенствования существующей технологии обессмоливания целлюлозы (снижения расхода используемых при этом поверхностно-активных веществ и уменьшения экологической нагрузки) – обусловила сочетание существующих методов удаления смолы с ферментативной обработкой. Основой механизма обессмоливания целлюлозы амфифильными соединениями является процесс сольюбилизации смолистых веществ, поэтому установление закономерностей данного процесса и его регулирование предопределяют успешность реализации выбранной технологии. С использованием спектрофотометрии, рН-метрии и метода динамического светорассеяния исследованы особенности сольюбилизации триолеина и канифоли в системах на основе индивидуальных неионогенных поверхностно-активных веществ, фермента липазы, а также их синергетических смесей с определением сольюбилизационных емкостей мицелл и возможного механизма встраивания в них сольюбилизата. Установлено, что синтаמיד-5 обладает невысокой обессмоливающей способностью, несмотря на высокую сольюбилизационную емкость его мицелл и получение агрегатов с гидродинамическим радиусом до 98 нм после диффузии канифоли в них. Вероятно, для успешного обессмоливания целлюлозных полуфабрикатов более предпочтительны компактные мицеллярные структуры с развитой поверхностью, которые реализуются в смешанных системах амфифильных соединений, в том числе с присутствием в них синтамида-5. Введение липазы приводит к увеличению сольюбилизационной емкости смешанных агрегатов и возрастанию интенсивности встраивания молекул сольюбилизата. При этом в зависимости от природы амфифильного соединения имеет место различный механизм встраивания сольюбилизата в мицеллы. Определение размеров ассоциатов в смешанных системах показало отсутствие денатурации фермента, что прогнозирует успешное применение таких кооперативных систем для обессмоливания волокнистых полуфабрикатов. Установлено, что сольюбилизирующая способность изучаемых систем на объектах, моделирующих смолу, коррелируется с их обессмоливающей способностью относительно различных волокнистых полуфабрикатов.

Для цитирования: Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С., Филиппов А.П. Особенности сольюбилизирующего действия амфифильных соединений при обессмоли-

вании целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1 . С. 180–191. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-180-191

Благодарность: За содействие в проведении исследования ферментного препарата методом электрофореза в полиакриламидном геле авторы благодарят ведущего инженера лаборатории № 5 ИВС РАН В.В. Захарова.

Ключевые слова: солубилизация, обессмоливание целлюлозы, липаза, поверхностно-активные вещества.

Введение

Большинство современных технологических процессов, протекающих с участием амфифильных соединений, сопровождаются агрегацией, солубилизацией, эмульгированием, диспергированием и др. При производстве волокнистых полуфабрикатов поверхностно-активные вещества (ПАВ) благодаря своей дифильной структуре играют важную роль в облагораживании макулатурного сырья, очистке различных производственных поверхностей, пеногашении, а также в предотвращении отложений «вредной смолы» (проявляя свои солубилизирующие и эмульгирующие свойства). Эти отложения являются одной из нерешенных проблем лесопромышленного комплекса как в России, так и за рубежом [11, 15, 18]. Стремление снизить расход ПАВ и экологическую нагрузку от производства, интенсифицировать процесс растворения (удаления) смолы сделало перспективным применение фермента липазы [3, 10, 16]. Благодаря своей амфифильной природе совместное использование ПАВ и липазы представляется весьма выгодным, хотя и не лишено некоторых трудностей (возможная инактивация фермента, сорбция на волокне, его неустойчивость в производственных условиях) [8].

Известно [16, 17, 25, 26], что использование некоторых ПАВ может приводить к денатурации и инактивации ферментов. Денатурация ферментов обычно заключается в разворачивании белковой молекулы и увеличении ее размеров. Однако наличие этиленоксидных групп в молекулах амфифильных соединений элиминирует негативное влияние ПАВ на структуру липазы [22]. Неионогенные ПАВ (НПАВ) в основном связываются с молекулами ферментов через гидрофобные взаимодействия и водородные связи, что зачастую слабо влияет на их структуру [19]. Этоксификация ПАВ увеличивает их полярность, промотирует более слабые взаимодействия и лучше стабилизирует белок.

На данный момент накоплен большой эмпирический материал по вопросам солубилизации в мицеллах индивидуальных ПАВ и в смешанных мицеллах [12, 23, 24]. Однако механизм инкорпорирования веществ в агрегаты ПАВ–липаза исследован недостаточно. Трудности изучения солубилизационного процесса, обеспечивающего обессмоливание целлюлозы, обусловлены сложной взаимосвязью между структурой и размером агрегатов.

Цель исследования – изучение проблемы смешанного агрегирования, а также взаимной активации солубилизирующих свойств многокомпонентных смесей на основе амфифильных соединений, в том числе липазы.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны отечественные НПАВ: синтаמיד-5 и синтанол ДС-10, а также коммерческий ферментный препарат

Lipex 100L компании Novozymes. Синтаמיד-5 является смесью полиоксиэтилированных эфиров моноэтаноламидов синтетических жирных кислот с массовой долей 93 % и представляет собой полупрозрачную желтую жидкость, хорошо растворимую в воде и некоторых органических растворителях. Синтанол ДС-10 (смесь полиоксиэтиленгликолевых эфиров синтетических первичных высших жирных спиртов) – паста белого или желтоватого цвета с содержанием основного вещества 99 %. Она растворима в воде, устойчива в растворах минеральных кислот, щелочей и солей. Lipex 100L получают глубинной ферментацией генетически модифицированных микроорганизмов *Aspergillus*. Ранее нами [13] были исследованы коллоидно-химические характеристики индивидуальных веществ и их смесей, установлен состав их синергетических смесей. Содержание липазного препарата во всех композициях – 30 %.

В качестве модели для исследования солюбилизации была выбрана живичная канифоль (Смолтехнохим). Состав образца был изучен согласно стандартизованным методикам [1, 7]. Содержание смоляных кислот – 93 %, нейтральных веществ – 7,0 %. В качестве модельного компонента жиров лиственной древесины использовали триолеин (Fluka).

Исследования солюбилизации канифоли проводили на основе методики, изложенной в [4]. Для этого в ряд конических колб помещали по 50 мл раствора, добавляли избыток (0,1 г) растертой и фракционированной канифоли (размер частиц не более 0,26 мм), закрывали притертой пробкой и перемешивали на магнитной мешалке в течение 60 мин. Затем растворы центрифугировали 30 мин при скорости 5000 об/мин для отделения грубодисперсной фазы и осторожно декантировали супернатант. Все супернатанты были прозрачными. Затем в каждую колбу приливали по 5 мл 1 н раствора LiOH, после окончательного развития окраски (60 мин) измеряли оптическую плотность на спектрофотометре СФ-2000 при длине волны $\lambda = 297,9$ нм и длине оптического пути 1 см относительно холостой пробы. По калибровочным кривым находили содержание солюбилизированной канифоли.

Разность кислотности среды исследуемых систем до и после солюбилизации определяли на приборе Мультитест ИПЛ (Россия).

Обессмоливание сульфатной лиственной и сульфитной хвойной небеленых целлюлоз проводили согласно стандартной методике [6] и рассчитывали степень обессмоливания [14]. Содержание экстрактивных веществ в сульфатной и сульфитной целлюлозе составило 0,70 и 1,55 % соответственно.

Для определения гидродинамических радиусов R_h агрегатов амфифильных соединений использовали метод динамического светорассеяния, применяя установку Photocor Complex (Photocor Instruments Inc., Россия). Источником света служил диодный лазер Photocor-DL с длиной волны $\lambda = 658,7$ нм. Корреляционную функцию интенсивности рассеянного света получали с помощью коррелятора Photocor-PC2 с числом каналов 288 и обрабатывали, применяя программное обеспечение Dynal S. Значения R_h измеряли при угле рассеяния 90° и температуре 21 °С. Концентрация растворов – 0,5 %. Погрешность определения R_h составила в среднем 10 %. Растворы пропускали через фильтры JetBiofil PVDF с диаметром пор 0,45 μm . В случае, когда в растворах присутствовало два типа частиц, определяли концентрацию каждого типа [21, 27].

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1–2 представлены зависимости количества солюбилизированной канифоли от концентрации мицеллярных растворов амфифильных соединений и их смесей.

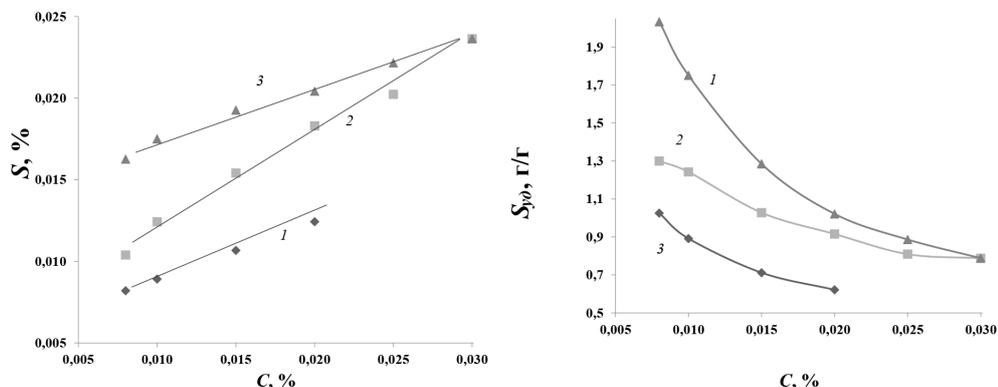


Рис. 1. Зависимость равновесного S (а) и удельного $S_{уд}$ (б) количества солюбилизированной канифоли от концентрации мицеллярных растворов C : 1 – синтанол ДС-10; 2 – смесь синтанол ДС-10 – синтаמיד-5 (70:30); 3 – синтаמיד-5

Fig. 1. Dependence of equilibrium S (a) and specific $S_{уд}$ (б) amounts of solubilized rosin on the concentration of micellar solutions C : 1 – synthanol DS-10; 2 – mixture of synthanol DS-10 and synthamide-5 (70:30); 3 – synthamide-5

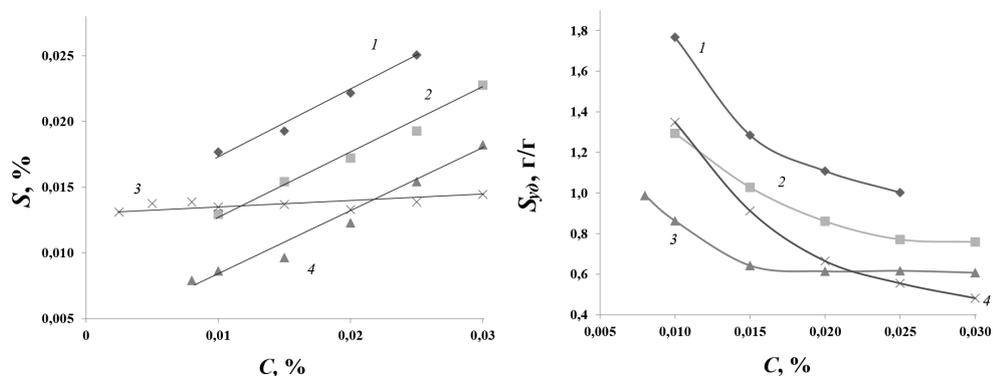


Рис. 2. Зависимость равновесного S (а) и удельного $S_{уд}$ (б) количества солюбилизированной канифоли от концентрации мицеллярных растворов C : 1 – смесь синтанол ДС-10 – Lipex 100L (70:30); 2 – смесь синтанол ДС-10 – синтаמיד-5 + Lipex 100L (50:20:30); 3 – смесь синтаמיד-5 + Lipex 100L (70:30); 4 – Lipex 100L

Fig. 2. Dependence of equilibrium S (a) and specific $S_{уд}$ (б) amounts of solubilized rosin on the concentration of micellar solutions C : 1 – mixture of synthanol DS-10 and Lipex 100L (70:30); 2 – mixture of synthanol DS-10, synthamide-5 and Lipex 100L (50:20:30); 3 – mixture of synthamide-5 and Lipex 100L (70:30); 4 – Lipex 100L

Величины солюбилизационных емкостей смешанных мицелл по отношению к солюбилизату-канифоли (CE , г канифоли/г ПАВ) были определены по тангенсу угла наклона изотермы солюбилизации к оси концентрации в мицеллярной области (после критической концентрации мицеллообразования) [9, 20]. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Солюбилизационные емкости исследуемых систем

№ объекта	Объект	Канифоль		Триолеин	
		СЕ	СЕ эксп/ СЕадд	СЕ	СЕ эксп/ СЕадд
1	Синтаמיד-5	0,35	–	0,46	–
2	Синтанол ДС-10	0,28		0,72	
3	Lipex 100L	0,03		0,10	
4	Синтанол ДС-10 – синтаמיד-5 (70:30)	0,56	1,87	0,77	1,20
5	Lipex 100L – синтанол ДС-10	0,36	1,76	0,69	1,29
6	Lipex 100L – синтаמיד-5	0,46	1,81	0,62	1,76
7	Lipex 100L – синтанол ДС-10 + синтаמיד-5	0,46	1,15	0,47	0,82

Наибольшей солюбилизационной емкостью относительно канифоли из индивидуальных веществ обладает синтаמיד-5, вероятно, из-за взаимодействий между кислотными группами компонентов канифоли и ПАВ. Прогнозируемый синергизм наблюдается при смешивании НПАВ. При введении липазы к НПАВ солюбилизационная емкость смешанных агрегатов увеличивается, несмотря на отсутствие явного индуцированного коллоидного растворения самим ферментным препаратом. Характер зависимостей удельной солюбилизации (рис. 1, б, 2, б) от роста концентрации обуславливается различным механизмом включения канифоли в мицеллы. При введении липазы к НПАВ интенсивность встраивания молекул солюбилизиата возрастает.

Для более глубокого понимания взаимодействия между амфифильными соединениями и солюбилизатором была определена разность водородных показателей (рН) изучаемых систем до и после солюбилизации (концентрация растворов солюбилизаторов 0,5 %). Результаты представлены на рис. 3.

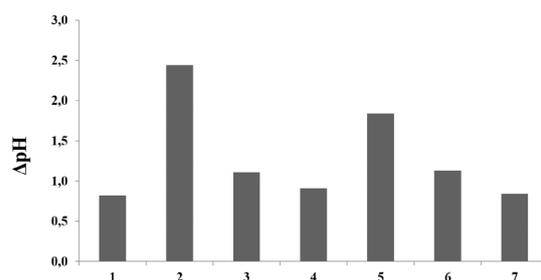


Рис. 3. Изменение рН 0,5 %-х растворов амфифильных соединений при солюбилизации: 1 – синтанол ДС-10; 2 – синтаמיד-5; 3 – Lipex 100L; 4 – синтанол ДС-10 + Lipex 100L (70:30); 5 – синтаמיד-5 + Lipex 100L (70:30); 6 – синтанол ДС-10 + синтаמיד-5 (70:30); 7 – синтанол ДС-10 + синтаמיד-5 + Lipex 100L (50:20:30)

Fig. 3. Changes in pH of 0.5 % amphiphilic compounds during solubilization: 1 – synthanol DS-10; 2 – synthamide-5; 3 – Lipex 100L; 4 – mixture of synthanol DS-10 and Lipex 100L (70:30); 5 – mixture of synthamide-5 and Lipex 100L (70:30); 6 – mixture of synthanol DS-10 and synthamide-5 (70:30); 7 – mixture of synthanol DS-10, synthamide-5 and Lipex 100L (50:20:30)

Понижение рН растворов при солюбилизации помимо проникновения молекул солюбилизата в мицеллы указывает на химическое взаимодействие между спиртовыми группами гидрофильной части НПАВ и кислотными группами компонентов канифоли [4].

Это предположение подтверждается данными, полученными методом динамического рассеяния света. На рис. 4 приведены значения гидродинамических радиусов R_h частиц, присутствующих в растворах.

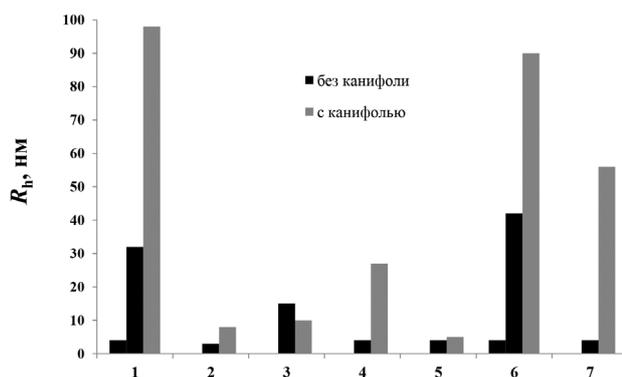


Рис. 4. Размеры агрегатов R_h амфифильных соединений в отсутствии и присутствии канифоли: 1 – синтаמיד-5; 2 – синтанол ДС-10; 3 – Lipex100L; 4 – синтанол ДС-10 + синтаמיד-5 (70:30); 5 – синтанол ДС-10 + Lipex 100L (70:30); 6 – синтаמיד-5 + Lipex 100L (70:30); 7 – синтанол ДС-10 – синтаמיד-5 + Lipex 100L (50:20:30)

Fig. 4. Size distribution of aggregates R_h of amphiphilic compounds in the absence and presence of rosin: 1 – synthamide-5; 2 – synthanol DS-10; 3 – Lipex100L; 4 – mixture of synthanol DS-10 and synthamide-5 (70:30); 5 – mixture of synthanol DS-10 and Lipex 100L (70:30); 6 – mixture of synthamide-5 and Lipex 100L (70:30); 7 – mixture of synthanol DS-10, synthamide-5 and Lipex 100L (50:20:30)

Как видно из рис. 4, в растворе коммерческого препарата липазы присутствуют две моды 15 и 110 нм. Методом гель-электрофореза было установлено наличие белковых молекул массой 30 кДа (с предполагаемым размером около 5 нм [2, 5]), а также минорного количества примесей небелковых компонентов, на счет которых можно отнести появление частиц размером 110 нм. Обнаруженные частицы с размером 15 нм, вероятно, представляют собой ассоциаты молекул липазы. Введение канифоли приводит к усилению гидрофобных взаимодействий в ассоциатах фермента, что отражается в уменьшении их размеров.

Гидродинамический радиус мицелл синтанола ДС-10 составляет 3 нм. Для интенсивного растворения смолы необходима развитая мицеллярная поверхность, т. е. мелкие мицеллы. Введение канифоли приводит к некоторому увеличению размеров мицелл до 8 нм. Включение канифоли в мицеллы, возможно, происходит по диссоциационно-солюбилизационному механизму: пер-

воначально мицелла распадается и соединяется с частицами смолы, переводя их в раствор с образованием устойчивой микроэмульсии.

Мицеллярные растворы синтамида-5 полидисперсны с гидродинамическими радиусами агрегатов 4 и 32 нм. Добавка канифоли приводит к образованию ассоциатов одной моды 98 нм из-за преобладания диффузионно-солюбилизационного механизма, когда размеры мицелл сильно увеличиваются за счет диффузии солюбилизата во внутренний углеводородный объем мицеллы. В пользу этого также свидетельствуют наибольшее снижение pH при солюбилизации и максимальное значение солюбилизационной емкости среди исследуемых индивидуальных амфифильных соединений.

Мицеллы синергетической смеси НП АВ имеют размер, приближенный к размерам мицелл синтанола ДС-10, но присутствие синтамида-5 повышает солюбилизационную емкость (табл. 1) синергетической смеси. Включение канифоли в смешанные мицеллы проходит по диффузионно-солюбилизационному механизму, в результате чего солюбилизованные агрегаты сильно увеличиваются в размерах.

Введение липазы к индивидуальным НП АВ не приводит к росту размеров агрегатов. Фермент успешно встраивается в мицеллы ПАВ, и денатурации белка не происходит. Канифоль в такой системе солюбилизируется по механизмам действия самих НП АВ. Смесь липазы с синтамидом-5 имеет наибольшее изменение pH из всех смесей фермент–ПАВ, что коррелирует с результатами исследования солюбилизационной емкости в данной смеси.

Однако при смешении синергетической смеси НП АВ и липазы получают компактные структуры с $R_h \sim 4$ нм. При образовании солюбилизационных агрегатов мицеллярные размеры увеличиваются до 56 нм, что можно объяснить присутствием синтамида-5, несмотря на его минорное содержание в смеси. В таких многокомпонентных системах диффузионно-солюбилизационный механизм встраивания канифоли в компактные мицеллы осложняется стерическими затруднениями, что и вызывает увеличение их размеров [9].

При солюбилизации триолеина мицеллами индивидуальных НП АВ наблюдаются идентичные механизмы встраивания солюбилизата. Индуцированное коллоидное растворение триолеина связано с действием фермента. Известно, что у липаз есть два связывающих места: широкий «карман» для спирта и узкий – для карбоновых кислот [5]. Вероятно, помимо расщепления жиров происходит и связывание продуктов гидролиза, что подтверждается данными потенциометрического титрования. Смешанные мицеллы обладают синергетическим солюбилизирующим действием относительно триолеина, что предопределяет их хорошее обессмоливающее действие на листовенные породы. В композиции синергетической смеси НП АВ + липаза наблюдается низкая солюбилизирующая способность, вероятно, из-за стерических затруднений при встраивании солюбилизата в такие сложные агрегаты.

Поскольку солюбилизация является ключевым фактором процесса обессмоливания, полученные данные были сопоставлены с результатами изучения снижения смолистости сульфатной листовенной (СФА) и сульфитной хвойной (СФИ) небеленой целлюлозы в условиях стадии промывки полуфабриката пе-

Таблица 2

Обессмоливающее действие используемых систем

№ объекта	Объект	Степень обессмоливания / аддитивное значение, %	
		СФА	СФИ
1	Синтаמיד-5	18	38
2	Синтанол ДС-10	38	16
3	Lipex 100L	68	49
4	Синтанол ДС-10 – синтаמיד-5 (70:30)	68/32	60/24
5	Lipex 100L – синтанол ДС-10	35/47	45/26
6	Lipex 100L – синтаמיד-5	39/33	44/41
7	Lipex 100L – синтанол ДС-10 + синтаמיד-5	52/68	55/57

ред отбелкой. Степень обессмоливания при действии изучаемых систем представлена в табл. 2.

Результаты исследования показали, что обессмоливающая способность выбранных систем коррелирует с их солюбилизующей способностью. Так, действие синтанола ДС-10, в отличие от синтамида-5, эффективнее на сульфатной целлюлозе, как и его солюбилизующая способность относительно триолеина.

Было обнаружено, что индивидуальные НПАВ обладают невысокой обессмоливающей способностью по отношению к волокнистым полуфабрикатам, несмотря на высокую солюбилизационную емкость мицелл. Вероятно, присутствие целлюлозных волокон вызывает частичную адсорбцию образованных на них крупных мицеллярных структур, что снижает суммарную мицеллярную поверхность, необходимую для солюбилизационного действия. Ожидаемый по ее коллоидно-химическим характеристикам синергизм смеси НПАВ подтверждается приведенными в табл. 2 значениями степени обессмоливания, в 2 раза превышающими аддитивное значение. Согласно данным по солюбилизации, введение липазы к синтаמידу-5 способствует синергетическому обессмоливанию (по сравнению с аддитивными значениями).

Совместное применение липазы как с синтанолом ДС-10, так и со смесью НПАВ не привело к синергетическому снижению общей смолистости сульфатной лиственной целлюлозы по сравнению с индивидуальными веществами. Однако [14] при микроскопическом исследовании состояния смолы на волокне было доказано, что обработка целлюлозы смесью липаза – синтанол ДС-10 способствует диспергированию больших коагулированных частиц смолы. В случае композиции НПАВ с ферментом отмечается симбатная обессмоливание зависимость.

Возможное увеличение стоимости обессмоливающей композиции вследствие добавки липазы может быть компенсировано ростом количества солюбилизированных экстрактивных веществ, что обеспечит хорошее обессмоливающее действие химикатов, а также снижением нагрузки на очистные сооружения.

Результаты исследования показали, что в зависимости от природы амфифильного соединения имеет место различный механизм встраивания солюбилизатора в мицеллы. При смешивании растворов ПАВ и липазы не наблюдается денатурации фермента. Это подтверждает гипотезу о возможном применении таких синергетических смесей в качестве реагентов, обессмоливающих целлюлозу.

Выводы

1. Обоснована коллоидно-химическая концепция, применимая при разработке систем на основе поверхностно-активных веществ и фермента липазы для солюбилизации смолистых компонентов целлюлозы.

2. Установлено, что максимальной солюбилизационной емкостью обладают смеси неионогенных поверхностно-активных веществ. Добавление к ним липазы приводит к синергетическому эффекту.

3. Показана зависимость степени обессмоливания от механизма включения солюбилизатора в мицеллы. Более эффективное снижение смолистости целлюлозы наблюдается при диффузионно-солюбилизационном механизме.

4. Состав синергетических смесей поверхностно-активные вещества – липаза с содержанием фермента в композиции до 30 % способствует хорошему обессмоливанию и снижению нагрузки на очистные сооружения, что, возможно, компенсирует увеличение стоимости обессмоливающей композиции вследствие добавки липазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акимова Г.С., Курзин А.В., Павлова О.С., Евдокимов А.Н. Химия и технология компонентов сульфатного мыла. СПб.: СПбГУРП, 2008. 104 с. [Akimova G.S., Kurzin A.V., Pavlova O.S., Evdokimov A.N. *Chemistry and Technology of Sulphate Soap Components*. Saint Petersburg, HSTE Publ., 2008. 104 p.].

2. Беленова А.С. Исследование закономерностей гидролиза триглицеридов свободной и иммобилизованной липазой: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2011. 24 с. [Belenova A.S. *Study of Triglyceride Hydrolysis Patterns by Free and Immobilized Lipase*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2011. 24 p.].

3. Болотова К.С., Новожилов Е.В. Применение ферментных технологий для повышения экологической безопасности целлюлозно-бумажного производства // Химия растит. сырья. 2015. № 3. С. 5–23. [Bolotova K.S., Novozhilov E.V. Enzymes Application for Improving Ecological Safety of Pulp and Paper Industry. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2015, no. 3, pp. 5–23]. DOI: [10.14258/jcprm.201503575](https://doi.org/10.14258/jcprm.201503575)

4. Волков В.А., Талмуд С.Л. Исследование солюбилизации канифоли в водных растворах некоторых поверхностно-активных веществ // Коллоид. журн. 1966. Т. 28, № 3. С. 343–349. [Volkov V.A., Talmud S.L. Study of Rosin Solubilization in Aqueous Solutions of Some Surfactants. *Kolloidnyj Zhurnal* [Colloid Journal], 1966, vol. 28, no. 3, pp. 343–349].

5. Горохова И.В. Изучение каталитических свойств липаз, иммобилизованных в гидрофобных средах: дис. ... канд. хим. наук. М., 2003. 134 с. [Gorokhova I.V. *Study of the Catalytic Properties of Lipases Immobilized in Hydrophobic Media*: Cand. Chem. Sci. Diss. Moscow, 2003. 134 p.].

6. ГОСТ 6841–77. Целлюлоза. Метод определения смол и жиров. Дата введ. 1979-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1998. 6 с. [State Standard. *GOST 6841–77. Cellulose. Method for Determination of Pitch and Fat*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1998. 6 p.].

7. ГОСТ 19113–84. Канифоль сосновая. Технические условия. Дата введ. 1986-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999. 5 с. [State Standard. GOST 19113–84. Pine Rosin. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 5 p.]

8. Емельянова М.В., Чухчин Д.Г., Новожилев Е.В. Перспективы использования липазы в целлюлозно-бумажном производстве // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 1. С. 111–119. [Emeljanova M.V., Chuhchin D.G., Novozhilov E.V. Prospects of Using Lipase in Pulp-and-Paper Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2007, no. 1, pp. 111–119]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/38f/38f6a443ad5e3e8c17862ed53e2bb646.pdf>

9. Задимова Н.М. Жидкофазные дисперсные системы как основа микрогетерогенных полимерных матриц для трансдермальной доставки лекарств: дис. ... д-ра хим. наук. М., 2014. 273 с. [Zadymova N.M. *Liquid-Phase Disperse Systems as a Basis of Microheterogeneous Polymeric Matrices for Transdermal Drug Delivery*: Dr. Chem. Sci. Diss. Moscow, 2014. 273 p.] URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/theses/2014-01-21-zadymova/fulltext.pdf>

10. Новожилев Е.В., Пошина Д.Н. Биотехнологии в производстве целлюлозы для химической переработки (обзор) // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 15–32. [Novozhilov E.V., Poshina D.N. Biotechnology in Dissolving Pulp Production. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 3, pp. 15–32].

11. Печурин Т.Б., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Комаров В.И. Влияние добавок диспергантов на изменение состояния смолы и содержание экстрактивных веществ в лиственной сульфатной целлюлозе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 2-3. С. 68–75. [Pechurina T.B., Milovidova L.A., Komarova G.V., Komarov V.I. Influence of Dispersant Additives on Resin State Changing and Extractives Content in Sulphate Softwood Pulp. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2003, no. 2-3, pp. 68–75]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/8e6/8e6ebe5a410ec2ec1c64f589cda92dce.pdf>

12. Русанов А.И., Щёкин А.К. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ: моногр. СПб.: Лань, 2016. 612 с. [Rusanov A.I., Shchekin A.K. *Micellization in Solutions of Surfactants*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2016. 612 p.]

13. Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С. Влияние липазы на мицеллообразующую и солюбилизующую способность неионогенных поверхностно-активных веществ // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61, вып. 6. С. 54–60. [Smith R.A., Demyantseva E.Yu., Andranovich O.S. Impact of Lipase on Micelle Formation and Solubilization Abilities of Non-Ionic Surfactants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology], 2018, vol. 61, iss. 6, pp. 54–60]. DOI: [10.6060/tcct.20186106.5696](https://doi.org/10.6060/tcct.20186106.5696)

14. Смит Р.А., Демьянцева Е.Ю., Андранович О.С. Анализ состояния смолы при обессмоливании сульфатной лиственной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 168–178. [Smith R.A., Demyantseva E.Yu., Andranovich O.S. Analysis of the Resin Forms in the Process of the Short Fiber Sulphate Cellulose Deresination. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 168–178]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.4.168](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.168), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a44/168_178.pdf

15. Хакимова Ф.Х., Ковтун Т.Н., Хакимов Р.Р. Обессмоливание целлюлозы поверхностно-активными веществами на стадии бисульфитной варки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 5. С. 108–113. [Khakimova F.Kh., Kovtun T.N., Khakimov R.R. Pulp Deresination by Surfactants at Bisulfite Pulping Stage. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2008, no. 5, pp. 108–113]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f63/f63241d806cb31f2b65c34d595a942a7.pdf>

16. Delorme V., Dhouib R., Canaan S., Fotiadu F., Carrière F., Cavalier J.-F. Effects of Surfactants on Lipase Structure, Activity, and Inhibition. *Pharmaceutical Research*, 2011, vol. 28, pp. 1831–1842. DOI: [10.1007/s11095-010-0362-9](https://doi.org/10.1007/s11095-010-0362-9)

17. Holmberg K. Interactions between Surfactants and Hydrolytic Enzymes. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2018, vol. 168, pp. 169–177. DOI: [10.1016/j.colsurfb.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.12.002)
18. Hubbe M.A., Rojas O.J., Venditti R.A. Control of Tacky Deposits on Paper Machines – A Review. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2006, vol. 21, iss. 2, pp. 154–171. DOI: [10.3183/npprj-2006-21-02-p154-171](https://doi.org/10.3183/npprj-2006-21-02-p154-171)
19. Jelińska A., Zagożdżon A., Górecki M., Wisniewska A., Frelek J., Holyst R. Denaturation of Proteins by Surfactants Studied by the Taylor Dispersion Analysis. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12(4), art. e0175838. DOI: [10.1371/journal.pone.0175838](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175838)
20. Kamil M., Siddiqui H. Experimental Study of Surface and Solution Properties of Gemini-Conventional Surfactant Mixtures on Solubilization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, 2013, vol. 3, no. 4B, pp. 17–25. DOI: [10.4236/mnsms.2013.34B004](https://doi.org/10.4236/mnsms.2013.34B004)
21. Kratochvíl P. *Classical Light Scattering from Polymer Solution*. Amsterdam, Elsevier, 1987. 334 p.
22. Magalhães S.S., Alves L., Sebastião M., Medronho B., Almeida Z.L., Faria T.Q., Brito R.M.M., Moreno M.J., Antunes F.E. Effect of Ethyleneoxide Groups of Anionic Surfactants on Lipase Activity. *Biotechnology Process*, 2016, vol. 32, iss. 5, pp. 1276–1282. DOI: [10.1002/btpr.2310](https://doi.org/10.1002/btpr.2310)
23. McBain M.E.L., Hutchinson E. *Solubilization and Related Phenomena*. New York, Academic Press, 1955. 257 p.
24. Mittal K.L. *Micellization, Solubilization, and Microemulsions*. Vol. 2. New York, Plenum Press, 1977. 460 p. DOI: [10.1007/978-1-4613-4157-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4157-4)
25. Otzen D. Protein–Surfactant Interactions: A Tale of Many States. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics*, 2011, vol. 1814, iss. 5, pp. 562–591. DOI: [10.1016/j.bbapap.2011.03.003](https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2011.03.003)
26. Reis P., Malmsten M., Nydén M., Folmer B., Holmberg K. Interactions between Lipases and Amphiphiles at Interfaces. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2019, vol. 22, iss. 5, pp. 1047–1058. DOI: [10.1002/jsde.12254](https://doi.org/10.1002/jsde.12254)
27. Schärfl W. *Light Scattering from Polymer Solutions and Nanoparticle Dispersions*. Berlin, Springer, 2007. 191 p. DOI: [10.1007/978-3-540-71951-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71951-9)

FEATURES OF SOLUBILIZING EFFECT OF AMPHIPHILIC COMPOUNDS DURING PULP DERESINATION

Regina A. Smit¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [O-2661-2019](https://orcid.org/0000-0002-9665-4636),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9665-4636>

Elena Yu. Demiantseva¹, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [P-5165-2019](https://orcid.org/0000-0001-9570-1827),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9570-1827>

Olga S. Andranovich¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [P-5570-2019](https://orcid.org/0000-0002-7947-7068),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7947-7068>

Alexander P. Filippov^{1,2}, Doctor of Physics and Mathematics; ResearcherID: [A-9157-2013](https://orcid.org/0000-0002-8729-6275),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8729-6275>

¹Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: zz1234567@yandex.ru, demyantseva@mail.ru, ilonichka3377@mail.ru

²Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences, Bol'shoy prospect Vasil'yevskogo ostrova, 31, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation; e-mail: afil@imc.macro.ru

Abstract. The necessity to improve the existing technology of pulp deresination, in particular, to reduce the surfactants consumption and decrease the environmental load, led to a combination of existing methods of resin removal with the use of enzymatic treatment. The basis of the pulp deresination mechanism by amphiphilic compounds is the solubilization of resinous substances. Thus, the establishment of the patterns of this process and its control predetermines the success of implementation of the selected technology. The features of solubilization of triolein and rosin in the lipase-based systems of individual nonionic surfactants, the enzyme, as well as their synergistic mixtures with the determination of solubilization capacities of micelles and the possible mechanism of solubilize incorporation into them were studied using spectrophotometry, pH measurement and dynamic light scattering. It was found that synthamide-5 has a low deresination capability in spite of the high solubilization capacity of its micelles and the production of aggregates with a hydrodynamic radius up to 98 nm after diffusion of rosin into them. It is likely that compact micellar structures with a developed surface, which are implemented in mixed systems of amphiphilic compounds, including the presence of synthamide-5 in them, are more preferable for successful deresination of pulp semi-finished products. The addition of lipase leads to an increased solubilization capacity of mixed aggregates and an increase in the intensity of solubilize molecules incorporation. Thus, depending on the nature of the amphiphilic compound, there is a different mechanism for solubilize incorporation into micelles. Determination of the size of associates in mixed systems showed the absence of enzyme denaturation, which predicts the successful application of such cooperative systems for deresination of fiber semi-finished products. It is found that the solubilizing capability of the studied systems on resin modeling objects correlates with their deresination capability with respect to different fiber semi-finished products.

For citation: Smit R.A., Demiantseva E.Yu., Andranovich O.S., Filippov A.P. Features of Solubilizing Effect of Amphiphilic Compounds during Pulp Deresination. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 180–191. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-180-191

Acknowledgements: The authors are grateful to V.V. Zakharov, leading engineer of Laboratory No. 5 of the Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences (IMC RAS), for his assistance in the study of the enzyme preparation by electrophoresis in polyacrylamide gel.

Keywords: solubilization, pulp deresination, lipase, surfactants.

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

Поступила 25.05.20 / Received on May 25, 2020

УДК 676.022.623

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-192-200

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА ОТ СОДЕРЖАНИЯ СУХИХ ВЕЩЕСТВ (ХВОЙНАЯ ЦВВ)

Ю.В. Севастьянова¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

Е.А. Топтунов¹, инж. ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»; ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

Н.В. Щербак¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

П.В. Солнцев², начальник ТЭЦ-2 производства картона;

ResearcherID: [ABE-4402-2020](https://orcid.org/0000-0001-5992-6981), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-6981>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: y-sevastyanova@yandex.ru, zhenya.topunow2011@yandex.ru, n.sisoeva@narfu.ru

²АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская область, Россия, 164900

Аннотация. Современная выпарная станция – это энергосберегающее производство упаренного щелока с высоким содержанием сухих веществ для обеспечения минимальных выбросов SO₂ из содорегенерационного котла. Такие станции оснащены аппаратами типа падающей пленки (Falling Film) и состоят из 5–7 ступеней. Необходимость совершенствования и создания новых концентраторов черного щелока обусловлена повышенным вниманием к вопросам охраны окружающей среды и желанием получать щелок с более высокой теплотворной способностью. Физические свойства черного щелока зависят от его состава и оказывают существенное влияние на подбор выпарных аппаратов и проектирование выпарных вакуумных установок. К основным свойствам, учитываемым в процессах выпарки и сжигания, относятся: плотность, вязкость, поверхностное натяжение, теплота сгорания и температура кипения. Важнейшими для процесса выпаривания щелока являются такие его характеристики, как вязкость, влияющая на способность к перекачиванию и конструктивные особенности, и плотность, с помощью которой контролируют содержание сухих веществ и процесс выпарки на основных стадиях регенерации щелока. Исследование выполнено в целях определения математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ для хвойной целлюлозы высокого выхода. В задачи исследования входило: проанализировать влияние температуры и концентрации сухих веществ на плотность черного щелока от варки хвойной целлюлозы высокого выхода по технологическому потоку производства; разработать математическую модель зависимости плотности черного щелока сульфатной хвойной целлюлозы высокого выхода от концентрации и температуры; провести сравнительную апробацию результатов математической и корреляционной зависимости ТАРР. Получены математическая зависимость плотности черного щелока от температуры и содержания сухих веществ, необходимая для оперативных технологических расчетов отделов регенерации химикатов в сульфатном производстве волокнистых полуфабрикатов для картона, а также на основании проведенных исследований, регрессионного анализа и математической обработки результатов – уравнение математической зависимости, позволяющее с наибольшей точностью вычислить плотность черного щелока от сульфатной варки хвойной целлюлозы высокого выхо-

да: $\rho = 0,974 + 0,0071x - 0,0002t - 0,000007xt - 0,00000045t^2 - 0,0000045x^2$. Проведена сравнительная апробация результатов разработанной математической зависимости и корреляционной зависимости (опубликованной в ТАРПИ) плотности черного щелока от содержания сухих веществ, обнаружен высокий уровень сопоставимости предложенных математических уравнений.

Для цитирования: Севастьянова Ю.В., Топтунов Е.А., Щербак Н.В., Солнцев П.В. Определение математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ (хвойная ЦБВ) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 192–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-192-200

Ключевые слова: сульфатная целлюлоза высокого выхода, регенерация химикатов, физические свойства черного щелока, содержание сухих веществ, плотность черного щелока, выпарка, математическая модель.

Введение

Одним из основополагающих аспектов экономической целесообразности сульфатной варки является возможность регенерации химикатов [1], что снижает потери щелочи и серы и, следовательно, уменьшает расход свежих химикатов. Цикл регенерации современного сульфатного завода позволяет восстанавливать и повторно использовать примерно 95...97 % химикатов. Несмотря на то, что необходимость соблюдения строгих нормативов допустимых выбросов и сокращения потерь химикатов в настоящее время требуют совершенствования процесса регенерации, принципиальная схема практически не изменилась. Одним из ключевых процессов регенерации химикатов является выпарка черного щелока, способствующая увеличению содержания сухих веществ, перед сжиганием [2, 3, 5].

Сухой остаток черного щелока состоит на 30...40 % из минеральных и на 60...70 % из органических веществ. Его элементный состав определяется видом древесины и условиями ее делигнификации [7, 8, 13].

Современная выпарная станция – это экологически безопасное энергосберегающее производство упаренного щелока с высоким содержанием сухих веществ. Станции оснащены аппаратами типа падающей пленки (Falling Film) и состоят из 5–7 ступеней. Два основных фактора – охрана окружающей среды и повышение теплотворной способности щелока – стимулировали создание и совершенствование концентраторов черного щелока.

Преимущества высокого содержания сухих веществ черного щелока общеизвестны: высокая тепловая и электрическая производительность; практическое отсутствие выбросов SO_2 при содержании сухих веществ в черном щелоке более 75 %; повышение степени восстановления сульфата до 96...99 %; более простая эксплуатация содорегенерационного котла (СРК) [17, 18]. Высокое содержание сухих веществ в щелоке уменьшает количество образующихся дымовых газов в топке СРК по отношению к высвобождающемуся количеству тепла, что приводит к повышению температуры в нижней части топки и снижению количества дымовых газов [9].

Основные трудности выпаривания черного щелока в области высокого содержания сухих веществ – его аномально большая вязкость и вероятность быстрого образования отложений [12, 14]. Вязкость черного щелока значительно возрастает при повышении содержания сухих веществ до 80...85 %.

Физические свойства сульфатного черного щелока влияют на выбор типа выпарного аппарата, условия его эксплуатации [11, 14, 15, 19]. Известно, что вязкость черных сульфатных щелоков при содержании сухих веществ до 30 % практически не зависит от вида сырья, породы древесины, режима варки и жесткости получаемой целлюлозы, поскольку увеличение степени провара целлюлозы, обусловленное более жесткими условиями варки, приводит к деструкции макромолекул лигнина на сравнительно низкомолекулярные фрагменты [1].

Физические свойства черного щелока напрямую зависят от плотности, вязкости, температуры кипения, поверхностного натяжения и теплоты сгорания [2]. Например, щелок температуры 90 °С с концентрацией сухих веществ 16 % имеет плотность 1050 кг/м³, а с концентрацией сухих веществ 70 % – 1430 кг/м³.

На основных стадиях регенерации щелоков в процессе выпарки контроль свойств черного щелока ведут по содержанию сухого вещества, изменяющему в зависимости от вида сырья, выхода полуфабриката, условий варки и других факторов, поэтому в каждом конкретном случае необходимо экспериментально определять индивидуальную зависимость между плотностью и содержанием сухого вещества в щелоке. Международной организацией TAPPI предложена корреляционная зависимость для определения плотности щелока (ρ , г/см³) как функции от содержания сухих веществ и температуры [16, 18]:

$$\rho = 1,007 + 0,006x - 0,000495t, \quad (1)$$

где x – содержание сухих веществ, %; t – температура, °С.

Цель исследования – определение математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ при производстве сульфатной хвойной целлюлозы высокого выхода (ЦВВ).

Задачи исследования:

изучить влияние температуры и концентрации сухих веществ на плотность черного щелока, отбираемого в разных точках технологического процесса;

разработать математическую модель зависимости плотности черного щелока от концентрации и температуры;

сравнить результаты расчета плотности черного щелока по полученной математической зависимости и предложенной TAPPI [18].

Объекты и методы исследования

Работы по исследованию черного щелока от производства сульфатной хвойной ЦВВ выполнены в Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (г. Архангельск).

Отбор проб проводился в течение года на одном из ведущих целлюлозно-бумажных предприятий России. Точки отбора и содержание сухих веществ в пробах щелока представлены в таблице.

Содержание сухих веществ в пробах отработанных щелоков

Точка отбора	Проба	Концентрация сухих веществ, %
1	Щелок из испарительных циклонов	18...22
2	Смесь фильтратов с промывки ЦВВ и щелока с котла	10...16
3	Щелок из питательных баков (1)	15...20
4	Щелок из питательных баков (2)	18...22
5	Полуупаренный щелок	25...28
6	Полуупаренный щелок	28...32
7	Крепкий щелок	38...42
8	Крепкий щелок	48...52
9	Крепкий щелок после баков	52...54
10	Концентрированный щелок после концентраторов (1)	63...65
11	Концентрированный щелок после концентраторов (2)	65...68

Массовую долю сухих веществ определяли по методу ВНИИБ [9]. Калибровку лабораторной посуды перед проведением исследований осуществляли по ГОСТ 8.234–2013 [4].

Содержание сухих веществ (B , %) рассчитывали по формулам:

в плотном черном щелоке

$$B = ((q_2 - q_1)V100)/G; \quad (2)$$

в слабом черном щелоке

$$B = ((q_2 - q_1)100)/(\gamma_{15}V_1), \quad (3)$$

где q_1 – масса стаканчика с фильтром, г; q_2 – масса стаканчика с фильтром и сухим остатком, г; V – вместимость мерной колбы, см³; G – масса плотного щелока, г; γ_{15} – плотность щелока при 15 °С, г/см³; V_1 – объем щелока, взятый на анализ, см³.

Предельные границы относительной погрешности результатов измерений не превышают $\pm 0,5$ % при доверительной вероятности $p = 0,95$.

Плотность слабого, укрепленного и полуупаренного щелоков определяли поверенными ареометрами. Одновременно замеряли температуру щелока и найденные значения плотности щелока приводили к плотности при 15 °С:

$$\rho = \rho_t - 0,052(15 - t_{щ}), \quad (4)$$

где ρ_t – измеренная плотность щелока, г/см³; 0,052 – эмпирический коэффициент; $t_{щ}$ – фактическая температура щелока, °С.

Определив плотность черного щелока при 15 °С, можно по таблице [10] установить в нем массовую долю сухих веществ (%) и содержание общей щелочи в пересчете на Na₂O (г/л).

Статистическую обработку результатов измерений плотности проводили традиционно, при этом рассчитывали следующие параметры: среднее арифметическое результатов наблюдений; среднее квадратическое отклонение; коэффициент вариации; наличие грубых погрешностей; оценку среднего квадратического отклонения результата измерений; доверительные границы среднего квадратического отклонения результата измерения.

Для определения степени (уровня) зависимости результатов измерений друг от друга использовали коэффициент парной корреляции, для оценки значимости коэффициента корреляции – критерий Стьюдента. Если расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного $t > t_{1-\alpha k}$, то коэффициент корреляции следует признать значимым [6].

Плотность слабого, укрепленного и полуупаренного щелоков при комнатной температуре измеряли ареометром. Упаренный (или плотный) щелок имеет высокую вязкость, для снижения которой он должен быть предварительно нагрет до температуры 70...90 °С [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Опытным путем получены данные о влиянии содержания сухих веществ и температуры черного щелока на его плотность. Исследования проводили в диапазоне содержания сухих веществ от 10,00 до 64,20 % и при температурах от 15 до 90 °С.

Математическая обработка массива данных (состоящего из 2912 точек) методами регрессионного анализа позволила построить поверхность отклика плотности черного щелока от концентрации сухих веществ и температуры (рис. 1).

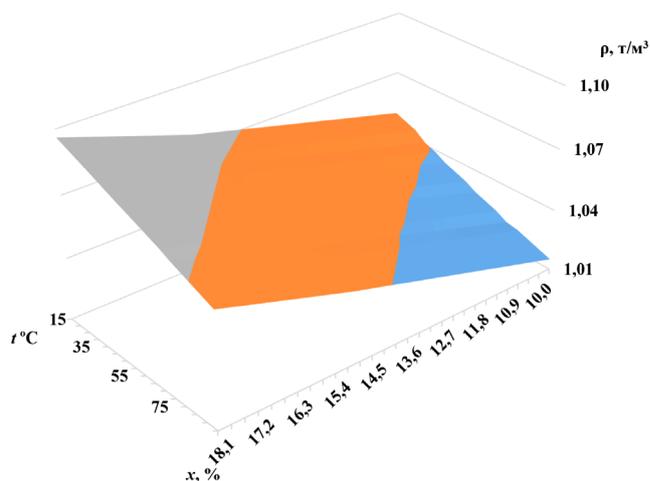


Рис. 1. Зависимость плотности черного щелока (ρ) от концентрации сухих веществ (x) и температуры (t) (варка хвойной ЦВВ)

Fig.1. Dependence of black liquor density (ρ) on dry matter content (x) and temperature (t) (high yield cooking of softwood pulp)

Регрессионный анализ (уровень доверительной вероятности – 0,95) показал, что наиболее адекватно влияние этих факторов описывается следующими уравнениями:

полином 1-й степени:

$$\rho = 0,994 + 0,006x - 0,0005t;$$

полином 2-й степени:

$$\rho = 0,974 + 0,0071x - 0,0002t - 0,000007xt - 0,00000045t^2 - 0,0000045x^2,$$

где ρ – плотность черного щелока, г/см³; x – содержание сухих веществ, %; t – температура, °С.

Коэффициент корреляции для полинома 1-й степени составляет 0,999, относительная погрешность определения – 0,21 %, для полинома 2-й степени – 1, относительная погрешность определения – 0,00001 %.

Таким образом, более точно зависимость можно описать полиномом 2-й степени, но даже при использовании полинома 1-й степени среднее отклонение между экспериментальными и расчетными значениями составляет 0,3 %. Однако в единичных случаях будет наблюдаться увеличение отклонения при высоких значениях температуры и содержания сухих веществ. Например, при температуре 15 °С и содержании сухих веществ 10,00 % плотность, рассчитанная по уравнению, составит 1,051 г/см³, в то время как значение, полученное практическим путем, – 1,049 г/см³; при температуре 90 °С и содержании сухих веществ 64,20 % имеем соответственно 1,360 и 1,344 г/см³. При использовании зависимости TAPPI, несмотря на то что среднее отклонение между практическими и расчетными значениями составляет 0,53 %, можно наблюдать значительные отклонения при невысоких температуре и концентрации сухих веществ. Например, при температуре 15 °С и содержании сухих веществ 10,00 % плотность, рассчитанная по уравнению, составит 1,060 г/см³, а экспериментальное значение – 1,049 г/см³. Подобные отклонения сохраняются при невысоких температурах (весь их диапазон) и при любых температурах, если концентрация сухого вещества в этом случае приблизительно до 21,00 %. Необходимо отметить, что, хотя полином 2-й степени обладает большей точностью, значение плотности, рассчитанное с помощью полинома 1-й степени, точнее согласуется с опытными данными в областях невысоких концентраций и температур.

Выводы

1. Плотность черного щелока от варки сульфатной хвойной ЦВВ незначительно уменьшается при повышении температуры от 15 до 90 °С и значительно увеличивается с ростом содержания сухих веществ.

2. Разработана математическая зависимость плотности сульфатного черного щелока от концентрации сухих веществ и температуры. Установлено, что математическая зависимость с достаточной точностью может быть описана полиномами 1-й и 2-й степени; для каждого вида уравнения рассчитаны коэффициенты корреляции и определены относительные погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М. и др. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с. [Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M. et al. *Processing of Sulphate and Sulphite Liquors*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p.]

2. Волков А.Д., Григорьев Г.П. Физические свойства щелоков целлюлозного производства. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 120 с. [Volkov A.D., Grigor'yev G.P. *Physical Properties of Pulp Production Liquors*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 120 p.]

3. Горбовский Б.Г. Устройство и обслуживание выпарных станций сульфат-целлюлозного производства: пособие для мастеров и выпарщиков. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. 189 с. [Gorbovskiy B.G. *Design and Maintenance of Evaporation Stations of Sulphate Pulp Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953. 189 p.]

4. ГОСТ 8.234–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Меры вместимости стеклянные. Методика поверки. Дата введ. 2015–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с. [*State Standard. GOST 8.234–2013. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Volumetric Glass Ware. Verification Procedure.* Moscow, Standartinform Publ., 2014. 11 p.]
5. Григорай О.Б., Иванов Ю.С., Комиссаренков А.А., Смолин А.С. Переработка черных щелоков сульфатного производства. СПб.: СПбГТУРП, 2012. 106 с. [Grigoray O.B., Ivanov Yu.S., Komissarenkov A.A., Smolin A.S. *Processing of Black Liquors of Sulphate Production.* Saint Petersburg, SPb STUPP Publ., 2012. 106 p.]
6. Гурьев А.В., Казаков Я.В., Комаров В.И., Хованский В.В. Практикум по технологии бумаги / под ред. проф. В.И. Комарова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. 112 с. [Gur'yev A.V., Kazakov Ya.V., Komarov V.I., Khovanskiy V.V. *Laboratory Course on Paper Technology.* Arkhangelsk, ASTU Publ., 2001. 112 p.]
7. Миловидова Л.А., Комарова Г.В. Производство сульфатной целлюлозы. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. 31 с. [Milovidova L.A., Komarova G.V. *Production of Sulphate Pulp.* Arkhangelsk, ASTU Publ., 2001. 31 p.]
8. Миловидова Л.А., Севастьянова Ю.В., Комарова Г.В., Дубовый В.К. Регенерация химикатов в производстве сульфатной целлюлозы (каустизация и регенерация извести). Архангельск: САФУ, 2010. 157 с. [Milovidova L.A., Sevastyanova Yu.V., Komarova G.V., Dubovyy V.K. *Recovery of Chemicals in the Production of Sulphate Pulp (Lime Caustization and Regeneration).* Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 157 p.]
9. Свидетельство № 411 о метрологической аттестации МВИ. Метод определения массовой доли сухих веществ в черном щелоке. ВНИИБ. Л., 1991. 4 с. [*Certificate No. 411 on Metrological Certification of Measurement Procedures. Method for Determining the Mass Fraction of Solids in Black Liquor.* All-Russian Scientific Research Institute of Pulp and Paper Industry, 1991. 4 p.]
10. Селянина Л.И., Селянина С.Б., Кутакова Н.А. Технология сульфатных щелоков. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 37 с. [Selyanina L.I., Selyanina S.B., Kutakova N.A. *Sulphate Liquor Technology.* Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 37 p.]
11. Справочник бумажника: в 3 Т. 2-е. изд. перераб. и доп. Т. 1. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 841 с. [*Handbook for Paper Industry Workers.* In 3 vol. Vol. 1. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 841 p.]
12. Элконин Н.В. Изучение свойств отработанных растворов производства целлюлозы сульфатным методом. М.: Бум. пром-сть, 1941. № 2. 21 с. [Elkonin N.V. *Study of Properties of Spent Solutions of Pulp Production by Kraft Method.* Moscow, Bumazhnaya promyshlennost' Publ., 1941, no. 2. 21 p.]
13. Adams T. Sodium Salt Scaling in Black Liquor Evaporators and Concentrators. *Tappi Journal*, 2001, vol. 84(6), pp. 1–18.
14. Andreuccetti M.T., Leite B.S., Hallak d'Angelo J.V. Eucalyptus Black Liquor – Density, Viscosity, Solids and Sodium Sulfate Contents Revisited. *O Papel*, 2011, vol. 72, no. 12, pp. 52–57.
15. Bayuadri C., Verril C.L., Rousseau R.W. Stability of Sodium Sulfate Dicarboxylate in Black Liquor Concentrators. *TAPPI Engineering, Pulping and Environmental Conference Proceedings.* TAPPI Press, 2006.
16. Bialik M.A., Theliander H., Sedin P., Verril C.L., DeMartini N. Solubility and Solid Phase Composition in Boiling-Temperature Na_2CO_3 – Na_2SO_4 Solutions: A Modeling Approach. *TAPPI Engineering, Pulping and Environmental Conference Proceedings.* TAPPI Press, 2007, pp. 1471–1498.
17. Cardoso M., Oliveira E.D., Passos M.L.A. Kraft Black Liquor of Eucalyptus from Brazilian Mills. *O Papel*, 2006, vol. 67, no. 2, pp. 57–83.

18. Clay D.T. Evaporation Principles and Black Liquor Properties. *TAPPI Kraft Recovery Short Course*. TAPPI, 2011, pp. 3.1-1–3.1-6. Available at: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/3-1.pdf> (accessed 18.03.20).

19. Holmlund K., Parviainen K. Evaporation of Black Liquor. Ch. 12. *Chemical Pulping*. Ed. by J. Gullichsen, C.-J. Fogelholm. Helsinki, Fapet Oy, 1999, pp. B37–B93.

DETERMINATION OF THE MATHEMATICAL DEPENDENCE OF THE BLACK LIQUOR DENSITY ON THE DRY MATTER CONTENT (HIGH YIELD SOFTWOOD PULP)

*Yuliya V. Sevastyanova*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

*Evgeniy A. Toptunov*¹, Engineer of the Innovative Facilities Engineering and Innovation Center «Advanced Northern Bioresources Processing Technologies»;

ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

*Natalia V. Shcherbak*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

*Pavel V. Solntsev*², Head of the CHPP-2 of Cardboard Production;

ResearcherID: [ABE-4402-2020](https://orcid.org/0000-0001-5992-6981), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-6981>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: y-sevastyanova@yandex.ru, zhenya.toptunow2011@yandex.ru, n.sisoeva@narfu.ru

²Arkhaneglsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk region, 164900, Russian Federation

Abstract. A modern evaporator station is an energy-saving production of evaporated liquor with high dry matter content for ensuring the minimum SO₂ emissions from the soda recovery boiler. Such stations are equipped with Falling Film devices and consist of 5–7 stages. The necessity to improve and create new black liquor concentrators is driven by the increased attention to environmental issues and the wish to produce liquor with a higher calorific value. The physical properties of black liquor depend on its composition and have a significant impact on the selection and design of evaporators. The main properties considered in the evaporation and combustion processes are density, viscosity, surface tension, heating value and boiling temperature. One of the most important characteristics of the liquor evaporation is its viscosity, since it determines the ability of the liquor to pump and affects the design features. Another equally important characteristic is density. With its help, the dry matter content and evaporation process in the main stages of the liquor regeneration are regulated. The study was carried out to determine the mathematical dependence of the black liquor density on the dry matter content for high yield softwood pulp. The study objectives were the following: analyze the effect of the dry matter temperature and concentration on the density of black liquor obtained from cooking high yield softwood pulp according to the technological flow of production; develop a mathematical model of dependence of the black liquor density of high yield sulphate softwood pulp on the concentration and temperature; conduct the TAPPI comparative testing of the results of mathematical and correlation dependences. A mathematical dependence of the black liquor density on the temperature and dry matter content required for immediate technological calculations of chemical regeneration departments in sulphate production of semi-finished products for cardboard was obtained. The following equation of mathematical dependence based on the conducted research, regression analysis, and mathematical processing of the results was obtained: $\rho = 0.974 + 0.0071x - 0.0002t - 0.000007xt - 0.00000045t^2 - 0.0000045x^2$ (where

ρ – density, g/cm³; x – dry matter content, %; t – temperature, °C). It allows calculating with the highest accuracy the density of black liquor obtained from cooking high yield softwood sulphate pulp. Comparative testing of the results of the developed mathematical dependence and correlation dependence (published by TAPPI) of black liquor density on the dry matter content was carried out. A high level of comparability of the proposed mathematical equations was found.

For citation: Sevastyanova Yu.V., Toptunov E.A., Shcherbak N.V., Solntsev P.V. Determination of the Mathematical Dependence of the Black Liquor Density on the Dry Matter Content (High Yield Softwood Pulp). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 192–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-192-200

Keywords: high yield sulphate pulp, chemical recovery, black liquor physical properties, dry matter content, black liquor density, evaporation, mathematical model.

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

Поступила 18.03.20 / Received on March 18, 2020
