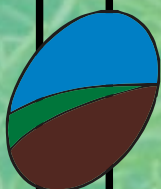


ISSN 1993-0135

ХВОЙНЫЕ

БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ



2024

Том XLII
Номер 1

<http://www.sibsau.ru>

Красноярск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLII
№ 1

Красноярск
2024

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLII, № 1

Журнал основан в 1962 г.
(до 2002 г. носил название «Лиственница»).

Выходит 6 раз в год

Главный редактор

Братилова Наталья Петровна, д.с.-х.н. профессор

Ответственный секретарь

Коротков Александр Анатольевич, к.с.-х.н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Авдеева Елена Владимировна, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Алашкевич Юрий Давыдович, д.т.н., профессор, академик Российской академии образования (РАО) (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Бабич Николай Алексеевич, д.с.-х.н., профессор (САФУ, Архангельск)
Бессчетнов Владимир Петрович, д.б.н., профессор (НГСХА, Нижний Новгород)
Верховец Сергей Владимирович, к.с.-х.н., доцент (Директор Проектного офиса НОЦ МУ «Енисейская Сибирь», Красноярск)
Выводцев Николай Васильевич, д.с.-х.н., профессор (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)
Ермолин Владимир Николаевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Залесов Сергей Вениаминович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Иванов Валерий Александрович, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Кобаяси Рёсукэ, к.с.-х.н. (Центр полевых биосферных исследований Севера, Университет Хоккайдо)
Козаков Яков Владимирович, д.т.н. (САФУ, Архангельск)
Крутовский Константин Валерьевич, профессор (Техасский агромеchanический университет, США)
Кузнецов Борис Николаевич, д.х.н., профессор (ИХХТ СО РАН, Красноярск)
Матвеева Римма Никитична, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Нагимов Зуфар Ягфарович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Нимц Петер, профессор (Институт строительных материалов и физики древесины (IfB) Высшей швейцарской технической школы (ETH), Цюрих, Швейцария)
Огурцов Виктор Владимирович, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Онучин Александр Александрович, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Пен Роберт Зусьевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Плотников Сергей Михайлович, д.т.н., профессор (ИрГУПС, Красноярск)
Прохоров Валерий Николаевич, д.б.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси (Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, Минск, Беларусь)
Рязанова Татьяна Васильевна, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Сафин Руслан Рушанович, д.т.н., профессор (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань)
Селиховкин Андрей Витимович, д.б.н., профессор (СПбЛТА им. Кирова, Санкт-Петербург)
Стороженко Владимир Григорьевич, д.б.н. (Институт лесоведения РАН, Москва)
Субоч Георгий Анатольевич, д.х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Суховольский Владислав Григорьевич, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Шевелев Сергей Леонидович, д.с.-х.н. профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Якубов Харис Галиулович, д.б.н., профессор (МГУ, Москва)

CONIFERS of the BOREAL AREA

Theoretical and Applied Research Journal

Volume XLII, No. 1

The journal was founded in 1962
(Prior to 2002 it had the title «Larch»).

Issued 6 times a year

Editor-In-Chief

Dr. Natalia P. Bratilova, Professor

Executive secretary

PhD. Aleksandr A. Korotkov, Associate Professor

EDITORIAL BOARD:

Avdeeva Elena V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Alashkevich Yuri D., Dr. Sc. in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Education (RAO) (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Babich Nikolay A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Besschetnov Vladimir P., Dr. Sc. in Biology, Professor (Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod)
Ermolin Vladimir N., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Ivanov Valery A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Kobayashi Ryosuke, Cand. Sc. in Agriculture, North Field Biosphere Research Center (Hokkaido University)
Kazakov Yakov V., Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Krutovsky Konstantin V., Professor (Texas A&M University, College Station, USA)
Kuznetsov Boris N., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Institute of Chemistry and Chemical Technology, Krasnoyarsk)
Matveeva Rimma N., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Nagimov Zufar Ya., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Niemz Peter, Professor (Institute for Building Materials and Wood Physics (IfB) at Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland)
Ogurtsov Victor V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Onuchin Alexandr A., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Pen Robert Z., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Plotnikov Sergey. M., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk)
Prokhorov Valery V., Dr. Sc. in Biology, Professor, Associate Member of the National Academy of Sciences of Belarus (Institute of experimental botany of NAS of Belarus, Minsk, Belarus)
Ryazanova Tatyana V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Safin Ruslan R., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Kazan National Research Technological University, Kazan)
Selikhovkin Andrey V., Dr. Sc. in Biology, Professor (Saint-Petersburg State Forest-Technical Academy)
Shevelev Sergei L., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Storojenko Vladimir G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Institute of Forest Sciences, Moscow)
Suboch Georgii A., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Soukhovolsky Vladislav G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Verkhovets Sergei V., Cand. Sc. in Agriculture, Docent (Director of the Project Office of the REC MU “Yenisey Siberia”, Krasnoyarsk)
Vyvodtsev Nikolay V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Pacific National University, Khabarovsk)
Usoltsev Vladimir A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Zalesov Sergey V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Yakubov Haris H. Dr. Sc. in Biology, Professor (Moscow State University, Moscow)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-70531 от 25 июля 2017 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Certificate of Registration as a Mass Media Resource.
Certificate: PI No. FC77-70531, dated 25 July 2017,
given by The Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media

Статьи в журнале публикуются бесплатно после обязательного рецензирования
и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.hbz.sibsau.ru).

Журнал выходит 6 раз в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки
(<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (<https://hbz.sibsau.ru/>)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала
«Хвойные бореальной зоны» ссылка обязательна

Номер подписного индекса в каталоге «Книга-Сервис» Е63087, «Пресса России» 63087

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

Адрес учредителя и издателя

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660037, Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31

Адрес редакции

Российская Федерация, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82, каб. ц-01а
Редакция журнала «Хвойные бореальной зоны»
Тел. (391) 266-03-96, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Address: Editorial office of the journal “Conifers of the Boreal Area”
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation.
Department of Forest Plantation
Phone: (391) 266-03-96, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Ответственный редактор А. А. Коротков.
Корректор П. С. Бороздов. Оригинал-макет и верстка Л. В. Звонаревой.

Подписано в печать 20.02.2024. Дата выхода в свет 11.03.2024. Формат 70×108/8.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 700 экз.
Заказ 3411. С 877/24. Цена свободная.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, Красноярский край, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rio@mail.sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.

Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660049, Красноярский край, г. Красноярск, просп. Мира, 82. Тел. (391) 222-73-28.

Содержание

БИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ, ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Вайс А. А., Андропова А. А., Попова В. В. Таксационные особенности роста и развития насаждений березы кустарниковой в условиях Средне-Сибирского плоскогорно-таёжного района	7
Сулейманов Т. И., Асадов Х. Г., Тахмазов Т. М. О возможности стабилизации усредненной величины надземной биомассы по вегетационному индексу при некоторой высоте деревьев	13
Матвеева Т. А. Особенности послепожарного возобновления сосны в горных лесах Южной Сибири	17
Безруких В. А., Авдеева Е. В., Коротков А. А., Лигаева Н. А., Кузнецова О. А. Распространение пашенного земледелия в бореальной зоне Приенисейской Сибири в период ее русского освоения	23
Щерба Ю. Е., Шенмайер Н. А., Коростелев А. С. Оценка 37-летних полусибов плюсовых деревьев сосны кедровой сибирской по образованию микростробилов	27
Титов Е. В. Влияние местоположения на рост и состояние внутривидовых гибридов кедра сибирского в Центральной лесостепи	31
Усольцев В. А., Плюха Н. И., Цепордей И. С. Отношение диаметра кроны к диаметру ствола: всеобщие модели лесообразующих видов Евразии	36
Чербаков Н. Н., Вараксин Г. С. Характеристика рода <i>Salix</i> и особенности фенологического развития некоторых видов в Норильском промышленном районе	43

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Криворотова А. И., Орлов А. А., Эскин В. Д. Оптимизация процесса термической обработки лушеного шпона для изготовления фанеры с повышенными потребительскими свойствами	51
Сиваков В. В. Цифровизация управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники	64
Баяндина М. М., Кустов А. В., Гончарова Я. С. Исследование коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи встроенного дефлегматора ректификационной колонны при переработке растительного сырья	72
Авторская ссылка	79

Contents

BIOLOGY AND ECOLOGY, FORESTRY

Vais A. A., Andronova A. A., Popova V. V. Taxation and forestry features of the growth and development of plantations of shrub birch under conditions of the Central Siberian plano-mountain-taiga region	7
Suleymanov T. I., Asadov H. G., Takhmazov T. M. The possibility of stabilisation of the average value of above-ground biomass by vegetation index at some tree height	13
Matveeva T. A. Features of post-fire renewal of pine in the mountain forests of Southern Siberia	17
Bezrukikh V. A., Avdeeva E. V., Korotkov A. A., Ligaeva N. A., Kuznetsova O. A. Development of arable agriculture in the boreal zone of the Yenisei Siberia during its russian exploration	23
Shcherba Iu. E., Shenmayer N. A., Korostelev A. S. Evaluation of 37-year-old siblings of plus trees of pinus sibirica du tour by the formation of microstrobiles	27
Titov E. V. Impact of location on growth and wealth of intra-specific hybrids of the siberian cedar in the central forest-steppe	31
Usoltsev V. A., Plyukha N. I., Tsepordey I. S. The ratio of crown diameter to stem diameter: generic models of forest-forming species of Eurasia	36
Cherbakova N. N., Varaksin G. S. Characterization of the genus <i>Salix</i> and peculiarities of phenological development of some species in the Norilsk industrial region	43

TECHNOLOGY OF HARVESTING AND MECHANICAL PROCESSING OF WOOD

Krivorotova A. I., Orlov A. A., Eskin V. D. Optimization of the process of heat treatment of cut-helled veneer for the production of plywood with increased consumer properties	51
Sivakov V. V. Digitalisation of the management system of maintenance and repair of forestry machines	64
Bayandina M. M., Kustov A. V., Goncharova Ya. S. Investigation of the heat transmission and heat transfer coefficients of the integrated deflegmator in distillation column during the processing of raw materials	72
Author's link	80

ТАКСАЦИОННО-ЛЕСОВОДСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РОСТА И РАЗВИТИЯ НАСАЖДЕНИЙ БЕРЕЗЫ КУСТАРНИКОВОЙ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕ-СИБИРСКОГО ПЛОСКОГОРНО-ТАЁЖНОГО РАЙОНА

А. А. Вайс, А. А. Андропова, В. В. Попова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vais6365@mail.ru

Береза кустарниковая или Ерник (*Betula fruticosa*) произрастает по долинам рек на избыточно переувлажненных участках. Научный интерес к данному растению обусловлен отсутствием информации о таксационных закономерностях произрастания и роста данного растения в условиях Сибири. Объект исследования – береза кустарниковая произрастает в Байкитском районе, территория Средне-Сибирского плоскогорья. На основе данных таксационных материалов лесоустройства Байкитского лесничества отобрано 95 выделов с произрастанием березы кустарниковой. Все участки характеризовались чистым составом. Качество условий произрастания – V^a класс бонитета. Березняк до 10 лет характеризовался таволго-багульниковым типом леса, осочково-сфагновый тип наблюдался в березняках 15–20 лет, а багульнико-сфагновый тип леса характерен для 30-их березняков. Ерники таволго-багульникового типа леса имели полноту 0,4–0,5. Березняк осочково-сфагнового типа характеризовался большим разнообразием полнот (0,5–1,0) с преобладанием высокополнотных зарослей. Кустарник багульнико-сфагнового типа развивается в полнотах 0,4–0,5. На основе эмпирических формул получена табличная форма показателей высот и диаметров, а также значений прироста по возрастам березы кустарниковой в условиях Средне-Сибирского плоскогорья. Можно констатировать, что условия местопроизрастания определяют долговечность и размерные параметры ерников. Максимальные параметры ерника характеризуют критические условия существования древесного растения: возраст – 30 лет; высота – 5 м; диаметр – 4 см; полнота – 1,0. Текущий прирост ерников по высоте и диаметру превышает средний прирост, что указывает на устойчивый рост берёзы кустарниковой в районе исследований. Отсутствие старших возрастных групп березняков обусловлено процессами изменения климатических условий (таяние мерзлоты), что вызывает гибель зарослей.

Возрастная, типологическая и размерная структура березняков кустарниковых в значительной степени зависит от условий местопроизрастания и климатических характеристик территории.

Ключевые слова: *Betula fruticosa*, таксационные особенности, тип леса, высота, диаметр, развитие.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 7–12

TAXATION AND FORESTRY FEATURES OF THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF PLANTATIONS OF SHRUB BIRCH UNDER CONDITIONS OF THE CENTRAL SIBERIAN PLANO-MOUNTAIN-TAIGA REGION

A. A. Vais, A. A. Andronova, V. V. Popova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: vais6365@mail.ru

Shrub birch or Yernik (*Betula fruticosa*) grows along river valleys in excessively waterlogged areas. Scientific interest in this plant is due to the lack of information on taxation patterns of vegetation and growth of this plant in Siberia. Shrub birch growing in the Baikit region, the territory of the Central Siberian Plateau is the object of the study. Based on the taxation data of the forest inventory of the Baikitsky forestry, 95 sections with the growth of birch shrub were selected. All plots were characterized by a clean composition. The quality of the growing conditions is V^a bonitet class. A birch forest up to 10 years old was characterized by a meadowsweet-ledum forest type, a sedge-sphagnum type was observed in birch forests of 15–20 years old and a rosemary-sphagnum forest type is characteristic of 30 years old birch forests. Yerniki of meadowsweet-ledum forest type had a density of 0.4–0.5. The birch forest of the sedge-

sphagnum type was characterized by a wide variety of density (0.5–1.0) with a predominance of high-density thickets. Shrub of rosemary-sphagnum type develops in fullness of 0.4–0.5. On the basis of empirical formulas, a tabular form of indicators of heights and diameters, as well as the values of growth by age of shrub birch in the conditions of the Central Siberian Plateau, was obtained. It can be stated that the conditions of the place of growth determine the longevity and dimensional parameters of Shrub birch. The maximum parameters of Shrub birch characterize the critical conditions for the existence of a woody plant: age – 30 years; height – 5 m; diameter – 4 cm; fullness – 1.0. The current growth of Shrub birch in height and diameter exceeds the average growth, which indicates a steady growth of shrub birch in the study area. The absence of older age groups of birch forests is due to the processes of changing climatic conditions (permafrost thawing), which causes the death of thickets.

The age, typological and size structure of shrub birch forests depends largely on the habitat conditions and climatic characteristics of the territory.

Keywords: *Betula fruticosa*, taxation features, forest type, height, diameter, development.

ВВЕДЕНИЕ

Береза кустарниковая или Ерник (*Betula fruticosa*) (рис. 1) произрастает по долинам рек на избыточно переувлажненных участках.

Стандартная высота кустарника 0,75–2,5 м. На участках по берегам рек деревья могут составлять и большую высоту, диаметр стволика 2–5 см [1].

Научный интерес к данному растению обусловлен отсутствием информации о таксационных закономерностях произрастания и роста данного растения в условиях Сибири. При этом ботанические особенности кустарника представлены в литературе в достаточной мере [2; 3; 4; 5].

Целью исследования является изучение особенностей развития и роста берёзы кустарниковой на основе таксационных показателей зарослей ерника по данным материалов лесоустройства.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ

Объект исследования береза кустарниковая произрастает в Байkitском районе. Он расположен в пределах Средне-Сибирского плоскогорья. Границами являются водоразделы р. Подкаменной Тунгуски и Ангары.

Территория имеет пересеченный характер: с перепадами высот, с многочисленными сопками, ущельями. Формирование растительного покрова концентрируется по высотным отметкам и экспозициям склонов. На территории преимущественно произрастают лиственничные и сосновые насаждения, а также смешанные темнохвойные и лиственничные массивы. В напочвенном покрове доминируют зеленые мхи и лишайники. В многочисленных котловинах располагаются торфяные болота со слабо развитой древесной растительностью.

Среднегодовая температура воздуха составляет 6,5°. Среднегодовое количество осадков 526 мм. Продолжительность безморозного периода 69 дней [6]. Период вегетации 100 дней.

Характерная особенность почв района заключается в мерзлотном состоянии. В результате в равнинных условиях наблюдается постоянная и высокая влажность. В нижних горизонтах наблюдаются признаки оглеения. Самыми распространенными почвами на территории Байkitского района являются дерново-карбонатные, таежные торфянисто-перегнойные, буро-таежные иллювиально-гумусовые и буро-таежные почвы. Леса занимают около 70 % всей площади [7].

В северных районах, условиях лесотундры произрастает карликовая форма березы (*Betula nana* L.). Редукция роста и формирования скелетных ветвей позволяет этому растению достаточно длительный период развиваться в суровых условиях низких температур, а также активно вегетативно размножаться [8].



Рис. 1. Заросль березы кустарниковой

По наблюдениям Полозовой Т. Г. [9] карликовая береза может образовывать как густой подлесок в лиственничном редколесье, так и формировать доминирующие заросли в за торфованных долинах п. Таймыр.

Сэкулич И. Р. [10] изучила эколого-биологические особенности и жизненную стратегию *Betula fruticosa* Pall. в зависимости от эколого-ценотических условий на территории Витимского плоскогорья.

В монографии «Береза: вопросы изменчивости» А. В. Ветчинникова [11] отмечала, что в условиях Финноскандинавии сформировались уникальные формы березы с наследственными изменениями в текстуре древесины (карельская береза *Betula pendula* Roth var. *carelia*) и форме листовой пластинки (далекарлийская береза *Betula pendula* Roth var. *dalecarlica*). В более поздней публикации автор констатирует, что карельскую березу необходимо считать самостоятельным таксономическим видом [12].

Анализ литературы позволяет утверждать, что та или иная форма березы обусловлена уникальными и абсолютно индивидуальными условиями произрастания, которые обусловлены комплексом климатических и почвенных условий.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе данных таксационных материалов лесоустройства Байкитского лесничества (2010 года) отобрано 95 выделов с произрастанием берёзы кустарниковой. Все участки характеризовались чистым составом. Качество условий произрастания V^a класс бонитета. При этом следует отметить, что типологическая структура ерников соответствовала возрастной структуре. Березняк до 10 лет характеризовался таволгобагульниковым типом леса, осочково-сфагновый тип наблюдался в березняках 15–20 лет, а багульниково-сфагновый тип леса характерен для 30-их березняков. Ерники таволгобагульникового типа леса имели полноту 0,4–0,5. Березняк осочково-сфагнового типа характеризовался большим разнообразием полнот (0,5–1,0) с преобладанием высокополнотных зарослей. Кустарник багульниково-сфагнового типа имеет полноту 0,4–0,5. Размерные показатели ерников соответствовали их возрастной структуре (до 10 лет – средняя высота 1 м, до 20 лет – 2 м и у 30 летних березняков высота 4–5 м, при диаметре 2–4 см). Запас всех насаждений составлял 10 м³/га.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние показатели таксационных показателей ерников по учитываемому спектру таксационных показателей представлен в табл. 1.

С учётом размерных показателей берёзы учитываемое число таксационных показателей по материалам лесоустройства ограничено. В связи с этим в дальнейшем анализировались четыре количественных показателя: возраст, средняя высота, средний диаметр

и полнота. Запас и бонитет ерников имел одинаковые значения, соответственно 10 м³/га и V^a класс бонитета. Ряд признаков являлись качественными и характеризовали общие условия роста: тип леса и описание почвенных условий.

Средние показатели берёзы кустарниковой следующие: возраст – 16 лет; высота – 1,9 м; диаметр – 2,6 см; полнота – 0,66. Максимальные параметры ерника характеризуют критические условия существования древесного растения: возраст – 30 лет; высота – 5 м; диаметр – 4 см; полнота – 1,0. Варьирование признаков большое по шкале М. Л. Дворецкого (более 25 %). Точность опыта указывает на репрезентативность данных, кроме диаметра, из-за ограниченности данных (фиксировался диаметр только с возраста 20 лет) (табл. 1).

Как констатировалось ранее, существует определённая связь между типологической и возрастной структурой ерников. Исходя из этого, проанализированы материалы лесоустройства для установления условий произрастания берёзы кустарниковой различного возраста (табл. 2).

Процесс развития ерников указывает на возрастную приуроченность типологической структуры березняков, что возможно связано с климатическими изменениями. Лесовозобновление происходит на влажных почвах (ерник таволгобагульниковый), но мере роста интенсивно происходит процесс таяния мерзлотных почв и березняки развиваются на мокрых почвах (ерник багульниково-сфагновый) (табл. 2). Обводнение корневой системы возможно и приводит к гибели древесных растений.

Таблица 1

Статистический анализ массива данных таксационных показателей березняков

Таксационные показатели	$X_{cp} \pm m_x$	σ	Минимум	Максимум	V, %	P, %
Возраст, лет	16 $\pm$ 1	5	10	30	29,6	3,0
Высота, м	1,9 $\pm$ 0,07	0,67	1	5	36,1	3,7
Диаметр, см	2,6 $\pm$ 0,31	0,97	2	4	37,2	11,8
Полнота	0,66 $\pm$ 0,020	0,191	0,4	1,0	28,9	3,0

Примечание: X_{cp} – среднее значение; σ – стандартное отклонение; m_x – основная ошибка; V – коэффициент варьирования, %; P – точность опыта, %. Оценки получены при уровне доверительной вероятности 95,4 %.

Таблица 2

Возрастные особенности ерников различных типов леса

Класс возраста	Таксационная характеристика	Особенности насаждения
Ерник таволгобагульниковый		
До 10 лет	По составу берёзовые насаждения чистые. Подлесок: шиповник редкий. Почва: болотно-глеевая, сильносуглинистая, влажная. Бонитет насаждений: V ^a	C ₃
Ерник осочково-сфагновый		
11–20 лет	По составу берёзовые насаждения чистые. Подлесок: шиповник средней густоты. Почва: торфяно-глеевая, тяжелый суглинок, влажная. Бонитет насаждений: V ^a	C ₃
Ерник багульниково-сфагновый		
21–30 лет	По составу берёзовые насаждения чистые. Подлесок отсутствует. Почва: торфяно-болотная, среднесуглинистая, мокрая. Бонитет насаждений: V ^a	C ₃
Особенности размещения ерников: в прибрежных полосах, на открытом месте, участки с наличием единичных деревьев.		

В дальнейшем изучались связи роста высот и диаметров березняков с возрастом с целью понимания размерных и приростных показателей зарослей. На основе исходных данных построены две диаграммы: связь высоты и возраста (рис. 2); высоты и полноты (рис. 3). Максимальная вариация высот наблюдалась при минимальных полнотах (0,4–0,5). Возрастающий тренд характерен для связи средних высот и возраста ерника.

Зависимости средних высот (H) и средних диаметров (D) от возраста (A) аппроксимировались следующими уравнениями:

$$H = 0,6213 * \exp(0,0663 * A),$$

$$A = 10-30 \text{ лет}, R^2 = 0,76, \quad (1)$$

$$D = 0,15 * A - 1, A = 20-30 \text{ лет}, R^2 = 0,64. \quad (2)$$

В дальнейшем с помощью статистического анализа получены основные статистики по трем возрастным периодам: до 10, 11–20, 21–30 лет и типам леса (табл. 3).

Из-за низкой точности фиксации размерных показателей ерников и незначительной величины параметров, полный перечень статистик получен только в ерниках 21–30 лет (табл. 3). Достоверные статистики определены только для средней высоты.

На основе формул (1), (2) составлена табличная форма показателей высот и диаметров, а также значений прироста по возрастам березы кустарниковой в условиях Средне-Сибирского плоскогорья (табл. 4). Все расчёты среднего и текущего прироста выполнены на основе стандартных таксационных формул [12].

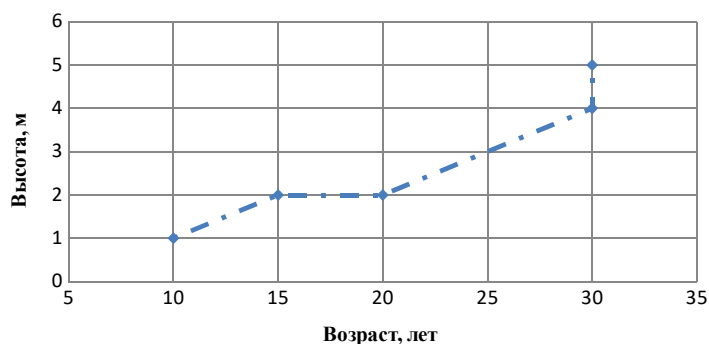


Рис. 2. Связь средней высоты и возраста ерника

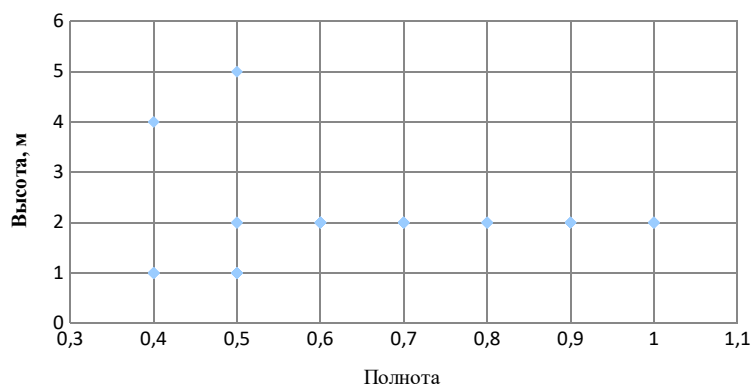


Рис. 3. Связь средней высоты и полноты ерника

Таблица 3
Статистические показатели ерников кустарниковых

Таксационные показатели	Статистический показатель				
	X_{cp}	σ	m_x	V, %	P, %
Ерник таволго-багульникового типа леса (до 10 лет)					
Средняя высота, м	1,0	—	—	—	—
Средний диаметр, см	—	—	—	—	—
Запас, м ³ /га	10	—	—	—	—
Ерник осочково-сфагнового типа леса (11–20 лет)					
Средняя высота, м	2,0	—	—	—	—
Средний диаметр, см	—	—	—	—	—
Запас, м ³ /га	10	—	—	—	—
Ерник багульниково-сфагнового типа леса (21–30 лет)					
Средняя высота, м	4,3	0,5	0,25	11,6	5,8
Средний диаметр, см	3,5	1,0	0,5	28,6	14,3
Запас, м ³ /га	10	—	—	—	—

Примечание. Оценки получены при уровне доверительной вероятности 95,4 %.

Таблица 4

Высота, диаметр, прирост по возрастным периодам берёзы кустарниковой в условиях Средне-Сибирского плоскогорья

Возраст, лет	Высота, м	Прирост в высоту, м		Диаметр, см	Прирост по диаметру, см	
		средний	текущий		средний	текущий
10	1,2	0,12	—	—	—	0,15
11	1,3	0,12	0,08	—	—	
12	1,4	0,11	0,09	—	—	
13	1,5	0,11	0,09	—	—	
14	1,6	0,11	0,11	—	—	
15	1,7	0,11	0,11	—	—	
16	1,8	0,11	0,12	—	—	
17	1,9	0,11	0,12	—	—	
18	2,1	0,11	0,13	—	—	
19	2,2	0,12	0,14	—	—	
20	2,3	0,12	0,15	2,0	0,10	
21	2,5	0,12	0,16	2,2	0,10	
22	2,7	0,12	0,17	2,3	0,10	
23	2,9	0,12	0,18	2,5	0,11	
24	3,1	0,13	0,20	2,6	0,11	
25	3,3	0,13	0,21	2,8	0,11	
26	3,5	0,13	0,22	2,9	0,11	
27	3,7	0,14	0,24	3,1	0,11	
28	4,0	0,14	0,26	3,2	0,11	
29	4,3	0,15	0,27	3,4	0,12	
30	4,5	0,15	0,29	3,5	0,12	

Данные свидетельствуют о превышении текущего над средним приростом. По высоте эта закономерность начинается с 16 лет, по диаметру с момента наблюдений, то есть с 20 лет. Результаты указывают на то, что отсутствие зарослей старше 30 лет обусловлено не естественными процессами старения берёзы кустарниковой, а обусловлено изменениями условий произрастания, когда таяние мерзлоты вызывает обводнение корневой системы и гибель растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований получен ряд выводов.

– Можно констатировать, что условия местопроизрастания определяют долговечность и размерные параметры ерников.

– Максимальные параметры ерника характеризуют критические условия существования древесного растения: возраст – 30 лет; высота – 5 м; диаметр – 4 см; полнота – 1,0.

– В условиях Средне-Сибирского плоскогорья ерник таволго-болотникового типа леса на болотно-глеевых почвах ограничен возрастом 10 лет, средней высотой 1,2 м и средним диаметром 0,5 см; берёзняк осочково-сфагнового типа леса на торфяно-глеевых почвах характеризуется предельным возрастом до 20 лет, средней высотой 2,3 м и средним диаметром 2,0 см; ерник багульниково-сфагнового типа леса на торфяно-болотных почвах имеет максимальный возраст 30 лет, среднюю высоту 4,5 м, средний диаметр 3,5 см.

– Текущий прирост ерников по высоте и диаметру превышает средний прирост, что указывает на устойчивый рост берёзы кустарниковой в районе исследований.

– Отсутствие старших возрастных групп берёзняков, по нашему мнению, обусловлено процессами изменения климатических условий (таяние мерзлоты), что вызывает гибель зарослей.

Возрастная, типологическая и размерная структура берёзняков кустарниковых в условиях таёжной зоны Средне-Сибирского плоскогорья в значительной степени зависит от условий местопроизрастания и климатических характеристик территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Соколов С. Я. Деревья и кустарники СССР. Дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции. М.-Л. : АН СССР, 1951. Т. II. 612 с.
- Ермаков В. И. Механизмы адаптации берёзы в условиях Севера. Л. : Наука, 1986. 144 с.
- Лесная энциклопедия Берёза. М. : Советская энциклопедия, 1985. Т. 1. С. 68–73.
- Яблоков А. С. Селекция древесных пород. М. : Сельхозиздат, 1962. 487 с.
- Чубанов К. Д. Изучение форм берёзы бородавчатой и пушистой Северной части БССР : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Минск, 1969. 35 с.
- Elib.kspu.ru>get/18632.
- Келлер В. А. Принципы организации хозяйства в лесах юга Эвенкии : автореф. дис. ... канд. сельс. наук: 06.03.02. Красноярск, 2007. 20 с.
- Лосик Г. И. Особенности развития карликовой берёзы (*Betula nana* L.) в лесотундре Таймыра // Биологические ресурсы Крайнего Севера: изучение и использование : сб. науч. тр. С.-П. : СПГУАП, 2010. С. 77–86.
- Сэкулич И. Р. Эколого-биологические особенности, ценотическая роль и жизненная стратегия *Betula fruticosa* Pall на Витимском плоскогорье : авто-

реф. дис. ... канд. биол. наук по спец. 03.00.16. Улан-Удэ, 2000. 22 с.

10. Ветчинникова Л. В. Береза: вопросы изменчивости. М. : Наука, 2004. 183 с.

11. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 1. С. 26–48.

12. Анучин Н. П. Лесная таксация : учебник для вузов. М. : Лесн. пром-ть, 1982. 550 с.

REFERENCES

1. Sokolov S. Ya. Trees and shrubs of the USSR. Wild, cultivated and promising for introduction. Moscow : USSR Academy of Sciences, 1951. Vol. II. 612 p.

2. Ermakov V. I. Mechanisms of adaptation of birch and conditions of the North. L. : Nauka, 1986. 144 p.

3. Forest encyclopedia Birch. M. : Soviet Encyclopedia, 1985. Vol. 1. Pp. 68–73.

4. Yablokov A. S. Selection of tree species. M. : Agricultural Publishing house, 1962. 487 p.

5. Chubarov K. D. Studying the forms of birch warty and fluffy in the Northern part of the BSSR : abstract. diss. cand. biol. sciences. Minsk, 1969. 35 p.

6. Elib.kspu.ru>get/18632.

7. Keller V. A. Principles of the organization of the economy in the forests of the south of Evenkia: abstract. dissert. cand. rural sciences: 06.03.02. Krasnoyarsk, 2007. 20 p.

8. Losik G. I. Features of the development of dwarf birch (*Betula nana* L.) in the Taimyr forest tundra // Biological resources of the Far North: study and use : collection of scientific tr. S.P. : SPSUAP, 2010. Pp. 77–86.

9. Sekulich I. R. Ecological and biological features, cenotic role and life strategy of *Betula fruticosa* Pall on the Vitim plateau : abstract. for the degree of uch. art. cand. biol. sciences on spec. 03.00.16. Ulan-Ude, 2000. 22 p.

10. Vetchinnikova L. V. Birch: questions of variability. M. : Nauka, 2004. 183 p.

11. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Karelian birch: a variety or an independent species // Forest Journal. 2020. No. 1. Pp. 26–48.

12. Anuchin N. P. Lesnaya taksaciya: uchebnik dlya vuzov. M. : Lesn. prom-t', 1982. 550 s.

© Вайс А. А., Андропова А. А.,
Попова В. В., 2024

Поступила в редакцию 10.02.2023
Принята к печати 22.01.2024

О ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ УСРЕДНЕННОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ ПО ВЕГЕТАЦИОННОМУ ИНДЕКСУ ПРИ НЕКОТОРОЙ ВЫСОТЕ ДЕРЕВЬЕВ**Т. И. Сулейманов, Х. Г. Асадов, Т. М. Тахмазов**Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана
Азербайджанская Республика, AZ 1115, г. Баку, ул. Ахундова Сулеймана Сани, 1

Статья посвящена модельному анализу изменения надземной массы деревьев в лесу в расчете на одно дерево при изменении высоты деревьев и нормализованного разностного вегетационного индекса. Показано, что надземная масса деревьев в среднем растет с увеличением значения индекса NDVI. Однако при этом существует определенная высота деревьев, при которой надземная масса деревьев не изменяется по NDVI. Дано модельное обоснование этого явления, названного эффектом «стабилизации массы деревьев определенной высоты при увеличении вегетационного индекса».

Ключевые слова: вегетационный индекс, надземная масса, стабилизация, высота деревьев, чувствительность.

*Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 13–16***THE POSSIBILITY OF STABILISATION OF THE AVERAGE VALUE OF ABOVE-GROUND BIOMASS BY VEGETATION INDEX AT SOME TREE HEIGHT****T. I. Suleymanov, H. G. Asadov, T. M. Takhmazov**National Aerospace Agency of Azerbaijan
1, Akhundov Suleiman Sani str., Baku, AZ 1115, Azerbaijan Republic

The article is devoted to the model analysis of changes in the above-ground mass of trees in the forest per one tree under changes in tree height and normalised difference vegetation index. It is shown that the above-ground mass of trees on average rises with increasing NDVI index value. However, there is a certain height of trees at which the above-ground mass of trees does not change according to NDVI. A model explanation of this phenomenon, called the effect of “stabilisation of tree mass of a certain height with increasing vegetation index”, is given.

Keywords: vegetation index, above-ground mass, stabilisation, tree height, sensitivity.

ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в работе [1], дистанционное зондирование является революционным направлением в изучении лесов. Средства и методы дистанционного зондирования позволяют выработать новые инструменты для проведения измерений различных показателей деревьев в лесу. Согласно [1], создание глобальной базы данных для большого множества деревьев, включающей информацию о показателях этих деревьев позволяет разрабатывать обобщенные модели для оценки и предсказания таких показателей как диаметр и надземная биомасса. При этом дистанционно измеренные высота дерева и диаметр кроны позволяют, используя эти модели, предсказывать количество надземной биомассы и определить диаметр ствола дерева.

Согласно [2], наличие надежных математических моделей совместно с данными, извлекаемыми со спутниковых снимков, позволяет оценить глобальный углеродный запас на планете и составлять соответствующие карты расположения биомассы. Как отмечается в работе [3], дистанционные измерения также важны

для обеспечения надежного и поддерживаемого развития экосистемы городской среды. Средства и методы дистанционного зондирования вполне пригодны для проведения соответствующих измерений в лесопарковых участках, расположенных в пределах урбанизированных зон. Данные о количестве надземной биомассы, полученные от спутниковых средств должны быть откалиброваны и пройти валидацию. С этой целью широко могут быть использованы лазерные сканеры, установленные на БПЛА. Подобная мысль поддержана в работе [4], согласно которой все результаты работ, полученные по таким спутниковым исследовательским программам, как BIOMASS, GEDI, NISAR, ALOS-4 должны быть точным образом откалиброваны и валидифицированы по части определения количества надземной биомассы. Согласно [3], были разработаны различные методы для оценки надземной биомассы на больших растительных участках с различной точностью. Традиционные методы, практикуемые в лесной инвентаризации включают измерение диаметра «на высоте груди» дерева с совместным использованием моделей масштабирования (ASM) [3].

Согласно [5], точная оценка надземной биомассы важна для изучения глобального углеродного цикла и может быть реализована с использованием спектральной и структурной информации относящейся кроне деревьев, получаемой методами дистанционного зондирования. В последние десятилетия быстрое развитие технологий дистанционного зондирования привело к разработке различных методов по определению количества надземной биомассы по спутниковым изображениям. Были построены регрессионные уравнения, связывающие полевые оценки надземной биомассы и вегетационные индексы, полученные методами дистанционного зондирования, такие как NDVI [2; 3; 6; 7]. Вместе с тем, точность таких оценок не лучше 10 %, что связано с неопределенностью, вызванной невысокой точностью дистанционных методов измерения. В работе [8] отмечается, что одним из важных показателей древостоя является количество стволов, имеющихся в древостое, в расчете на один гектар.

Учитывая результаты, полученные различными исследователями в области определения количества надземной биомассы в расчете на один га (AGB) в зависимости от высоты деревьев и индекса NDVI, а также количества стволов (SN), также приходящих на один га площади древостоя в зависимости от NDVI, нами была поставлена задача определения зависимости AGB в расчете на одно дерево от NDVI и высоты деревьев (TH). Согласно [8], использование метода Анализа Линейной Смеси Спектров (LSMA) позволило более точно определить количество стволов в древостое, в расчете на один гектар, на восьми типичных лесных участках Германии, с использованием радиометрически скорректированных снимков Landsat-5 TM. При этом учитывались спектры отражения таких компонентов, как почва, подстилка, растительность и кора деревьев, а также влияние тени. Регрессионное уравнение зависимости SN от NDVI имеет следующий вид [8]

$$+N = \exp(8,5456 \times \text{NDVI} - 0,3268). \quad (1)$$

С учетом вышеизложенных результатов, полученных в работах [5] и [8] задача исследования формулируется следующим образом: (1) Следует определить величину надземной биомассы, приходящей в среднем на одного дерева; (2) определить среднюю высоту деревьев, при котором чувствительность средней величины надземной биомассы к изменениям вегетационного индекса равна нулю.

$$S_m = \frac{dm_{\text{cp}}}{d(\text{NDVI})} = \frac{a_1 \text{TH}^{b_1 \cdot \text{NDVI}} \cdot (\ln \text{TH}) \cdot b_1 \times (\exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2)) - c_1 \cdot \exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2) \times a_1 \text{TH}^{b_1 \cdot \text{NDVI}}}{[\exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2)]^2}. \quad (5)$$

Согласно первой выше обозначенной задаче следует вычислить надземную биомассу одного дерева m_{cp} :

$$m_{\text{cp}} = \frac{\text{AGB} \left(\frac{\text{T}}{\text{га}} \right)}{\text{SN}(\text{га})}. \quad (2)$$

Согласно второй задаче следует вычислить чувствительность m_{cp} к значению вегетационного индекса (S_m):

$$S_m = \frac{dm_{\text{cp}}}{d(\text{VI})}. \quad (3)$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно [5], разработанный в этой работе новый подход к моделированию количества AGB базировался на аллометрических связях показателей леса с использованием математических выражений для интегрирования структурной и спектральной информации. На участке с площадью 60 км² с помощью лидаров, установленных на дронах были проведены 1370 измерений на 4-х подучастках представляющих собой четыре типичных лесных типов, существующих в Китае (хвойный лес, субтропический широколиственный лес, смешанный участок этих двух типов и тропический широколиственный лес). Параллельно, также были использованы снимки, полученные от Sentinel-2.

Проведенный анализ показал, что наиболее полезной универсальной метрикой являются средняя высота кроны и вегетационный индекс NDVI. Основные результаты, проведенных в [5] измерений приведены в таблице.

Отметим, что в таблице применены следующие обозначения: TH – средняя величина общей высоты деревьев; VI – индекс NDVI.

В соответствии с формулами (1) и (2) получим

$$m_{\text{cp}} = \frac{a_1 \cdot \text{TH}^{b_1 \cdot \text{NDVI}}}{\exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2)}, \quad (4)$$

где $a_1 = 1,08$; $b_1 = 2,5641$; $c_1 = 8,5456$; $c_2 = 0,3268$.

Очевидно, что для проведения конкретных расчетов m_{cp} следует сначала определить значение NDVI, а также общую высоту TH деревьев. Опустив вопрос о вычислении NDVI из измерения высоты деревьев, рассмотрим вторую задачу исследования.

В соответствии с (2) и выражениями (1) и (3) получим:

Модели и средние значения для вычисления надземной биомассы для различных типов лесов

Древостой №	Тип леса	Модель	AGB (средняя величине)
1	смешанный: хвойный + широколиственный лес	$\text{AGB} = 1,08 \text{TH}^{2,56 \text{VI}}$	274,47 тон/га
2	–	–	440,57 тон/га
3	–	–	188,14 тон/га
4	хвойный лес	$\text{GB} = 3,63 \text{TH}^{1,89 \text{VI}}$	47,91 тон/га

Из (5) имеем:

$$S_m = \frac{a_1 TH^{b_1 \cdot NDVI} \cdot (\ln TH) \cdot b_1}{\exp(c_1 \cdot NDVI - c_2)} - \frac{c_1 a_1 TH^{b_1 \cdot NDVI}}{\exp(c_1 \cdot NDVI - c_2)} =$$

$$= \frac{a_1 TH^{b_1 \cdot NDVI} [a_1 (\ln TH) b_1 - c_1 a_1]}{\exp(c_1 \cdot NDVI - c_2)}. \quad (6)$$

Как видно из (6), при условии

$$\ln TH = \frac{c_1}{b_1}. \quad (7)$$

получаем $S_m = 0$.

Следовательно, при условии (7) крутизна S_m равна нулю, т. е. перестает расти m_{cp} .

Это означает существование такой группы деревьев с высотой

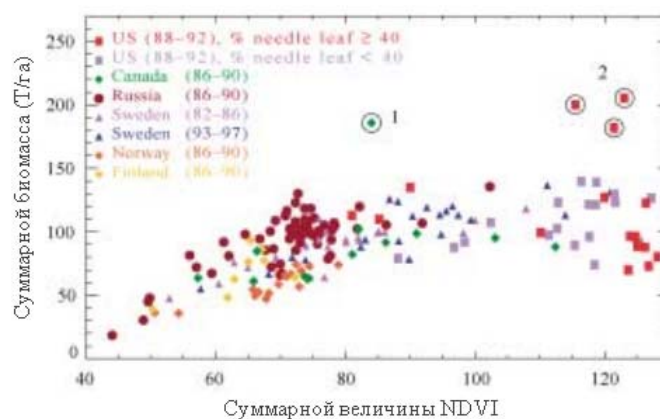
$$TH = \exp\left(\frac{c_1}{b_1}\right). \quad (8)$$

масса которых не изменяется при изменении значения NDVI.

С учетом $c_1 = 8,5456$; $b_1 = 2,5641$, получаем высоту стабилизации

$$TH = \exp\left(\frac{8,54}{2,56}\right) = 28 \text{ м.}$$

Таким образом, согласно вышеприведенному модельному анализу при высоте деревьев равной 28 м средняя надземная биомасса в расчете на одно дерево не зависит от значения NDVI и стабилизируется.



Скатерограмма зависимости суммарной биомассы от суммарной величины NDVI по смешанным лесам из восьми стран

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что надземная масса деревьев в среднем растет с увеличением значения индекса NDVI. Однако при этом существует определенная высота деревьев, при которой надземная масса деревьев не изменяется по NDVI. Дано модельное обоснование этого явления, названного эффектом «стабилизации массы деревьев по высоте при увеличении вегетационного индекса». Косвенное подтверждение эффекта стабилизации массы дерева можно увидеть на скатерограмме, представленной на рис. 1. [9], где представлены соответствующие усредненные данные по смешанным лесам из 8 стран. Как видно из рисунка при росте суммарной величины NDVI происходит стабилизация значения массы в интервале (90–110). Дальнейшее уменьшение суммарной биомассы может быть объяснено тем, что анализ, проведенный в [9] не учитывает условие неизменности высоты деревьев в рассматриваемом древостое.

REFERENCES

1. Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F., Dalponte M., Ewijk K. Y. V., Forrester D. I., Haeni M., Higgins S. I., Holdaway R., Iida Y., Lorimer C., Marshall P. L., Momo S., Moncrieff G. R., Ploton P., Poorter L., Rahman K., Schlund M., Sonke B., Sterck F. J.,

Trugman A. T., Usoltsev V. A., Vanderwel M. C., Waldner P., Wedeux B. M. M., Wirth C., Woll H., Woods M., Xiang W., Zimmermann N. E., Coomes D. A. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes // *Global Change Biology*. Vol. 23. 2017. P. 177–190.

2. Chabi A., Lautenbach S., Orekan V. O. A., Kyei-Baffour N. Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin// *Carbon Balance Manage.* 2016.

3. Brede B., Terry L., Barbier N., Bartholomeus H. M., Bartolo R., Calders K., Derroire G., Moorthy S. M. K., Lau A., Levick S. R., Raunonen P., Verbeeck H., Wang D., Whiteside T., Zee J., Herold M. Non-destructive estimation of individual tree biomass: Allometric models, terrestrial and UAV laser scanning // *Remote Sensing of Environment*. 2022.

4. Duncanson L., Armston J., Disney M., Avitabile V., Barbier N., Calders K., Carter S., Chave J., Herold M., Crowther T. W., Falkowski M., Kellner J. R., Labriere N., Lucas R., MacBean N., McRoberts R. E., Meyer V., Nae E., Nickeson J. E., Paul K. I., Phillips O. L., Rejou-Mechain M., Roman M., Roxburgh S., Saatchi S., Schepaschenko D., Scipal K., Siqueira P. R., Whitehurst A., Williams M. The importance of consistent global forest aboveground biomass product validation // *Survey*

Geophys. 40 (4). P. 979–999. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09538-8>.

5. Yang Q., Su Y., Hu T., Jin S., Liu X., Niu C., Liu Z., Kelly M., Wei J., Guo Q. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LIDAR canopy height attributes and optical spectral indexes // *Forest Ecosystems*. Vol. 9. 2022.

6. Pandey P. C., Srivastava P. K., Chetri T., Choudhary B. K., Kumar P. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India // *Environ. Monit. Assess.* 191 (9). 2019. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7730-7>.

7. Xiao J., Chevallier F., Gomez C., Guanter L., Hicke J. A., Huete A. R., Ichii K., Ni W., Pang Y., Rahman A. F., Sun G., Yuan W., Zhang L., Zhang X. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of

advances over 50 years // *Rem. Sens. Environ.* 233. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>.

8. Vohland M., Stoffels J., Hau C., Schuler G. Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis // *Silva Fennica* 41(3). P. 441–456. 2007.

9. Dong J., Kaufmann R. K., Myneni R. B., Tucker C. J., Kauppi P. E., Liski J., Buermann W., Alexeyev V., Hughes M. K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources and sinks // *Remote Sensing of Environment* 84. 2003. P. 393–410.

© Сулейманов Т. И., Асадов Х. Г.,
Тахмазов Т. М., 2024

Поступила в редакцию 15.05.2023
Принята к печати 22.01.2024

ОСОБЕННОСТИ ПОСЛЕПОЖАРНОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ СОСНЫ В ГОРНЫХ ЛЕСАХ ЮЖНОЙ СИБИРИ

Т. А. Матвеева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: matveeva.sibgu@gmail.com

Представлены результаты особенностей лесовозобновления после пожаров в сосняках южной тайги в границах лесных районов Красноярского края. Объектами исследований были площади, пройденные пожарами разного вида и силы, в насаждениях сосны обыкновенной разнотравной группы типов леса, репрезентирующих лесной фонд региона, и беспожарные ценозы. Отмечено незначительное допожарное возобновление сосны под пологом материнского древостоя. Причиной тому является блокирование процессов появления всходов сосны и в дальнейшем – сильной конкуренции молодым растениям за ресурсы среды травяным покровом, как мощным задернителем почвы и потребителем воды и питательных веществ.

Установлено воздействие пожаров на характер заселения сосной площадей, подвергшихся огневому воздействию. Выявлено влияние вида и силы пожаров, определяющих уровень деструктивного воздействия огня на фитоценоз, на плотность и биометрические показатели самосева и подроста сосны на начальном этапе постпирогенной сукцессии.

Средний по силе низовой огонь способствует поселению на пожарище молодых особей сосны, но сохраняет отрицательное воздействие травостоя, который после обгорания быстро восстанавливает свои позиции. Сильный низовой пожар уничтожает нижний ярус фитоценоза, подпологовую древесную растительность, повреждает взрослые деревья и создает более комфортную среду для молодых растений, локализующихся в окнах древесного полога. Здесь создаются предпосылки для формирования сложной вертикальной структуры насаждения.

После верхового пожара ландшафт утрачивает лесной облик, теряя основной элемент растительного сообщества – древостой. Восстановление сосны идет хорошими темпами вблизи источников обсеменения, но этот процесс затухает по мере удаления от стен леса, что может повлечь изменения древесного типа растительности на травяной, имеющий меньшую лесоводственную и экологическую ценность.

Ключевые слова: Красноярский край, южная тайга, сосновые насаждения, низовые и верховые пожары, послепожарная динамика.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 17–22

FEATURES OF POST-FIRE RENEWAL OF PINE IN THE MOUNTAIN FORESTS OF SOUTHERN SIBERIA

T. A. Matveeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: matveeva.sibgu@gmail.com

The results of the features of reforestation after fires in the pine forests of the southern taiga within the boundaries of the forest areas of the Krasnoyarsk Territory are presented. The objects of research were the areas covered by fires of different types and strengths, in stands of pine of an ordinary mixed-grass group of forest types representing the forest fund of the region, and fire-free cenoses. A slight pre-fire renewal of pine under the canopy of the mother stand was noted. The reason for this is the blocking of the growing processes of pine seedlings and – strong competition for young plants for the resources of the environment with grass cover, as a powerful soil blackener and a consumer of water and nutrients in the future.

The impact of fires on the nature of pine plantations in the areas exposed to fire has been established. The influence of the type and strength of fires that determine the level of destructive impact of fire on the phytocenosis, on the density and biometric indicators of self-seeding and undergrowth of pine at the initial stage of post-pyrogenic succession was revealed.

The average strength of the grass-roots fire contributes to the plantations of young pine plants on the conflagration, but retains the negative impact of the herbage, which, after burning, quickly regains its position. A strong grass-roots

fire destroys the lower tier of phytocenosis, subthreshold woody vegetation, damages mature trees and creates a more comfortable environment for young plants localized in the windows of the tree canopy. Here the prerequisites for the formation of a complex vertical structure of planting are created.

After a riding fire, the landscape loses its forest appearance, losing the main element of the plant community – the stand of trees. Pine restoration is progressing at a good pace near the sources of seeding, but this process fades away as you move away from the borders of the forest, which may lead to changes in the woody type of vegetation to grass, which has less forestry and ecological value.

Keywords: Krasnoyarsk Territory, southern taiga, pine plantations, grassroots and top fires, post-fire dynamics.

ВВЕДЕНИЕ

Леса, являясь неотъемлемым компонентом природной среды, претерпевают существенные изменения от разнообразных внешних влияний, чаще негативного свойства. Среди таковых как природные явления (наводнения, ураганы, снежные лавины, сели и пр.), так и антропогенный фактор (вырубка лесов, неорганизованный туризм, загрязнение атмосферы и т. д.). Но главным раздражителем сбалансированного состояния природной среды выступают пожары. Послепожарные изменения, происходящие в лесных биогеоценозах, неоднозначны и многогранны, и их односторонняя оценка будет некорректной. Степень трансформации огнем коренного экотопа зависит от многих условий, среди которых параметры горения, природа леса и ряд других факторов. В каждом случае, имеющем свои особенности, наступают разные последствия [2; 4 и др.].

Сильные развившиеся пожары, уничтожая растительный покров, трансформируют ландшафтное разнообразие на огромных территориях. Меняется флористический состав насаждений, структура доминирования, взаимоотношения составляющих фитоценозов компонентов. Слабый огонь, не вызывая разрушения важнейшей составной части леса – древостоя, может положительно влиять на формирование ценотической среды, способствующей повышению продуктивности и стабильности экосистемы. Вопросам послепожарного лесообразования посвящено немало работ, раскрывающих его специфику после огневой трансформации лесных биогеоценозов [3; 5; 12 и др.].

Совершенно очевидно, что явным диссонансом звучит вопрос о полном исключении огня из природной среды. Прежде всего, это практически невозможно, так как огонь – естественный экологический фактор и причиной загорания леса может быть не только человек, но и природные явления. Это будет неверно и с точки зрения увеличения биологического разнообразия после пожаров, подготавливающих экологически разнородную среду, способствующих формированию сложной структуры фитоценозов, обладающих способностью противостоять преждевременной деградации сложившейся биосистемы.

Действительно, восстановительные сукцессии в лесах, нарушенных внешними эффектами, могут развиваться по разным сценариям, направленность которых определяется условиями измененного экотопа и биологическими характеристиками лесообразующей породы. Главным критерием комфортности пирогенной среды для восстановления исходной растительной ассоциации, тесно связанной с климатом, почвой и другими компонентами биогеоценоза, оста-

ется интенсивность заселения гари самосевом древесной породы, его последующий рост и перспектива устойчивого развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований является изучение лесовозобновления на площадях, пройденных верховым пожаром и низовыми пожарами разной силы. Возрастающая антропогенная нагрузка на природные комплексы, увеличивающая число источников огня, подчеркивает актуальность изучения особенностей лесовозобновительного процесса в условиях горного рельефа. В задачи исследования входило изучение влияния трансформированной огнем географической среды на характер появления, последующий рост и развитие пирогенного поколения лесообразующей породы.

Работы осуществляли в Манско-Канском лесорастительном округе северо-западной части Восточно-Саянской провинции, относящейся к горным лесам Южной Сибири. Полигоны располагались в Алтае-Саянском горно-таежном лесном районе. Распределение лесных формаций на территории округа подчиняется вертикальной поясности. Недостаточная влагообеспеченность нижних поясов гор, которые некоторые исследователи [8] относят к умеренно влажной климатической фации, является причиной господства здесь подтаежного сосново-лиственничного пояса. Распространение подтаежных серий светлохвойных лесов – осоково-разнотравных, злаково-осоковых и других, связано с наиболее теплыми климатами. Следует отметить, что в целом в структуре лесного фонда преобладают древостои спелой и перестойной возрастных категорий.

Объекты исследований – площади, пройденные пожарами разного вида и силы, в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разнотравной группы типов леса, репрезентирующих лесной фонд региона, и беспожарные ценозы, в качестве контрольных площадей. При выявлении участков, используемых в качестве контрольных, обследовали негоревшие насаждения, расположенные у границы контура пожара. Идентичность контрольных и пробных площадей устанавливалась принадлежностью пожара и негоревшего участка к одному типу леса, одинаковому мезо- и микрорельефу и почве.

На участках распространены дерново-подзолистые почвы различной степени оподзоленности. По гранулометрическому составу это супеси, по влажности – свежие. Мощность почвы невелика и колеблется в малом диапазоне – от 20 до 40 см. Местоположение участков – пологие (3–5°) склоны южной экспозиции,

крутизна которых не оказывает заметного влияния на повреждаемость древесных пород при пожарах.

Допожарная характеристика древостоев, составленная на основании таксационного описания и натурного изучения пожарищ и прилегающих территорий, – следующая (табл. 1).

Участки представлены сосновыми древостоями средней сомкнутости, не имеющими существенных отличий по таксационным параметрам. Отмечается незначительное участие в составе древостоев лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth), не влияющих заметно на флористический аспект насаждения.

Возобновление сосны на всех участках незначительное и даже в случае благоприятно складывающихся условий для его последующего роста, не способно в перспективе заменить материнский древостой. На участках 3 и 4 – разновозрастный подрост пихты, который, в отличие от светлохвойных пород, достаточно комфортно чувствует себя не только в окнах полога, но и под кронами деревьев, когда в качестве императивного фактора выступает интенсивность солнечной радиации. Наличие подрост пихты более характерно для экотонной зоны, являющейся переходной от подтаежного светлохвойного пояса к более влагообеспеченной климатической фации с господством темнохвойных лесов. В низкогорном поясе пихта увеличивает биологическое разнообразие природных комплексов и плотность фитоценозов, однако отличается низкой огнестойкостью и повреждается даже слабыми низовыми пожарами.

Подлесок редкий, сомкнутых групп не образует, из шиповника иглистого (*Rosa acicularis* Lindl.), кизильника черноплодного (*Cotoneaster melanocarpa* Lodd.), акации желтой (*Caragana arborescens* Lam.), спиреи дубравколистной (*Spiraea chamaedryfolia* L.). Вследствие малочисленности, подлесок не влияет на формирование сообщества, и потому играет в ценозе подчиненную роль.

Травяная растительность развита, чему способствует невысокая сомкнутость и ажурность крон древостоев. Негативная роль нижнего яруса насаждения в возобновлении главной породы, как мощного задернителя почвы, заключается в блокировании процессов появления всходов сосны и в дальнейшем – сильной конкуренции молодым растениям за ресурсы среды. Это ощутимо снижает реализацию потенциальных возможностей роста и развития новой генерации сосны. В зависимости от локального расположения на пробных площадях, доминантами выступают осока большехвостая (*Carex macroura* Meinsh), вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth),

орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), с участием чины низкой (*Lathyrus humilis* Fisch.), грушанки круглолистной (*Pyrola rotundifolia* L.) и других видов олиготрофного разнотравья.

Провизорные обследования лесных участков, пройденных огнем, выполняли на следующий год после пожаров – устанавливали вид и силу пожара, тактические элементы кромок, места размещения пробных площадей. Исследования лесовозобновительного процесса осуществляли на 5 и 10 послепожарные годы.

Пробные площади закладывали в таксационных выделах, относящихся к одному типу леса со схожим микрорельефом и однородными в почвенном отношении. Все пробные площади прямоугольной формы, их размер варьировался, но соблюдалось обязательное условие: число взрослых деревьев было не менее 200 экз. Лесоводственную и геоботаническую характеристики фитоценозов составляли с использованием общепринятой методики [10], показатели древостоев определяли методом перечислительной таксации [1]. При изучении нижних ярусов насаждений учитывали подрост, подлесок, описывали живой напочвенный покров – его видовой состав, обилие и степень покрытия почвы.

Поскольку основная причина гибели сосны от низовых пожаров на маломощных почвах – ожоги стволов у корневой шейки и скелетных корней, близко залегающих к дневной поверхности [6], силу низового пожара устанавливали по степени выгорания напочвенного покрова и лесной подстилки, определяющей длительность контактирования растительных клеток с огнем. Слабый огонь проходит по опад и только с поверхности обжигает лесную подстилку. Однако столь незначительное тепловое воздействие вызывает лишь небольшие колебания внешних условий и не меняет принципиально фитосреду, в связи с чем в задачи исследований не входило изучение лесовозобновления на участках, пройденных слабым пожаром. Средний по силе огонь заглубляется в почву и повреждает ее верхний слой на 50–60 %. Сильный пожар уничтожает всю органику почвенного профиля.

Сплошной учет самосева и подрост сосны проводили на 25 учетных площадках размером 2×2 м, равномерно размещенных на пробной площади [7]. Всходы не учитывали, так как вследствие значительного отпада растений уже в первый год жизни, формируется неадекватное (завышенное) представление о лесовозобновительном потенциале экотопа [9]. Встречаемость рассчитывали как процентное отношение числа площадок с учтенными молодыми растениями, к общему числу учетных площадок. При этом во внимание принимались лишь жизнеспособные индивидуумы, без явных признаков отмирания и сильных форм угнетения.

Таблица 1
Допожарная характеристика древостоев

Номер участка	Состав древостоев	Тип леса	Высота, м	Диаметр, см	Возраст, лет	Сомкнутость крон
1	10С+Лц	С ос.-рзтр.	21,0	34,8	110	0,57
2	10Сед.Б	С ос.-рзтр.	22,2	33,5	120	0,58
3	10С+П	С ос.-рзтр.	23,6	32,7	120	0,63
4	10С+Пед.Б	С ос.-рзтр.	22,7	31,5	115	0,60

Подрост, утративший островеершинность кроны, имеющий слабое охвоение или сильное искривление стволов, не учитывался. Для установления специфики заселения лесных участков самосевом сосны после разрушительного верхового пожара, представляющих, по сути, открытые фитоценозы, пробные площади закладывали вблизи (30–40 метров) и на расстоянии 100–120 метров от стен здорового леса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На участке 1 действовал низовой пожар средней силы, на участке 2 – сильный низовой пожар, а на участках 3 и 4 – верховой пожар.

На первом участке сосна пострадала незначительно, поскольку лесная подстилка выгорела лишь частично (сохранился ее слой толщиной около 1 см) и огонь не заглубился в почву до уровня корневой шейки и скелетных корней деревьев, часто травмируемых подстилочно-гумусовыми пожарами. Серьезный ущерб нанесен всей подпологовой растительности. Однако ценоотические механизмы регуляции численности молодых растений, даже на начальном этапе поселения и роста самосева сосны, еще существенны, вследствие угнетающего влияния материнского древостоя.

Сильный низовой пожар существенно преобразил облик лесного участка – почвенно-растительный покров носит явные следы естественных нарушений: произошел большой отпад деревьев (28 % от общего запаса), уничтожен не только живой напочвенный покров, но и крупный подрост лесобразующей породы, а также подлесок. В соответствии с этим изменилась лесовозобновительная обстановка: трансформированы эдафические условия, световой и гидротермический режимы экотопа, оказывающие прямое воздействие на процессы лесообразования.

В зоне действия верхового пожара древостой погиб. Огонь устранил нижние ярусы лесной растительности, выжег почвенную органику. Причина перехода огня в кроны деревьев на участках 3 и 4 – наличие на площади куртин подроста пихты сибирской и большого количества напочвенных горючих материалов в виде древесного хлама. Это способствовало формированию мощного теплового потока, содействующего поднятию пламени в верхний ярус насаждения.

Характеристика нового поколения сосны представлена в табл. 2.

Материалы учетов позволяют сделать выводы о лесовозобновительных условиях и ресурсах трансформированных местообитаний на начальной стадии послепожарной сукцессии. На первом участке, менее других пострадавшем от огня, нарушенность фитоценоза минимальная. Травы, в отсутствие внешних влияний, подавляющих их жизненные функции, быстро восстанавливают свои позиции. Таким образом, травяной покров, состоящий из видов коренной ассоциации, вновь формирует конкурентную среду, блокируя дальнейшее заселение пожарища самосевом, рост и развитие молодого поколения сосны. Несмотря на лучшее обсеменение площади, показатели плотности (густоты) самосева и подроста, а также высоты и диаметра, иллюстрируют функционирование достаточно жестких механизмов регуляции жизнеобеспечения растений в гаревой среде. В подтверждение сказанного отметим, что на этом участке зафиксирован наибольший отпад (67 %) подроста сосны за последний пятилетний период.

Новая генерация локализуется в окнах древесного полога, где создается более благоприятная обстановка для возобновления сосны. Жизненное состояние особей в таких биогруппах хорошее и велика вероятность образования в дальнейшем разновозрастного древостоя и повышения уровня биологического разнообразия на этом участке. Что касается подроста вблизи стволов деревьев, то он не имеет серьезных перспектив и через 7–9 лет не может быть отнесен к категории благонадежного.

Сильный низовой пожар (участок 2) значительно улучшил лесовозобновительную ситуацию, уменьшив плотность древостоя и уничтожив нижние ярусы растительного сообщества, снизив, тем самым, отрицательное действие ценоотических факторов. Здесь выгорела подстилка, препятствующая прорастанию семян и укоренению всходов.

Морфометрические характеристики растений уступают таковым на участке 3, где древостой полностью разрушен, что очевидно связано с негативным прессингом взрослых деревьев [11], развитые корневые системы которых перехватывают воду и питательные вещества, крайне необходимые молодым особям для закрепления на пожарище. Но в сравнении с участком 1, следует отметить более высокую численность самосева и подроста, который занимает всю площадь пожарища.

Таблица 2
Состояние послепожарного возобновления сосны

Номер участка	Вид пожара	Средние		Густота, тыс. шт./га	Встречаемость, %
		высота, см	диаметр, мм		
первый учет (2014 год)					
1	низовой	26,7±1,41	2,4±0,18	49,4	84
2	низовой	34,3±1,88	3,2±0,27	83,9	100
3	верховой	44,6±2,67	4,9±0,50	72,3	100
4	верховой	32,7±1,90	3,1±0,32	10,5	48
второй учет (2019 год)					
1	низовой	67,6±3,04	6,5±0,50	16,5	56
2	низовой	78,6±3,65	8,7±0,73	31,4	76
3	верховой	107,4±4,75	11,2±0,97	56,3	100
4	верховой	58,2±2,43	5,6±0,51	4,5	28

Лучшие биометрические показатели – у сосны на третьем участке. Высокоинтенсивное горение способствовало устранению конкурентных отношений как со стороны верхнего яруса, так и подпологовой древесной и травяной растительности. Большой коэффициент встречаемости, как по самосеву, так и подросту, характеризует равномерное распределение растений на участке. Восстанавливающийся нижний ярус растительного сообщества, где ранее доминировали представители злакового семейства, не причиняет значимого вреда молодой сосне, как произошло на участках 1 и 2. Существенно поврежденный, травостой не способен быстро восстановить свои позиции – сосна на гари выходит из-под его влияния.

Наиболее напряженная ситуация сложилась на четвертом участке. Несмотря на тот факт, что сосна относится к анемохорам, малая численность ее новой генерации наглядно продемонстрировала блокирующий характер большой удаленности площади от стен леса. Даже отсутствие факторов окружающей среды, препятствующих лесовосстановлению и устраненных огнем воздействием, не исправило ситуацию. Подрост слабозавит, имеет самые низкие биометрические показатели, а за последние два года темпы прироста по высоте и диаметру снизились. Такая тенденция свидетельствует о депрессивном состоянии молодых особей. В составе фитоценоза основной фон создают травы.

Что касается выживания сосны во временном интервале между учетами, то на участках 1, 2 и 4 отпад составил 67, 63 и 57 % соответственно. Как указано выше, главная причина элиминации растений на первых двух участках – сильное ценотическое угнетение со стороны древостоя, регулирующего в условиях еще неразвитого травяного покрова поселение, темпы роста и виталитет младшей возрастной группы.

На четвертом участке сосна, из-за своей малочисленности, не формирует какие-либо контуры в виде отдельных био групп, способных противостоять конкурентному давлению травостоя, активно использующему почвенную влагу и питательные вещества. Здесь велика вероятность смены типа растительности.

Существенно меньше подроста погибло на третьем участке – 22 % от учтенных ранее экземпляров. За счет высокой сохранности густота подроста здесь максимальная и на 47 % превышает его количество на участке 2, занимающим второе место по численности сосны на единице площади. Следует отметить, что при большой плотности молодые особи имеют лучшие показатели высоты и диаметра. Статистическая обработка материалов показала достоверность различия с аналогичными показателями растений на других участках.

Плотность популяций является одним из важнейших внутренних факторов, имеющих приоритетное значение при формировании пространственной и вертикальной структуры фитоценоза, обуславливающих устойчивость биологической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лесные пожары являются значимым механизмом естественной динамики таежных лесов. Вышеизложенное подтверждает тезис: лесообразование – это

многофакторный процесс, детерминированный как внешними факторами, так и биотическим потенциалом древесной породы. В зависимости от вида и силы пожара сценарии лесообразовательного процесса существенно варьируются.

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что оптимальная лесовозобновительная среда формируется после верхового пожара вблизи источников обсеменения. Новому поколению древесной породы, в отсутствие конкурентного давления, легче адаптироваться к измененному экологическому режиму местообитания.

Комфортные условия для появления достаточного количества всходов и последующее их успешное развитие может обеспечить только близость к беспожарным древостоям, что недостижимо на крупных гари. Однако при верховых пожарах полностью погибает материнский древостой, и при повторных катастрофических экзогенных воздействиях возможен негативный исход вплоть до изменения типа растительности, имеющего меньшую лесоводственную и экологическую ценность. Таким образом, крупные лесные пожары могут привести к фрагментации естественной среды обитания многих видов растений, а, следовательно, и представителей животного мира.

При низовых пожарах в той или иной степени сохраняется подпологовая конкурентная обстановка, но остается верхний ярус насаждения. Здесь главным фактором успешности появления нового поколения лесообразующей породы будет выступать сила огневого воздействия. Оптимальная степень выгорания напочвенного покрова и фитодетрита позволит сохранить древостой и существенно снизить вредное влияние травостоя, препятствующего процессам жизнедеятельности молодых особей. В перспективе такой сценарий обеспечивает формирование разновозрастного древостоя со сложной вертикальной структурой, повышающей биологическое разнообразие и стабильность естественной экосистемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Анучин Н. П. Лесная таксация. М. : Лесная промышленность, 1971. 512 с.
2. Арефьев С. П., Казанцева М. Н. Периодичность пожаров и естественное возобновление светлехвойных лесов и редколесий в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа // Сибирский лесной журнал. 2020. № 1. С. 3–15.
3. Гусев Д. В., Данилов Д. А., Беляева Н. В. Анализ состояния подроста сосны после низовых пожаров в Ленинградской области // Лесотехнический журнал. 2018. № 2 (30). С. 46–54.
4. Краснощеков Ю. Н., Евдокименко М. Д., Онучин А. А. Постпирогенная депрессия лесных экосистем в горном Прибайкалье // Сибирский лесной журнал. 2018. № 6. С. 46–57.
5. Малиновских А. А., Куприянов А. Н. Пирогенные сукцессии в равнинных сосновых лесах южной части Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2015. 208 с.
6. Матвеева Т. А. Влияние пожаров разной силы на возобновление лиственницы сибирской // Рацио-

нальное природопользование – основа устойчивого развития : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 22 сентября 2020 г. Грозный : ЧГПУ; Махачкала : АЛЕФ, 2020. С. 302–307.

7. Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М. : Наука, 1966. 64 с.

8. Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск : Наука, 1986. 226 с.

9. Савин Е. Н. Естественное возобновление в сосняках Красноярского Приангарья // Материалы по изучению лесов Сибири и Дальнего Востока. Красноярск, 1963. С. 11–24.

10. Сукачев В. Н., Зонн С. В. Методические указания к изучению типов леса. М. : Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.

11. Усень В. В., Гордей Н. В., Тегленков Е. А. Оценка постпирогенного формирования естественных насаждений в сосновых фитоценозах // Труды БГТУ, 2016, № 1. С. 79–83.

12. Фуряев В. В. Системный подход в исследовании роли пирогенного фактора в лесообразовательном процессе // Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса : материалы Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. Красноярск : ИЛ СО РАН, 2009. С. 165–167.

REFERENCES

1. Anuchin N. P. Lesnaya taksatsiya. M. : Lesnaya promyshlennost', 1971. 512 s.

2. Aref'yev S. P., Kazantseva M. N. Periodichnost' pozharov i estestvennoye vozobnovleniye svetlokhvonykh lesov i redkolesiy v Nadymskom rayone Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2020. № 1. S. 3–15.

3. Gusev D. V., Danilov D. A., Belyayeva N. V. Analiz sostoyaniya podrosta sosny posle nizovykh pozharov v Leningradskoy oblasti // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2018. № 2 (30). S. 46–54.

4. Krasnoshchekov Yu. N., Evdokimenko M. D., Onuchin A. A. Postpirogennaya digressiya lesnykh ekosistem v gornom Pribaykal'ye // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2018. № 6. S. 46–57.

5. Malinovskikh A. A., Kupriyanov A. N. Pirogennyye suksessii v ravninnykh sosnovykh lesakh yuzhnoy chasti Zapadnoy Sibiri. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN, 2015. 208 s.

6. Matveyeva T. A. Vliyaniye pozharov raznoy sily na vozobnovleniye listvennitsy sibirskoy // Ratsional'noye prirodoopol'zovaniye – osnova ustoychivogo razvitiya : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. 22 sentyabrya 2020 g. Groznyy : ChGPU; Makhachkala : ALEF, 2020. S. 302–307.

7. Pobedinskiy A. V. Izucheniye lesovosstanovitel'nykh protsessov. M. : Nauka, 1966. 64 s.

8. Polikarpov N. P., Chebakova N. M., Nazimova D. I. Klimat i gornyye lesa Yuzhnoy Sibiri. Novosibirsk : Nauka, 1986. 226 s.

9. Savin E. N. Estestvennoye vozobnovleniye v sosnyakakh Krasnoyarskogo Priangar'ya // Materialy po izucheniyu lesov Sibiri i Dal'nego Vostoka. Krasnoyarsk, 1963. S. 11–24.

10. Sukachev V. N., Zonn S. V. Metodicheskiye ukazaniya k izucheniyu tipov lesa. M. : Izd-vo AN SSSR, 1961. 144 s.

11. Usenya V. V., Gordey N. V., Teglenkov E. A. Otsenka postpirogennogo formirovaniya estestvennykh nasazhdeniy v sosnovykh fitotsenozakh // Trudy BGTU, 2016, № 1. S. 79–83.

12. Furiyayev V. V. Sistemnyy podkhod v issledovanii roli pirogennogo faktora v lesoobrazovatel'nom protsesse // Ekologo-geograficheskiye aspekty lesoobrazovatel'nogo protsessa : materialy Vserossiyskoy konferentsii s uchastiyem inostrannykh uchenykh. Krasnoyarsk : IL SO RAN, 2009. S. 165–167.

© Матвеева Т. А., 2024

Поступила в редакцию 27.09.2023
Принята к печати 22.01.2024

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПАШЕННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПРИЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ В ПЕРИОД ЕЕ РУССКОГО ОСВОЕНИЯ

В. А. Безруких¹, Е. В. Авдеева², А. А. Коротков², Н. А. Лигаева³, О. А. Кузнецова³

¹Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева
Российская Федерация, 660049, Красноярск, ул. А. Лебедевой, 89

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: e.v.avdeeva@gmail.com

³Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660099, Красноярск, просп. Свободный, 79

Суровые природно-климатические условия на большей части Приенисейской Сибири являются причиной, того, что основные сельскохозяйственные угодья сосредоточены в ее центральной и южной частях. Аграрное природопользование начинается с южной тайги и подтайги, в связи с суровыми природными условиями. Наиболее важную роль в аграрном природопользовании занимают лесостепные и степные ландшафты южной Сибири, где они занимают 42 % территории и проживает 84 % населения этих зон. Эта территория отличается большим разнообразием природных условий. Дается оценка почвенно-климатических условий территории, с чем связано начало формирования и заложения земледелия, говорится об истории заселения и освоения территории русскими и продвижении их по долинам и поймам рек, образуя сеть поселений острожков: Енисейский, Красноярский, Ачинский и другие. В статье говорится о роли декабристов и их влиянии на культуру земледелия, и ускорении развития в связи со строительством Транссибирской железной дороги.

Ключевые слова: аграрное природопользование (АП), сумма температур выше 10°, резко континентальный климат, продолжительность безморозного периода, Южно-Минусинская котловина, долина и пойма рек, зерновые культуры, вегетационный период.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 23–26

DEVELOPMENT OF ARABLE AGRICULTURE IN THE BOREAL ZONE OF THE YENISEI SIBERIA DURING ITS RUSSIAN EXPLORATION

V. A. Bezrukhikh¹, E. V. Avdeeva², A. A. Korotkov², N. A. Ligaeva³, O. A. Kuznetsova³

Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev
89, A. Lebedevoy str., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: e.v.avdeeva@gmail.com

³Siberian Federal University
79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660099, Russian Federation

The harsh natural and climatic conditions in most of the Yenisei Siberia are the reason that the main agricultural lands are concentrated in its central and southern parts. Agricultural nature management begins with the southern taiga and sub-taiga, due to harsh natural conditions. The most important role in agricultural environmental management is played by the forest-steppe and steppe landscapes of southern Siberia, where they occupy 42 % of the territory and 84 % of the population of these zones live there. This area is distinguished by a wide variety of natural conditions. An assessment of the venerable and climatic conditions of the territory is made. It is associated with the beginning of establishment and development of agriculture, it talks about the history of the settlement and exploration of the territory by Russians and their advancement along the valleys and floodplains of rivers, forming a group of fort settlements: Yenisei, Krasnoyarsk, Achinsk and others. The article talks about the role of the Decembrists and their influence on the culture of agriculture, and the acceleration of development because of the construction of the Trans-Siberian Railway.

Keywords: agricultural environmental management (AM), sum of temperatures above 10°, sharply continental climate, duration of the frost-free period, South Minusinsk Basin, river valley and floodplain, grain crops, vegetation period.

Благоприятные климатические условия и наличие плодородных почв обусловили высокий уровень пашенного земледелия на юге Приенисейской Сибири, она входит в Алтае-Саянскую физико-географическую страну, с крупными частями таких как Кузнецкий Алатау, Западный и Восточный Саян, Минусинская впадина с составляющими ее котловинами: Южно-Минусинской, Сыдо-Ербинской, Чулымо-Енисейской и Назаровской.

Рельеф впадины неоднородный. Обширные озерно-аллювиальные и древне-аллювиальные равнины сменяют холмисто-сопочные формы и низкогорья [1]. Климатические особенности различных частей впадины неодинаковы. Они изменяются от предгорий к пониженным элементам рельефа и с юга на север. Так, на равнинах южной части котловин, занятых степями, климат резко континентальный, с небольшим количеством осадков, с значительной сухости воздуха и почвы. Средняя температура в январе изменяется от -19 до -21 °С, а средняя температура июля резко превышает 20 °С. Годовая амплитуда колебания температуры составляет 88 °С. Вегетационный период продолжается от 115 до 125 дней, а безморозный период от 150 до 155. Сумма активных температур около 2000 °С. Осадков в степной части выпадают 250–260 мм за год. Маломощный снежный покров (10–18 мм) ложится на сухую мерзлую почву и легко сдувается в понижения, поэтому почва глубоко промерзает (до 1,7–1,8 м).

По окраинам котловин, в предгорьях расположены лесостепи. Для лесостепей характерно меньшая амплитуда колебания температур. Средняя годовая температура $0...-1,2$ °С, средняя температура самого холодного месяца $-18,3... - 21,2$ °С, а самого теплого $17,6...18,4$ °С. Продолжительность безморозного от 97 до 107 дней. Сумма активных температур около $1650-1700$ °. Количество осадков изменяется от 350 до 500 мм.

Почвенно-растительный покров котловин разнообразный, здесь имеются сухая степь, типичная степь или лесостепь. На северных склонах много лесной растительности, а на южных сухой степи. В почвенном покрове преобладают обыкновенные и выщелоченные черноземы [2].

Минусинская впадина является местом древней культуры земледелия, животноводства и металлургии. Начало формирования земледелия (в основном мотыжного) в регионе относится к IX–VIII вв. до н. э. Об этом свидетельствуют находки каменных зернотерок в насыпях курганов Южно-Минусинской котловины и Тувы. Именно Минусинская котловина в это время была одним из крупнейших очагов земледелия, откуда оно распространилось с севера, до среднего течения Енисея. В засушливых котловинах Минусинской впадины большое значение имело создание оросительных систем, которые пришли сюда предположительно из Китая [3].

Зарождающееся поливное земледелие пришлось в упадок в результате монгольского нашествия. К моменту русской колонизации (XVII в.) сельское хозяйство оказалось в разрушенном состоянии: были заброшены оросительные системы, упала культура

земледелия, снизилась численность населения. Так что русские земледельцы не застали древнего земледелия в Приенисейской Сибири.

Временем коренного перелома в истории освоения Сибири является конец XVI–XVII века. Одна за другой различные области входили в состав Русского государства, заселялись русскими людьми, намечались интенсивные пути эксплуатации ее богатств. К моменту русской колонизации сельское хозяйство находилось в разоренном состоянии. В Сибири не оказалось земледельческих очагов, способных снабжать хлебом осваиваемые территории. Русскому земледельцу с его знанием сохи и бороны пришлось, используя свои трудовые навыки, трехпольный севооборот, применяя удобрения, закладывая в новых местах новое для этих мест земледелие. И он совершил подлинный переворот в деле использования земельных богатств Сибири [6].

Ведущая роль в это время принадлежит водным ресурсам – единственным транспортным путям, по которым шло заселение русскими первоначально таежных, а затем южных лесостепных и степных территорий. За короткое время (20–30 лет) на водных путях возникла целая сеть поселений – острогов: Енисейского (1619), Красноярского (1628), Ачинского (1641) и др. Первоначальное освоение русскими таежных территорий связано, прежде всего, с их богатством пушным зверем. Во второй половине XVII века, по мере образования русских поселений, начинается освоение земель в долинах и поймах рек и образуется ряд земледельческих микрорайонов с центрами в Енисейске, Ачинске, Красноярске, Канске, Уяре, Иланске, Шушенском, Минусинске и др. С развитием земледелия появляется тенденция расселения людей в селах и начинает развиваться приусадебное земледелие для выращивания различных овощных культур.

Русское население занимается пушным и рыбным промыслом, в таежных районах создаются специализированные предприятия по заготовке пушнины, что приводит к их «опромысливанию».

Рыбный промысел хотя и был интенсивным, служил добавочной продовольственной базой особенно в северных безхлебных районах, что не приводило к оскудению рыбных запасов. В поселениях расположенных по долинам рек, широкое развитие получает обработка древесины: строятся деревянные дощатники, струги, барки и другие средства передвижения по воде и суше. Люди также занимаются производством дегтя, смолокурением, заготовкой дров и строевого леса.

Южная граница приенисейского пахотного поля лежала сразу за Красноярском у реки Овсянки, северная – недалеко от Полярного круга в районе с. Ворогова, что не характерно для нашего времени, но в те времена там довольно устойчиво вызревал ячмень. Подтянутость пашни к северу была также связана с нуждами пушного промысла, и стало возможной благодаря упорным опытным посевам. Свои агротехнические методы пришедшие крестьяне принимали гибко, учитывая местные почвенно-климатические условия. Под пашни выбирали открытые места – «елани» в лесах и приречных долинах. Основные посевы

располагались на юго-восточных пологих склонах, которые ниже по склону были ограничены ранними и поздними заморозками. По мере уменьшения урожая выжигали ближние участки леса или переходили на новые открытые елани. В связи с обилием свободных земель естественное плодородие не восстанавливали. Навоз на поля не вывозили, а сваливали в окрестностях поселений.

Заселение и сельскохозяйственное освоение лесостепных и степных районов юга Минусинской впадины стало возможным с постройкой Абаканского (1707 г.) и Сянского (1709 г.) острогов, в связи с чем окончательно прекратились набеги кочевников. С присоединением территории к России связано появление здесь русских, которые принесли с собой новые для этих мест агротехнику и культурные растения. Если преобладающей культурой в XVII веке была рожь, то в XVIII в., когда земледелие стало продвигаться в лесостепные и степные районы юга, наметилась тенденция к увеличению в посевах долины пшеницы. Тем не менее, до первой половины XIX в. земледелие здесь имело меньшее значение, чем скотоводство.

Особенно благотворное влияние на культуру земледелия оказали декабристы. Так, декабрист А. А. Фролов, живущий в с. Шушенском, завел табун лошадей, огород, выписал из европейской России хлебные семена, которыми охотно делился с местными жителями. Именно декабристы впервые в Минусинской котловине ввели посевы гречихи, выращивали арбузы и дыни, разводили высокопородистых мериносовых овец. Гонимые нуждой крестьяне-переселенцы, прибывшие в Сибирь с Украины, Белоруссии и нечерноземных губерний России, как самое драгоценное достояние везли с собой и семена [5].

Хозяйственное развитие Приенисейской Сибири в этот период было ускорено двумя факторами: постройка Транссибирской железной дороги (1896–1898 гг.) и аграрной политики П. А. Столыпина после революции 1905 г. Железная дорога ускорила развитие экономики и капитализма в Сибири. Рост численности населения привел к увеличению посевных площадей на 94 % за 1897–1917 гг. (при увеличении их в среднем по России за этот же период всего на 7 %) и возможности сбыта сельскохозяйственной продукции.

Преобладанию земледелия в структуре сельскохозяйственного производства способствовало наличие обширного фонда свободных земель. Производство 95 % сельскохозяйственной продукции приходилось на долю Красноярского, Ачинского, Канского и Минусинского округов. В структуре посевов преобладали зерновые культуры (рожь, пшеница, овес, ячмень). Их соотношение определялось природно-климатическими условиями. В Енисейском округе сеяли в основном озимую рожь, южных округах – яровую рожь и пшеницу.

Господствующей системой земледелия оставались залежно-паровая, при которой вся возделываемая земля делилась на две части: одна – под обработкой (пашня и пары), другая – в резерве (залежь). По мере истощения или засорения пашни она поступала под залежь, а к обработке привлекались «отдохнувшие» земли.

Однако возможности экстенсивной системы были неограниченны, сокращение свободных земель заставляло крестьян переходить к методам более рационального использования земли. В 1879 г. один из крестьян села Березовка Красноярского округа в качестве опыта удобрил 0,5 десятины земли, посеяв клевер. Клевер не уродился, но посев на участке зерновых на следующий год дал урожай, в три раза превысивший средние сборы. Это дало толчок к использованию удобрений соседних сел [4]. Но даже в тех случаях, когда удобрение повышало урожайность в 2–3 раза, его дальнейшее применение было нерентабельным, поскольку выгоднее было поднять десятину новой пашни, чем удобрять такую же площадь старой. Но при этом вновь давала хороший урожай стабильно в течение двадцати лет, не требуя дополнительных затрат, а удобренная пашня – всего два года. Даже там, где большая часть земель была уже истощена, и наблюдался дефицит свободных земель, систематически применяли удобрения только четверть хозяйства.

В 1880–1890-е годы начинают распространяться машинная техника: жнейки, молотилки, сеялки. Однако ее широкому применению мешала дороговизна. Но, несмотря на это, крестьяне охотно шли на приобретение техники, так как она значительно сокращала затраты рабочего времени и расходы на наем рабочей силы. К концу XIX века по обеспеченности техникой Енисейская губерния значительно обгоняла другие Сибирские регионы. Государственной агроклиматической службы в регионе до конца XIX века не было и прогресса в замедлении осуществлялся благодаря таланту и трудам сибирского пахаря, создавшего народную агрономию. Усилиями самих крестьян апробировались новые сельскохозяйственные культуры, велись наблюдения и селекционные работы по адаптации новых семян, привозимых переселенцами. Эти опыты были весьма успешными. Об этом свидетельствовали награды, полученные на международных выставках, где были представлены образцы выведенных ими сортов ржи и пшеницы.

Результатом широкомасштабного сельскохозяйственного освоения территории стало проявление ряда негативных последствий изменения природной среды. Они были связаны с вырубкой лесов на склонах и в долинах рек, а также с несовершенной залежной системой и устаревших трехпольем. Требовался переход к травопольной системе земледелия, чего не произошло. В результате сократилось количество посева зерновых, понизились урожай и поголовье скота.

Таким образом, проведенный анализ историко-географического развития аграрного сектора Приенисейской Сибири позволил выявить основные тенденции формирования, природную обусловленность и историческую предопределенность социально-экономических и экологических проблем функционирования региональных систем аграрного природопользования. Наиболее освоенными и антропогенно измененными стали ландшафты долин рек, где человек селился еще с древнекаменного века. Начинает развиваться эрозия, дефляция, вторичное засоление почв. Меньше изменены ландшафты побережья, но и здесь сведение лесов на склонах активизировали эро-

зию, заиливание и обмеление рек и др. процессы. Учет исторического опыта поможет определить возможности решения этих проблем, что будет способствовать обеспечению устойчивого развития региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Безруких В. А. Агроприродный потенциал Приенисейской Сибири: оценка и использование : монография / Краснояр. гос. пед. ун-т им. В. П. Астафьева. Красноярск, 2010. 168 с.
2. Безруких В. А. Территориальная организация аграрного природопользования в условиях Приенисейской Сибири : монография ; Краснояр. гос. пед. ун-т им. В. П. Астафьева. Красноярск, 2008. 204 с.
3. История Сибири. С древних времен до наших дней : в 5 т. М. : Наука, 1968. С. 98–104.
4. Красноярье: пять веков истории : учеб. пособие по краеведению. Красноярск : Платина, 2005. 240 с.
5. Материалы по исследованию землепользования и хозяйственного быта сельского населения Иркут

ской и Енисейской губернии. Иркутск, 1893. Т. 4, вып. 4. 325 с.

REFERENCES

1. Bezrukikh V. A. Agroprirodnyy potentsial Priyeniseyskoy Sibiri: otsenka i ispol'zovaniye : monografiya / Krasnoyar. gos. ped. un-t im. V. P. Astaf'yeva. Krasnoyarsk, 2010. 168 s.
2. Bezrukikh V. A. Territorial'naya organizatsiya agrarnogo prirodopol'zovaniya v usloviyakh Priyeniseyskoy Sibiri : monografiya ; Krasnoyar. gos. ped. un-t im. V. P. Astaf'yeva. Krasnoyarsk, 2008. 204 s.
3. Istoriya Sibiri. S drevnikh vremen do nashikh dnei : v 5 t. M. : Nauka, 1968. S. 98–104.
4. Krasnoyar'ye: pyat' vekov istorii : ucheb. posobiye po krayevedeniyu. Krasnoyarsk : Platina, 2005. 240 s.
5. Materialy po issledovaniyu zemlepol'zovaniya i khozyaystvennogo byta sel'skogo naseleniya Irkutskoy i Eniseyskoy gubernii. Irkutsk, 1893. T. 4, vyp. 4. 325 s.

© Безруких В. А., Авдеева Е. В., Коротков А. А.,
Лигаева Н. А., Кузнецова О. А., 2024

Поступила в редакцию 14.09.2023
Принята к печати 22.01.2024

ОЦЕНКА 37-ЛЕТНИХ ПОЛУСИБОВ ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ ПО ОБРАЗОВАНИЮ МИКРОСТРОБИЛОВ

Ю. Е. Щерба, Н. А. Шенмайер*, А. С. Коростелев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: schenmaier@yandex.ru

Сосна кедровая сибирская (Pinus sibirica Du Tour) является одной из главных лесообразующих видов в нашей стране. Объектом исследования явились полусибовы сосны кедровой сибирской, произрастающие в дендрарии, расположенном на территории Караульного участкового лесничества СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Сопоставлена изменчивость полусибов от плюсовых деревьев, аттестованных в Орско-Симанском лесничестве Колыванского лесхоза Новосибирской области. Данные о материнских деревьях приведены из паспортов, составленных при их аттестации в 1977 г. Шишки с этих деревьев были заготовлены осенью 1986 г., посев проведен весной 1987 г., посадка на постоянное место в 2000 г. Количество побегов с микростробилами на дереве определяли визуально с помощью бинокля. Данные обработаны математически. Максимальное количество микростробилов отмечено у полусибов плюсовых деревьев 110/74 и 92/56. Наблюдается высокий уровень изменчивости количества микростробилов на отдельных полусибах, что позволило отселектировать особи для дальнейшего размножения: 84-12, 84-9, 79-8, 79-10.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, плюсовое дерево, полусибовы, микростробиловы, изменчивость, отбор.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 27–30

EVALUATION OF 37-YEAR-OLD SIBLINGS OF PLUS TREES OF PINUS SIBIRICA DU TOUR BY THE FORMATION OF MICROSTROBILES

Iu. E. Shcherba, N. A. Shenmayer*, A. S. Korostelev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: schenmaier@yandex.ru

Pinus sibirica Du Tour is one of the main forest-forming species in our country. The object of the study was the half-siblings of Pinus sibirica Du Tour growing in the arboretum located on the territory of the Precinct Forestry "Karaulnoe" of the Educational and Experimental Forestry of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. The variability of half-siblings of plus trees certified in the Orsko-Simansk forestry of the Kolyvan Forestry of the Novosibirsk region was compared. Data on mother trees are given from passports compiled during their certification in 1977. Cones from these trees were harvested in the fall of 1986. Sowing was carried out in the spring of 1987. Planting on a permanent place was in 2000. The number of shoots with microstrobiles on the tree was determined visually using binoculars. The data was processed mathematically. The maximum number of microstrobiles was noted on the half-siblings of the plus trees 110/74 and 92/56. There is a high level of variability in the number of microstrobiles on individual half-siblings, which made it possible to select individuals for further reproduction: 84-12, 84-9, 79-8, 79-10.

Keywords: Pinus sibirica Du Tour, plus tree, half-siblings, microstrobiles, variability, selection.

ВВЕДЕНИЕ

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica Du Tour*) является одной из основных лесообразующих видов в нашей стране. Проведение отбора по целевому назначению является важнейшим направлением селекции [1–6; 9; 11; 12]. Высокий уровень полиморфизма данного вида на всех этапах онтогенеза предоставляет возможность проведения отбора экземпляров в естественных и искусственных насаждениях с целью со-

хранения и размножения ценного генетического потенциала уникального вида, формировавшегося тысячелетиями в суровых климатических условиях Сибири [7]. Изучением внутривидовой изменчивости древесных видов занимались С. А. Мамаев [8], В. М. Роне [10], С. Н. Горошкевич [3] и др., которые отмечали, что в каждом районе произрастания нужно проводить отбор маточных деревьев для создания лесосеменных плантаций.

Создание эффективно функционирующих урожайных плантаций сосны кедровой сибирской невозможно без деревьев опылителей, обладающих определенными свойствами. В связи с этим отбор сосны кедровой сибирской должен проводиться не только по ряду хозяйственно важных признаков, но и на пыльцевую продуктивность. Необходимо проведение отбора исходных растений по пыльцевой продуктивности, потомство которых предназначено для использования при формировании плантаций [2].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования явились полусибовы сосны кедровой сибирской от плюсовых деревьев, аттестованных в Орско-Симанском лесничестве (квартал 56, выдел 12) Колыванского лесхоза Новосибирской области (название предприятия приведено по данным 1977 года), произрастающие в интродукционном отделении дендрария, расположенного на территории Караульного участкового лесничества СибГУ им. М. Ф. Решетнева (юг Средней Сибири). Данные о материнских деревьях: 92/56, 98/62, 99/63, 100/64, 110/74 приведены из паспортов, составленных при их аттестации в качестве плюсовых в 1977 г. Шишки с этих деревьев были заготовлены осенью 1986 г., посев проведен весной 1987 г., посадка на постоянное место

в 2000 г. Полусибовы на период исследований имели биологический возраст 37 лет.

Количество побегов с микростробилами на дереве определяли визуально с помощью бинокля. Отбор полусибов проводили по количеству микростробилов на дереве, сформировавшихся весной 2023 года. Данные обработаны математически.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показатели роста плюсовых деревьев приведены в табл. 1.

Возраст данных аттестованных деревьев варьировал от 110 до 140 лет. Их высота составляла 17–21 м, диаметр ствола 44–67 см. Наибольшие значения по высоте и диаметру ствола были у плюсового дерева 110/74 в возрасте 140 лет.

Показатели кроны плюсовых деревьев приведены в табл. 2.

Плюсовые деревья отличаются по диаметру кроны 7–9 м, протяженности кроны 15,0–19,4 м и женского яруса 5–8 м. Наибольшие показатели по диаметру кроны отмечены у плюсовых деревьев 92/56 и 110/74, протяженности кроны – 110/74 и 99/63 и женского яруса – 92/56 и 98/62.

Урожайность плюсовых деревьев и показатели шишек приведены в табл. 3.

Таблица 1

Высота, диаметр ствола плюсовых деревьев в насаждении

Номер дерева	Возраст, лет	Высота		Диаметр ствола	
		м	% к $X_{ср.}$	см	% к $X_{ср.}$
92/56	120	19	98,9	52	93,2
98/62	140	19	98,9	62	111,1
99/63	120	20	104,2	54	96,8
100/64	110	17	88,5	44	78,8
110/74	140	21	109,4	67	120,1
Средние значения	126	19,2	100,0	55,8	100,0

Таблица 2

Диаметр, протяженность кроны и женского яруса

Номер дерева	Крона		Протяженность			
	диаметр, м	% к $X_{ср.}$	кроны, м	% от высоты дерева	женского яруса	
					м	% к высоте
92/56	9	118,4	16,5	86,8	8	42,1
98/62	7	92,1	16,0	84,2	7	36,8
99/63	7	92,1	18,0	90,0	5	25,0
100/64	7	92,1	15,0	88,2	5	29,4
110/74	9	118,4	19,4	92,4	5	23,8
Среднее значение	7,6	100,0	17,0	100,0	6	33,3

Таблица 3

Урожайность и показатели шишек плюсовых деревьев

Номер дерева	Средние значения за 10-летний период (перед аттестацией)		Длина шишки		Количество семян в шишке		Полнозернистость семян	
	количество шишек, шт.	УЭС, шт./см	см	% к $X_{ср.}$	шт.	% к $X_{ср.}$	%	превышение, %
92/56	236	4,54	7,8	108,3	119	107,6	94	103,9
98/62	281	4,53	7,1	98,6	108	97,6	97	106,5
99/63	253	4,69	6,4	88,8	104	94,0	98	108,4
100/64	309	7,02	8,5	118,1	122	110,0	97	106,5
110/74	359	5,36	6,2	86,0	100	94,0	94	103,9
Среднее значение	288	5,23	7,2	100,0	110,6	100,0	90,4	100,0

Отселектированные плюсовые деревья за 10-летний период перед их аттестацией образовали среднее количество шишек за год по 236–359 шт. Максимальное их количество было у плюсового дерева 110/74, минимальное – 92/56. Удельная энергия семенования составила 5,23 шт./см. Среднее количество семян в шишке равно 110,6 шт. при максимальном значении 122 шт. у плюсового дерева 100/64. У этого же дерева отмечена наибольшая длина шишек (8,5 см). Полнозернистость семян плюсовых деревьев высокая и составляет 94–98 %.

Большое значение при создании урожайных плантационных культур сосны кедровой сибирской имеет образование шишек, которое зависит и от пыльцевой

продуктивности соседних деревьев. Цель наших исследований – отбор полусибов с наибольшим количеством микростробилов для дальнейшего их вегетативного размножения и использования посадочного материала в качестве опылителей.

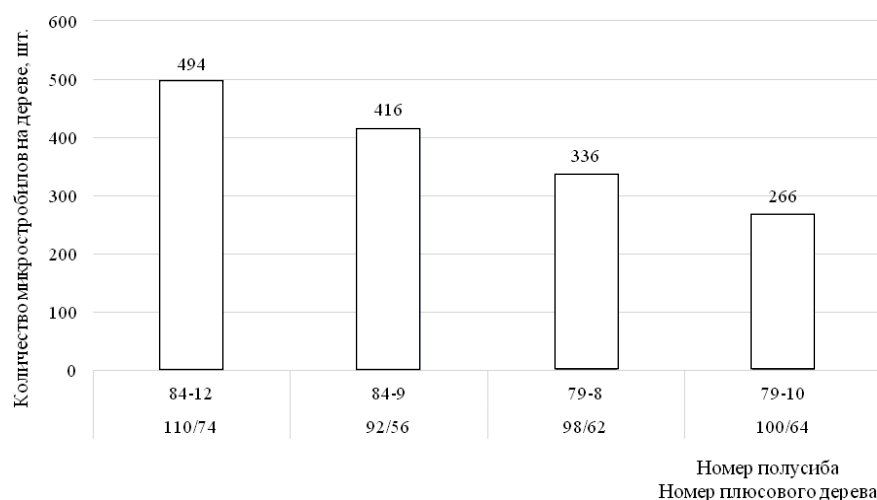
Образование микростробилов в потомстве плюсовых деревьев отражено в табл. 4.

Наибольшее количество микростробилов на дереве отмечено у полусибов плюсовых деревьев 110/74 и 92/56. Наблюдается высокий уровень изменчивости количества микростробилов на отдельных полусибах, что позволило отселектировать особи для дальнейшего размножения (см. рисунок).

Таблица 4

Количество микростробилов на полусибах в семьях плюсовых деревьев

Семья плюсового дерева	Побегов с микростробилами		Микростробилов на 1 побеге		Микростробилов на дереве	
	шт.	% к $X_{\text{ср}}$	шт.	% к $X_{\text{ср}}$	шт.	% к $X_{\text{ср}}$
92/56	11,0	87,3	17,3	160,2	190,3	130,9
98/62	12,3	97,6	6,9	63,9	84,9	58,4
99/63	7,3	57,9	3,0	27,8	21,9	15,1
100/64	11,5	91,3	14,0	129,6	161,0	110,7
110/74	21,0	166,7	12,8	118,5	268,8	184,9
Среднее значение	12,6	100,0	10,8	100,0	145,4	100,0



Отселектированные полусибы по образованию микростробилов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что в потомстве плюсовых деревьев выделяются экземпляры, которые обладают повышенной пыльцевой продуктивностью. В данном случае такие экземпляры были выявлены среди потомств плюсовых деревьев 110/74, 92/56, 98/62 и 100/64. Для дальнейшего размножения в качестве опылителей целесообразно использовать полусибы 84-12, 84-9, 79-8, 79-10. В потомстве плюсового дерева 99/63 такие экземпляры отсутствуют.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Братилова Н. П., Матвеева Р. Н., Орешенко С. А., Пастухова А. М. Изменчивость и отбор 42–45-летних

деревьев сосны кедровой сибирской разного географического происхождения (зеленая зона г. Красноярск). Красноярск : СибГТУ. 2013. 133 с.

2. Водин А. В., Матвеева Р. Н. Критерии отбора кедра сибирского по пыльцевой продуктивности // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 4-5. С. 387–390.

3. Горошкевич С. Н. Селекция кедра сибирского как орехоплодной породы // Лесное хозяйство. 2000. № 4. С. 25–27.

4. Земляной А. И., Ильичев Ю. Н., Тараканов В. В. Межклоновая изменчивость кедра сибирского по элементам семенной продуктивности: перспективы отбора // Хвойные бореальной зоны. 2010. № 1-2. С. 77–82.

5. Матвеева Р. Н., Милютин Л. И., Буторова О. Ф., Братилова Н. П. Отбор деревьев кедра сибирского

высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // Лесной журнал. 2017. № 2. С. 9–20. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9.

6. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Щерба Ю. Е. Влияние географического происхождения на репродуктивное развитие кедра сибирского на лесосеменной плантации за 24-летний период // Лесной журнал. 2011. № 4. С. 7–1.

7. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Братилова Н. П. Проявление изменчивости кедра сибирского на разных этапах онтогенеза // Современные проблемы науки и образования. 2006. № 2. С. 52–53.

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

9. Правдин Л. Ф. Селекция и семеноводство кедра сибирского в Восточной Сибири // Плодоношение кедра сибирского в Восточной Сибири. Москва : АН СССР, 1963. С. 5–21.

10. Роне В. М. Генетические основы селекции для плантационного лесовыращивания // Всесоюзное Совещание по лесной генетике, селекции и семеноводству. Петрозаводск, 1983. Ч. 1. С. 96–98.

11. Титов Е. В. Орехопродуктивная плантация кедра сибирского повышенной генетической ценности в Республике Алтай // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск : СибГТУ, 2009. С. 120–123.

12. Goncharenko G. G., Padutov V. E., Silin A. E. Allozyme Variation in Natural Populations of Eurasian Pines. II. Genetic Variation, Diversity, Differentiation and Gene Flow in Pinus Sibirica Du Tour in Some Lowland and Mountain Populations // Silvae Genetica. 1993. Vol. 42, No. 4-5. Pp. 246–253.

REFERENCES

1. Bratilova N. P., Matveyeva R. N., Oreshenko S. A., Pastukhova A. M. Izmenchivost' i otbor 42–45-letnikh derev'yev sosny kedrovoy sibirskoy raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya (zelenaya zona g. Krasnoyarska). Krasnoyarsk : SibGTU. 2013. 133 s.

2. Vodin A. V., Matveyeva R. N. Kriterii otbora kедra sibirskogo po pyl'tsevoy produktivnosti // Khvoynyye boreal'noy zony. 2007. T. 24. № 4-5. S. 387–390.

3. Goroshkevich S. N. Seleksiya kedra sibirskogo kak orekhoplodnoy porody // Lesnoye khozyaystvo. 2000. № 4. S. 25–27.

4. Zemlyanoy A. I., Il'ichev Yu. N., Tarakanov V. V. Mezheklonovaya izmenchivost' kedra sibirskogo po elementam semennoy produktivnosti: perspektivy otbora // Khvoynyye boreal'noy zony. 2010. № 1-2. S. 77–82.

5. Matveyeva R. N., Milyutin L. I., Butorova O. F., Bratilova N. P. Otbor derev'yev kedra sibirskogo vysokoy reproduktivnoy sposobnosti na geograficheskoy lesosemennoy plantatsii // Lesnoy zhurnal. 2017. № 2. S. 9–20. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.9.

6. Matveyeva R. N., Butorova O. F., Shcherba Yu. E. Vliyaniye geograficheskogo proiskhozhdeniya na reproduktivnoye razvitiye kedra sibirskogo na lesosemennoy plantatsii za 24-letniy period // Lesnoy zhurnal. 2011. № 4. S. 7–1.

7. Matveyeva R. N., Butorova O. F., Bratilova N. P. Proyavleniye izmenchivosti kedra sibirskogo na raznykh etapakh ontogeneza // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2006. № 2. S. 52–53.

8. Mamayev S. A. Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy. Moskva : Nauka, 1973. 284 s.

9. Pravdin L. F. Seleksiya i semenovodstvo kedra sibirskogo v Vostochnoy Sibiri // Plodonosheniye kedra sibirskogo v Vostochnoy Sibiri. Moskva : AN SSSR, 1963. S. 5–21.

10. Rone V. M. Geneticheskiye osnovy seleksii dlya plantatsionnogo lesovyrashchivaniya // Vsesoyuznoye Soveshchaniye po lesnoy genetike, seleksii i semenovodstvu. Petrozavodsk, 1983. Ch. 1. S. 96–98.

11. Titov E. V. Orekhoproductivnaya plantatsiya kedra sibirskogo povyshennoy geneticheskoy tsennosti v Respublike Altay // Plodovodstvo, semenovodstvo, introduksiya drevesnykh rasteniy. Krasnoyarsk : SibGTU, 2009. S. 120–123.

12. Goncharenko G. G., Padutov V. E., Silin A. E. Allozyme Variation in Natural Populations of Eurasian Pines. II. Genetic Variation, Diversity, Differentiation and Gene Flow in Pinus Sibirica Du Tour in Some Lowland and Mountain Populations // Silvae Genetica. 1993. Vol. 42, No. 4-5. Pp. 246–253.

© Щерба Ю. Е., Шенмайер Н. А.,
Коростелев А. С., 2024

Поступила в редакцию 20.10.2023
Принята к печати 22.01.2024

ВЛИЯНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НА РОСТ И СОСТОЯНИЕ ВНУТРИВИДОВЫХ ГИБРИДОВ КЕДРА СИБИРСКОГО В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛЕСОСТЕПИ

Е. В. Титов

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова
Российская Федерация, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
E-mail: lesovod_taks@vgtu.ru

На испытательной плантации 35-летних внутривидовых гибридов кедра сибирского в Воронежской области установлено влияние местоположения растений на плантации, обуславливающего объем, густоту зеленой части кроны и влажность почвы, на их рост и физиологическое состояние. Особенно заметно оно проявилось в лесостепи в экстремально жаркое лето 2021 года. В течение 36 дней при температуре 30–36 °С в результате интенсивной транспирации, усиления дыхания и резкого снижения фотосинтеза засохли от обезвоживания кедры, произрастающие с краю насаждения и внутри его, в «окнах» полога, на большой освещенной площади, с невысокой энергией роста и с большой испаряющей поверхностью кроны. Сохранили жизнеспособность гибриды, энергично растущие в густом стоянии на постоянно затененной, достаточно увлажненной почве, с относительно небольшой по протяженности и густоте фотосинтетической поверхностью кроны.

Ключевые слова: кедр сибирский, местоположение, площадь размещения, протяженность, объем, густота зеленой кроны, фотосинтез, дыхание, обезвоживание.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 31–35

IMPACT OF LOCATION ON GROWTH AND WEALTH OF INTRA-SPECIFIC HYBRIDS OF THE SIBERIAN CEDAR IN THE CENTRAL FOREST-STEPPE

E. V. Titov

Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozova
8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation
E-mail: lesovod_taks@vgtu.ru

On a test plantation of 35-year-old intraspecific hybrids of Siberian cedar in the Voronezh region, the influence of plants location on the plantation, which determines the volume, density of the green part of the crown and soil moisture, on their growth and physiological state was established. It was especially noticeable in the forest-steppe in the extremely hot summer of 2021. Within 36 days at a temperature of 30–36 °C, as a result of intensive transpiration, increased respiration and a sharp decrease in photosynthesis, the cedars dried up from dehydration, growing on the edge of the plantation and inside it, in the “windows” of the canopy, on a large illuminated area, with low growth energy and with a large evaporating surface of the crown. The hybrids remained viable, vigorously growing in dense standing on constantly shaded, sufficiently moistened soil, with a relatively small length and density of the photosynthetic surface of the crown.

Keywords: Siberian cedar, location, area, length, volume, green crown density, photosynthesis, respiration, dehydration.

ВВЕДЕНИЕ

Кедр сибирский – холодостойкая и влаголюбивая порода континентального климата, коренной сибиряк. В конце плейстоцена – начале плейстоценового похолодания широко распространился на европейской части России и достиг французских Альп. Позднее, в среднем голоцене, в связи с потеплением и иссушением климата, распространением широколиственных лесов, порода исчезла с Русской равнины. При очередном планетарном изменении климата, с появлением современной эпохи похолодания с повышенной влажностью, на ней снова создаются благоприятные условия для возвращения кедра сибирского на европей-

скую землю предков. Об этом свидетельствуют успешное продвижение в европейской части страны, с севера на юг, в течение последующих 800 лет ареала ели – влаголюбивой его спутницы, и длительный, более 300 лет опыт успешной интродукции породы от подзоны северной тайги до подзоны широколиственных лесов и лесостепи. Однако на таком огромном географическом пространстве экологические условия для кедра сибирского неодинаковы.

К большинству экологических факторов он не предъявляет высоких требований. Единственной его прихотью является потребность в повышенной влажности почвы и, особенно, воздуха. Кедр сибирский –

мезофит. Лучше растет при сумме годовых осадков более 500 мм. Не встречается в районах со среднегодовой влажностью воздуха менее 60 % [4]. На европейской части России лучшие условия по влагообеспечению, температурному режиму, плодородию почвы имеются в подзоне хвойно-широколиственных (смешанных) лесов [8]. Климатический режим в подзоне широколиственных лесов и лесостепи для породы не везде благоприятен, во время засух – рискованный. В Воронежской области кедр сибирский выдерживает 330 мм осадков в период с апреля по октябрь при среднегодовой влажности воздуха 74 %. Здесь, в Центральной лесостепи, особенно заметно проявляется лимитирующее влияние на его рост и состояние повышенного температурного режима и недостатка влаги, ограничивающих фотосинтез и усиливающих дыхание [3].

Интенсивность физиологических процессов, накопление органического вещества в процессе фотосинтеза, интенсивность дыхания и транспирации, жизненное состояние растения во многом зависят от объема и густоты зеленой части кроны, особенно в неблагоприятных для породы климатических условиях. Ее параметры определяются местоположением дерева в насаждении. Изучению жизненного состояния внутривидовых горнотаежных гибридов кедр сибирского различного местоположения на плантации в Центральной лесостепи посвящено настоящее исследование.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В сухой лесостепи европейской части России благоприятный для кедр сибирского микроклимат с повышенной влажностью воздуха формируется на небольших вырубках и полянах, окруженных затеняющими стенами спелого леса, преимущественно из широколиственных пород с многоярусным строением полога, на богатых супесях или суглинках, подстилаемых тяжелыми глинистыми или суглинистыми горизонтами.

В таких условиях успешно росли в Воронежской области до 35-летнего возраста все внутривидовые гибриды кедр сибирского от более двадцати комбинаций скрещиваний, проведенных на 50–55-летних деревьях в среднегорье Северо-Восточного Алтая (1100 м над ур. моря) [6]. Плантация находится в Государственном природном заказнике «Воронежская нагорная дубрава» на вырубке площадью 0,35 га в свежей дубраве снытьевой. Деревья на ней имеют различное местоположение. Большая часть располагается густо: в рядах через 1,0 м, между рядами – через 1,5 м, на постоянно ими затененной поверхности почвы. Небольшое количество – в небольших, освещенных «окнах», появившихся после удаления погибших соседей. Растения в крайних рядах и последние в рядах размещаются свободно, на расстоянии 5–8 м от окружающих стен леса, на открытой, лишенной подлеска, иссушаемой площади.

В каждом местоположении объектом исследований служили 9–12 деревьев, по 3 от каждой комбинации скрещивания. На спиленных засохших гибридах детально изучали биометрию ствола и кроны.

Гибриды различного размещения, густого или свободного, развиваются при неодинаковой освещен-

ности, влажности почвы, интенсивности испарения, внутреннего дефицита воды. Эти микроэкологические условия обуславливают основные физиологические процессы, фотосинтез, ассимиляцию и дыхание, водный режим, потерю воды при транспирации и ее возмещение, обеспечивающие рост и физиологическое состояние растений.

Худшим ростом, т. е. достоверно меньшей высотой (на 13–16 %) и диаметром (на 20 %), отличаются гибриды от всех комбинаций скрещивания, свободно растущие скраю насаждения и внутри его, в освещенных «окнах» на сравнительно большой площади размещения (36–45 м²). Для них характерна, соответственно, средняя (С = 18–20 %) и низкая (С = 10–12 %) вариабельность по высоте. Внутри плантации, при густом стоянии деревьев на затененной, вдвое меньшей площади (18,6 м²), кедр, в среднем, на 1,1–1,3 м выше и на 2 см толще. Они более однородны по высоте: С = 5–7 % (табл. 1).

Между основными биометрическими показателями ствола гибридов кедр сибирского и площадью их размещения установлена отрицательная корреляция: $r = -0,68-0,72$. Их значения выше при меньшей площади размещения – и ниже при большей. С площадью размещения высоко коррелируют параметры и густота кроны. На свободно растущих кедрях средняя протяженность зеленой кроны составляет 6,3–6,5 м, она занимает 73–80 % высоты ствола. Ширина кроны – 3,6 м. На деревьях с густым размещением эти показатели значительно ниже: протяженность зеленой кроны (4,6 м) – на 1,7–1,9 м или на 37–41 %, ширина (2,8 м) – на 0,8 м или 28 %.

Наглядно отражает неодинаковый рост 35-летних горнотаежных гибридов различного местоположения в высоту многолетняя погодичная динамика текущего прироста (рис. 1).

У всех растений признак изменяется синхронно: повышается и снижается в одни и те же годы. Это свидетельствует о преимущественном влиянии на него внешних факторов. Абсолютные значения прироста в высоту обусловлены внутренними, наследственными свойствами организма и условиями произрастания. Более энергично растут гибриды внутри насаждения. Слабее – с краю и в его «окнах». На данном этапе онтогенеза, в 10–35 лет, выделены три возрастных периода с различной энергией роста в высоту: 1 – ускоренного, 10–15 лет, 2 – очень быстрого, 16–28 лет, 3 – быстрого, 29–35 лет.

Варьирование признака в пределах организма, т. е. эндогенная изменчивость по С. А. Мамаеву [5], у гибридов различного местоположения неодинакова. Ранее было установлено, что она зависит от энергии роста гибридов [7]. Полученные данные подтверждают эту закономерность: эндогенная изменчивость прироста в высоту возрастает по мере ослабления энергии роста. В период ускоренного (19–27 см/год) и быстрого (27–37 см/год) роста данный признак варьирует на среднем уровне, снижаясь от С = 16–19 % до 14–17 %. Во время очень быстрого роста (33–48 см/год) – от среднего (С = 12–14 %) до низкого (С = 7,2 %) (табл. 2).

Значительная стабильность величины текущего прироста в высоту быстрорастущих внутривидовых

гибридов кедр сибирского свидетельствует о их генетическом гомеостазе – высокой саморегулирующей способности жизненных процессов организмов к воздействиям внешней среды [9].

В лесостепной зоне, при дефиците влаги, ограничивающим рост деревьев факторами являются максимальная температура воздуха и пониженная влажность почвы. Их решающее влияние на рост бука среди различных факторов окружающей среды установил Фритс [10] в течение двух вегетационных периодов. При высокой температуре рост снижается из-за очень высокой транспирации и обезвоживания листьев или хвои, закрывания устьиц при их усыхании и уменьшении фотосинтеза. С повышением температуры снижается поглощение CO_2 и падает скорость фотосинтеза [1; 2]. Особенно заметно его уменьшение при температурах выше критических [3].

Важное значение для роста и физиологического состояния деревьев имеют размер и плотность фото-

синтетической поверхности кроны. Чем она протяженнее, шире и гуще, тем сильнее в лесостепной зоне при длительном воздействии высокой и очень высокой температуры ослабляется рост и скорее наступает гибель растения от обезвоживания. Объем зеленой поверхности кроны связан с условиями произрастания и местоположением деревьев.

Кроны деревьев, находящихся внутри насаждения, менее насыщены ветвями первого порядка. По сравнению с кедрами, растущими с краю и в «окнах» насаждения, их значительно, на 51 %, меньше и на дереве, и на одном погонном метре высоты ствола: в верхней части кроны – на 34–43 % (8 ветвей вместо 12 и 14), в средней – на 15 % (12 вместо 14) (табл. 3). Толщина ветвей в верхней части кроны у деревьев различного местоположения одинакова: 10–12 мм; в средней части у гибридов, растущих внутри насаждения и в его «окнах» – 10–15 мм, с краю насаждения – 13–20 мм.

Таблица 1

Биометрия 35-летних горнотаежных внутривидовых гибридов кедр сибирского различного местоположения

Комбинация	Высота, м	Диаметр, см	Протяженность зеленой кроны		Ширина кроны, м	Площадь размещения, м ²	Состояние в 2021 г.
			м	% от ствола			
1. Внутри насаждения, густое размещение							
H ₂ xIЮ ₂	9,7±0,4	12±0,3	4,6±0,4	48	2,9±0,3	20,8±1,7	благона- дежные
H ₃ xT ₁₅	9,2±0,4	13±0,3	4,6±0,4	50	2,8±0,3	18,3±1,6	
H ₂₈ Eo	10,1±0,5	13±0,4	4,9±0,5	48	3,1±0,3	18,6±1,6	
H ₃₃ Eo	9,3±0,4	11±0,3	4,1±0,3	43	2,6±0,3	16,8±1,4	
среднее	9,6±0,4	12±0,3	4,6±0,4	48	2,8±0,3	18,6±1,6	
2. В «окнах» насаждения, свободное размещение							
H ₂ xIЮ ₂	8,5±0,8	11±0,3	6,2±0,5	73	3,6±0,4	41,1±8,1	сухие
H ₃ xT ₁₅	8,1±0,7	10±0,3	6,1±0,5	75	3,5±0,3	40,0±7,8	
H ₂₈ Eo	8,4±0,7	10±0,3	6,7±0,6	80	3,7±0,4	39,6±7,7	
H ₃₃ Eo	8,2±2,6	10±0,2	6,2±0,5	76	3,4±0,3	37,7±7,5	
среднее	8,3±0,7	10±0,3	6,3±0,5	76	3,6±0,3	39,6±7,7	
3. С краю насаждения, свободное размещение							
H ₂ xIЮ ₂	8,3±1,0	10±0,2	6,7±0,8	81	3,6±0,3	44,7±8,3	сухие
H ₂₈ Eo	8,7±1,1	10±0,3	6,4±0,7	74	3,6±0,3	40,3±8,4	
H ₃₃ Eo	8,5±1,0	10±0,3	6,5±0,8	75	3,6±0,3	35,6±7,8	
среднее	8,5±1,0	10±0,3	6,5±0,8	76	3,6±0,3	40,3±8,1	

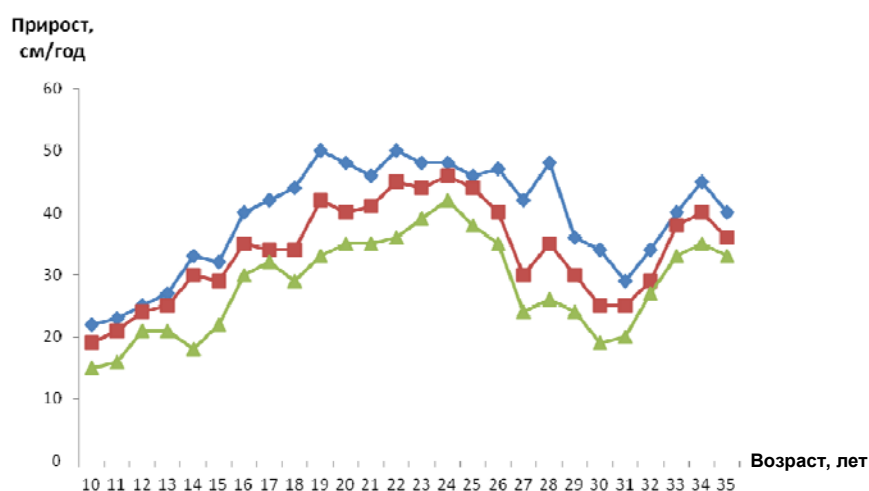


Рис. 1. Текущий годовой прирост в высоту горнотаежных гибридов кедр сибирского различного местоположения в насаждении:

— Внутри насаждения — С краю — В "окнах"

Наиболее заметно проявилось влияние местоположения и связанного с ним объема фотосинтетической поверхности крон на физиологическое состояние гибридов кедров сибирского в засушливом 2021 году. В июле и августе в течение 36 дней постоянно сохранялась необычно высокая температура воздуха: 30–36 °С. Она превышала средний многолетний максимум этих месяцев на 4–9 °С. На свободно размещенных кедров

с протяженной зеленой кроной, на высохшей почве, засохла вся хвоя, и они погибли от обезвоживания. Растущие густо гибриды, с относительно небольшой по протяженности и объему зеленой кроной, благодаря возмещению потери воды на транспирацию из постоянно отененной, влажной почве, сохранили жизнеспособность и приличный годичный прирост в высоту (30–32 см) (рис. 2).

Таблица 2

Эндогенная изменчивость текущего прироста в высоту у внутривидовых гибридов кедров сибирского различного местоположения

Местоположение деревьев	Высота, м	Возраст, лет					
		10–15		16–28		29–35	
		M+m, см	C, %	M+m, см	C, %	M+m, см	C, %
Внутри насаждения	9,6±0,4	27,0±4,6	16,0	46,0±3,3	7,2	36,8±5,0	13,6
С краю насаждения	8,5±1,0	24,7±4,5	18,2	39,2±4,9	12,1	32,4±4,9	15,1
В «окнах» насаждения	8,3±0,7	18,8±3,9	19,4	33,4±4,8	14,1	27,3±5,2	16,8

Таблица 3

Показатели кроны у внутривидовых гибридов кедров сибирского различного местоположения

Местоположение	Верхняя часть, 35–28 лет			Средняя часть, 27–18 лет		
	протяженность, м	кол-во ветвей, шт.		протяженность, м	кол-во ветвей, шт.	
		общее	на 1 пог. м		общее	на 1 пог. м
Внутри насаждения	3,1	25	8,1	1,5	17	11,6
С краю насаждения	2,7	32	11,7	3,8	55	13,7
В «окнах» насаждения	2,2	30	13,8	4,1	59	14,4



Рис. 2. Физиологически ослабленные опушечные кедров сибирские засохли в лесостепи от обезвоживания в засушливом 2021 году

На просторе, при длительном освещении всей кроны при температуре выше критической (более 30 °С), у растений усиливается дыхание и быстро уменьшается фотосинтез. Это привело к замедленному росту сеянцев сосен кедровой, смолистой и ладанной [3]. Из-за потери на дыхание большого количества углеводов, которые при обычных температурах расходуются на рост, у растений резко снижается прирост. Мезофиты обладают слабой водоудерживающей способностью, поэтому при высокой, особенно критиче-

ской, температуре и низкой влажности у кедров сибирского резко возрастает транспирация, внутренний дефицит воды, что приводит к обезвоживанию, снижению вегетационного роста, засыханию хвои. При отсутствии возмещения потерь воды на открытой, лишенной густого подлеска, иссушенной почве, наступает гибель растений от обезвоживания. То есть, незатененная, иссушенная почва является одной из причин гибели гибридов кедров сибирского в лесостепной зоне. На другой, 40-летней плантации внут-

ривидовых высокогорных гибридов породы в аналогичных лесорастительных условиях Государственного природного заказника, при свободном размещении (4–5 м) деревьев с протяженной и широкой кроной, площадь между которыми затенена густым подлеском из лещины, липы, кленов, в засушливом 2021 году не погибло ни одно растение от обезвоживания. Данная плантация – объект дальнейших исследований жизнеспособности кедров сибирского в рискованных природно-климатических условиях Центральной лесостепи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Центральной лесостепи, в условиях повышенного температурного режима и недостатка влаги, внутривидовые горнотаежные 35-летние гибриды кедров сибирского, располагающиеся свободно с краю плантации и в ее «окнах», с протяженной и широкой кроной, в результате снижения фотосинтеза и усиленного дыхания отличаются невысокой энергией роста. В засушливом 2021 году они все погибли от обезвоживания. Гибриды густого стояния, со значительно меньшей (на 31 %) по протяженности, плотной кроной, затеняющей и обеспечивающей сохранение влажности в почве, растут достоверно более энергично. Все они сохранили жизнеспособность в 2021 году.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бендер О. Г. Фотосинтез хвои кедров сибирского на северной границе произрастания // XII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. Томск, 2017. С. 116–117.
2. Влияние условий произрастания сосны кедровой сибирской на процессы фотосинтеза и транспирации / А. П. Глинушкин, С. М. Хамитова, Н. А. Бабич [и др.] // Хвойные бореальной зоны. Т. XL, № 5, 2022. С. 361–368.
3. Крамер П., Козловский П. Физиология древесных растений. Москва : Гослесбумиздат, 1963. 328 с.
4. Крылов Г. В., Таланцев Н. К., Козакова Н. Ф. Кедр. М. : Лесная пром-сть, 1983. 216 с.
5. Мамаев С. А. О проблемах и методах внутривидовой систематики древесных растений, II. Амплитуда изменчивости // Закономерности формообразования и дифференциации вида у древесных растений. Свердловск, 1969. С. 3–38.
6. Титов Е. В. Рост внутривидовых горнотаежных гибридов кедров сибирского в Воронежской области // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений ; Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 107–112.

7. Титов Е. В. Эндогенная изменчивость текущего прироста у внутривидовых гибридов кедров сибирского в Центральной лесостепи // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений : материалы XXI Междунар. науч. конф. Красноярск, 2018. С. 233–236.

8. Титов Е. В. Плантационное лесоводство. Воронеж : ФГБОУ ВО «ВГЛТА», 2012. 127 с.

9. Lerner Y. M. Genetic Homeostasis. N.Y. Wiley Sons, 1954.

10. Fritts H. C. An analysis of radial growth of beech in a central Ohio forest during 1954–1955, Ecology, 39, 1958. P. 705–720.

REFERENCES

1. Bender O. G. Photosynthesis of Siberian stone pine needles on the northern border of growth // XII Siberian meeting and school of young scientists on climate and environmental monitoring. Tomsk, 2017. S. 116–117.
2. Glinushkin A. P., Khamitova S. M., Babich N. A. [et al.] Influence of growing conditions of Siberian stone pine on the processes of photosynthesis and transpiration // Conifers of the boreal zone. T. XL, No. 5, 2022. S. 361–368.
3. Kramer P., Kozlovsky P. Physiology of woody plants. Moscow : Gosles-bumizdat, 1963. 328 p.
4. Krylov G. V., Talantsev N. K., Kozakova N. F. Kedr. M. : Lesnaya prom-st, 1983. 216 p.
5. Mamaev S. A. On the problems and methods of intraspecific taxonomy of woody plants, II. Amplitude of variability // Patterns of formation and differentiation of species in woody plants. Sverdlovsk, 1969. S. 3–38.
6. Titov E. V. Growth of intraspecific mountain taiga hybrids of Siberian stone pine in the Voronezh region // Fruit growing, seed production, introduction of woody plants; Sib. state technological un-t. Krasnoyarsk, 2016. S. 107–112.
7. Titov E. V. Endogenous variability of current growth in intraspecific hybrids of Siberian stone pine in the Central forest-steppe // Fruit growing, seed production, introduction of woody plants: Proceedings of the XXI Intern. scientific conf. Krasnoyarsk, 2018. S. 233–236.
8. Titov E. V. Plantation forestry. Voronezh : FGBOU VO «VGLTA», 2012. 127 p.
9. Lerner Y. M. Genetic homeostasis. N.Y. Wiley Sons. 1954.
10. Fritts H. C. An analysis of radial growth of beech in a central Ohio forest during 1954–1955, Ecology, 39, 1958, pp. 705–720.

© Титов Е. В., 2024

Поступила в редакцию 10.04.2023

Принята к печати 22.01.2024

ОТНОШЕНИЕ ДИАМЕТРА КРОНЫ К ДИАМЕТРУ СТВОЛА: ВСЕОБЩИЕ МОДЕЛИ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ*

В. А. Усольцев^{1, 2}, Н. И. Плюха¹, И. С. Цепордей²

¹Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

²Ботанический сад Уральского отделения РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а

^{1, 2}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

¹nikcskript@mail.ru

²ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

Кроны деревьев подвергались гораздо меньшему количественному изучению, чем их стволы, в первую очередь из-за их более низкой потребительной стоимости. Однако размер кроны, тесно связанный с фотосинтетической способностью дерева, является важным параметром при изучении роста деревьев. В сомкнутых и загущенных древостоях измерение диаметра кроны менее точно и гораздо более трудозатратно по сравнению с другими показателями. Поэтому наличие аллометрических моделей для оценки диаметра крон снижает затраты при получении новых исходных данных. В литературных источниках отношение диаметра кроны к диаметру ствола на высоте груди (относительный диаметр кроны) использовалось для прогнозирования размера площади роста дерева и разработки режимов прореживания, для прогнозирования густоты древостоя при заданном среднем диаметре ствола и для оценки диаметра ствола по диаметру кроны, измеренному с помощью методов дистанционного зондирования. Цель нашего исследования – для основных лесобразующих видов и родов Евразии рассчитать всеобщие аллометрические зависимости относительного диаметра кроны от диаметра ствола дерева. По фактическим данным измерений 5497 модельных деревьев 23 лесобразующих видов и родов (подродов) Евразии впервые составлены всеобщие аллометрические модели связи относительного диаметра кроны с диаметром ствола на высоте груди. Согласно выполненному ранжированию, виды и роды по величине относительного диаметра кроны распределяются в следующей последовательности в порядке убывания: Juglans, Phellodendron, Maackia, Acer, Ulmus, Chosenia, Salix, Quercus, Carpinus, Tilia, Fraxinus, Robinia, Populus, Larix, Fagus, Betula, Haploxydon, Chamaecyparis, Abies, Picea, Alnus, Pinus, Cryptomeria. Модели на уровне родов могут быть применены для тех видов в пределах рода, данные по которым пока отсутствуют.

Ключевые слова: относительный диаметр кроны, аллометрические модели, ранжирование видов и родов.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 36–42

THE RATIO OF CROWN DIAMETER TO STEM DIAMETER: GENERIC MODELS OF FOREST-FORMING SPECIES OF EURASIA**

V. A. Usoltsev^{1, 2}, N. I. Plyukha¹, I. S. Tsepordey²

¹Ural State Forest Engineering University,
37, Sibirskiy Trakt, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Botanical Garden, Ural Branch of RAS,
202a, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

^{1, 2}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

¹nikcskript@mail.ru

²ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

The crowns of trees were subjected to much less quantitative study than their stems, primarily because of their lower use value. However, the size of the crown, closely related to the photosynthetic ability of the tree, is an important parameter in the study of tree growth. In closed and thickened stands, measuring the diameter of the crown is less accurate and much more labor-consuming compared to other indicators. Therefore, the availability of allometric models for estimating the diameter of crowns reduces costs when obtaining new initial data. In literature, the ratio of crown diameter

* Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

** The publication was prepared based on the results of the research carried out within the framework of the state task of the Botanical Garden, Ural Branch of RAS.

to stem diameter at breast height (relative crown diameter) was used to predict the size of the tree growth area and to develop thinning regimes, to predict the stand density at a given average stem diameter and to estimate the stem diameter by crown diameter measured using remote sensing methods. The purpose of our study is to calculate the generic allometric dependences of the relative diameter of the crown on the diameter of the tree stem for the main forest-forming species and genera of Eurasia. According to the actual measurement data of 5,497 model trees of 23 forest-forming species and genera (subgenera) of Eurasia, allometric models of the relationship between the relative diameter of the crown and the stem diameter at breast height were compiled for the first time. According to the ranking performed, species and genera are distributed according to the relative diameter of the crown in the following descending order: *Juglans*, *Phellodendron*, *Maackia*, *Acer*, *Ulmus*, *Chosenia*, *Salix*, *Quercus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus*, *Robinia*, *Populus*, *Larix*, *Fagus*, *Betula*, *Haploxydon*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*. Models at the level of genera can be applied to those species for which data are not yet available within the genus.

Keywords: relative crown diameter, allometric models, ranking of species and genera.

ВВЕДЕНИЕ

Кроны деревьев подвергались гораздо меньшему количественному изучению, чем их стволы, в первую очередь из-за их более низкой потребительной стоимости. Однако размер кроны, тесно связанный с фотосинтетической способностью дерева, является важным параметром при изучении роста деревьев. Наличие взаимосвязи между размером кроны и диаметром ствола хорошо известно [15; 23; 26; 31; 35]. Изменчивость диаметра кроны в значительной степени является результатом изменчивости густоты деревьев и часто используется для оценки энергии роста, конкурентной способности деревьев [10; 34]. Оценка диаметра кроны является важным компонентом при моделировании роста и связывания ими атмосферного углерода [29; 30], при оценке степени затенения деревьев [21], пылеудерживающей способности и риска ветровала [20], при оценке площади листовой поверхности [5], при моделировании динамики сомкнутости полога [16] и заполнения просветов в пологе [8]. Размер кроны дерева является ключевой переменной, поскольку он коррелирует с пространством, занимаемым деревом, а также с его физиологическими функциями [22].

В сомкнутых и загущенных древостоях, особенно в смешанных, измерение диаметра кроны менее точно и гораздо более трудозатратно по сравнению с другими показателями [12]. Поэтому наличие аллометрических моделей для оценки диаметра крон снижает затраты при получении новых исходных данных [7; 15]. Кроме того, наличие подобных аллометрических уравнений позволяет лесным менеджерам управлять структурой и составом насаждений для достижения желаемых экономических, социальных и экологических выгод [18; 28].

В литературе получило распространение применение относительного диаметра кроны D_{cr}/D (или отношения диаметра кроны к диаметру ствола на высоте груди) в различных приложениях [26]. Этот показатель был предложен в XIX веке в качестве «индекса пространства роста» (*Wachstums Raum Index*) [25] при целевом выращивании крупномерных буковых древостоев. Позднее соотношение D_{cr}/D использовалось для оценки толерантности вида к изменению густоты древостоя [9], прогнозирования размера площади роста дерева и разработки режимов прореживания [19], прогнозирования густоты древостоя при заданном среднем диаметре ствола [14], расчета максимально возможных значений площади сечений стволов [6], прогнозирования предпочитаемых расстояний между

деревьями [27], оценки устойчивости дерева к ветровым нагрузкам и снеголому [24], а также для оценки диаметра ствола по диаметру кроны, измеренному с помощью методов дистанционного зондирования [11; 35].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель нашего исследования – для основных лесобразующих видов и родов Евразии рассчитать всеобщие аллометрические зависимости относительного диаметра кроны от диаметра ствола дерева и выполнить их ранжирование при данном диаметре ствола.

Для реализации поставленной цели исследования использована авторская база данных для лесов Евразии [1], из которой взяты данные 5497 модельных деревьев. Исходные данные обмеров модельных деревьев представлены на уровне видов на региональном уровне (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L.f.) D. Don., *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Scvorts., *Maackia amurensis* Rupr. и др.) и на уровне родов (подродов) как совокупностей викарирующих видов – на трансконтинентальном уровне. Построение моделей на уровне не только видов, но также родов и подродов, позволяет применить их в локальных условиях и заполнить имеющиеся «белые пятна» по отдельным видам. Представленность родов (подродов) различными видами в наших исходных данных была показана ранее [2].

Результаты статистической обработки общего массива исходных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты статистической обработки исходных данных

Статистики анализируемых показателей	D , см	D_{cr} , м
Среднее значение	14,1	2,81
Минимальное значение	0,20	0,07
Максимальное значение	72,9	15,50
Стандартное отклонение	9,67	1,76
Коэффициент изменчивости, %	68,6	62,7
Число наблюдений	5497	5497

Примечание. D и D_{cr} – соответственно диаметр ствола на высоте груди, см, и диаметр кроны, м.

При оценке и моделировании продуктивности лесных сообществ традиционно сосуществуют две концепции: локальности и всеобщности. Аллометрические модели фитомассы деревьев локального уров-

ня обычно относятся к тому или иному виду того или иного региона, и такие модели исчисляются уже тысячами [17]. Всеобщие аллометрические модели могут быть представлены на уровне родов [3] или на уровне, обезличенном по видовому составу. Последние обычно имеют теоретическое обоснование [32]. Их базовый принцип: в основе кажущейся сложности растительных сообществ лежат простые правила [33].

В нашем исследовании принята следующая структура всеобщей аллометрической модели на уровне как видов, так и родов (подродов) [13]:

$$\ln(D_{cr}/D) = a_0 + a_1(\ln D), \quad (1)$$

где D_{cr}/D – относительный диаметр кроны, приведенный к одной размерности с целью обеспечения сопоставимости с ранее опубликованными результатами исследований относительного диаметра кроны [14]. В данном случае в соотношении D_{cr}/D оба диаметра выражены в см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета модели (1) сведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, для некоторых родов (*Abies*, *Betula*, *Tilia*) коэффициент детерминации находится на относительно низком уровне (0,20–0,22), что обусловлено влиянием неучтенных факторов, таких, как густота или добротность местопроизрастания. Тем не менее, все модели статистически значимы на уровне $p < 0,001$, за исключением модели для кленов, значимой на уровне $p < 0,01$ (табл. 2). Необходимо отметить, что, имея в виду обычно менее значимые величины коэффициента детерминации при мо-

делировании относительных характеристик (индексов) кроны и ствола, некоторые исследователи коэффициент детерминации не показывают и ограничиваются расчетом стандартной ошибки, t -критерия регрессионного коэффициента и показателя уровня значимости p [13].

Ранжирование видов и родов по величине относительного диаметра кроны выполнено при среднем диаметре ствола 14,1 см (табл. 1). Согласно установленному ранжированию (рисунок), древесные виды и роды распределились в порядке уменьшения относительного диаметра кроны в последовательности: *Juglans*, *Phellodendron*, *Maackia*, *Acer*, *Ulmus*, *Chosenia*, *Salix*, *Quercus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus*, *Robinia*, *Populus*, *Larix*, *Fagus*, *Betula*, *Haploxyton*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*.

Выполненное ранжирование 11 европейских видов [14] показало, что при диаметре ствола 14 см относительный диаметр кроны варьирует в диапазоне от 40 у *Juglans regia* до 22 у *Betula* spp. Если не принимать во внимание 7 видов из правой части нашего распределения (*Haploxyton*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*), которые отсутствовали в анализе европейских видов [14], то наш ряд также начинается видом *Juglans* и заканчивается родом *Betula* при значениях относительного диаметра кроны соответственно 52 и 22. В целом, европейские виды распределились в порядке уменьшения относительного диаметра кроны в последовательности [14]: *Juglans regia*, *Castanea sativa*, *Prunus avium*, *Quercus robur*, *Fraxinus excelsior*, *Sorbus aucuparia*, *Populus* spp., *Tilia cordata*, *Acer pseudoplatanus*, *Fagus sylvatica*, *Betula* spp.

Таблица 2
Результаты расчета модели (1)

№	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (1)		<i>t</i> -критерий для <i>a</i> ₁	<i>SE</i>	<i>adjR</i> ²	<i>n</i>
		<i>a</i> ₀	<i>a</i> ₁				
1	Подрод <i>Pinus</i> L. (двухвойные сосны)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,0052	−0,4260	43,3	0,34	0,472	2093
2	Род <i>Picea</i> Dietr. (ели)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,4408	−0,5472	48,7	0,25	0,792	626
3	Род <i>Abies</i> Mill. (пихты)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,1349	−0,4236	4,8	0,39	0,195	93
4	Подрод <i>Haploxyton</i> (Koehne) (пятихвойные сосны)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,1121	−0,3807	11,4	0,24	0,590	90
5	Род <i>Larix</i> Mill. (лиственницы)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,2306	−0,4146	17,5	0,25	0,702	131
6	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don. (криптомерия японская)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	3,8826	−0,4101	6,5	0,13	0,593	29
7	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Sieb. et Zucc.) Endl. (кипарисовик)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	3,9310	−0,3181	5,0	0,16	0,487	26
8	Род <i>Betula</i> L. (березы)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	3,7988	−0,2575	13,8	0,33	0,212	707
9	Род <i>Populus</i> L. (осины и тополя)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,0337	−0,3337	18,3	0,24	0,539	286
10	Род <i>Alnus</i> Gaertn. (ольхи)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,0580	−0,4201	13,8	0,33	0,323	399
11	Род <i>Tilia</i> L. (липы)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,6630	−0,5245	5,7	0,36	0,223	112
12	Род <i>Quercus</i> L. (дубы)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,8127	−0,5464	17,2	0,46	0,430	390
13	Род <i>Fagus</i> L. (буки)						
	ln(<i>D</i> _{ср} / <i>D</i>)	4,1402	−0,3855	13,2	0,27	0,448	215

Окончание таблицы 2

№	Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты модели (1)		t -критерий для a_1	SE	$adjR^2$	n
		a_0	a_1				
14	Род <i>Fraxinus</i> L. (ясени)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	4,3577	-0,4249	9,0	0,30	0,519	76
15	Род <i>Carpinus</i> L. (грабы)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	4,7182	-0,5379	10,2	0,30	0,527	93
16	Род <i>Salix</i> L. (ивы)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	4,1029	-0,2539	7,3	0,08	0,854	10
17	<i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Scvorts. (чозения)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	4,7989	-0,4952	5,5	0,42	0,647	17
18	Род <i>Acer</i> L. (клёны)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	4,7190	-0,3708	2,8	0,22	0,333	15
19	<i>Robinia pseudoacacia</i> L. (робиния ложноакациевая, или акация белая)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	4,6103	-0,5476	7,3	0,39	0,469	61
20	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr. (бархат амурский)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	5,5433	-0,6242	8,0	0,12	0,913	7
21	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. (маакия амурская)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	5,2561	-0,5728	8,5	0,10	0,922	7
22	<i>Ulmus japonica</i> (Rehd.) Sarg. (вяз японский)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	5,4512	-0,6641	4,6	0,17	0,769	7
23	<i>Juglans mandshurica</i> Maxim. (орех маньчжурский)						
	$\ln(D_{cr}/D)$	5,9507	-0,7583	10,1	0,10	0,944	7

Примечание. $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка модели (1); n – количество наблюдений; t -критерий для a_1 – уровень значимости регрессионного коэффициента модели (1) по Стьюденту. В свободный член введена поправка на логарифмирование [4].

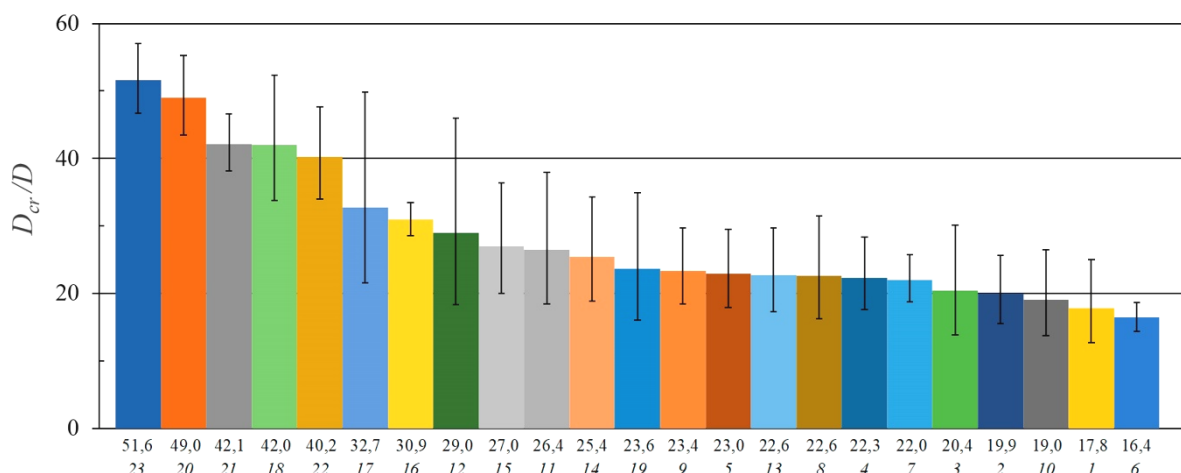


Диаграмма распределения 23 видов, родов и подродов Евразии по величине относительного диаметра кроны при среднем значении диаметра ствола на высоте груди, равном 14,1 см (табл. 1).

Цифры по оси абсцисс: в верхнем ряду – значения относительного диаметра кроны для каждого из 23 видов, родов и подродов, м; в нижнем ряду – порядковые номера вида, рода или подрода, показанные в табл. 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по фактическим данным измерений 5497 модельных деревьев 23 лесообразующих видов и родов (подродов) Евразии впервые составлены всеобщие аллометрические модели связи относительного диаметра кроны с диаметром ствола на высоте груди. Согласно выполненному ранжированию, виды и роды по величине относительного диаметра кроны распределяются в следующей последовательности в порядке убывания: *Juglans*, *Phellodendron*, *Maackia*, *Acer*, *Ulmus*, *Chosenia*, *Salix*, *Quercus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Fraxinus*, *Robinia*, *Populus*, *Larix*,

Fagus, *Betula*, *Haploxylon*, *Chamaecyparis*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Pinus*, *Cryptomeria*.

Предложенные модели могут быть использованы при прогнозировании размера площади роста дерева и разработке режимов прореживания, прогнозировании густоты древостоя при заданном среднем диаметре ствола, при расчете максимально возможных значений площади сечений стволов и для оценки диаметра ствола по диаметру кроны, измеренному с помощью методов дистанционного зондирования. Модели на уровне родов могут быть применены для тех видов в пределах рода, данные по которым пока отсутствуют.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. 3-е дополненное издание. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.
2. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Морфология кроны лесообразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41(6). С. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.
3. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41(4). С. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.
4. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.
5. Binkley D., Campoe O. C., Gspaltl M. et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 288. P. 5–13.
6. Briegleb P. A. An approach to density measurement in Douglas fir // Journal of Forestry. 1952. Vol. 50. P. 529–536.
7. Buchacher R., Ledermann T. Interregional crown width models for individual trees growing in pure and mixed stands in Austria // Forests. 2020. Vol. 11. Article 114. DOI: 10.3390/f11010114.
8. Choi J., Lorimer C. G., Vanderwerker J. et al. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 152 (1). P. 235–258.
9. Dawkins H. C. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees // Commonwealth Forestry Review. 1963. Vol. 42. P. 318–333.
10. Fu L., Sharma R. P., Hao K. et al. A generalized interregional nonlinear mixed-effects crown width model for Prince Rupprecht larch in northern China // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 389. P. 364–373. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.12.034.
11. Gering L. R., May D. M. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee // Southern Journal of Applied Forestry. 1995. Vol. 19. P. 177–181.
12. Gominski D., Kariryaa A., Brandt M. et al. Benchmarking individual tree mapping with sub-meter imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023 (in press). DOI: 10.48550/arXiv.2311.07981.
13. Hein S., Spiecker H. Crown and tree allometry of open-grown ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) // Agroforestry Systems. 2008. Vol. 73. P. 205–218.
14. Hemery G. E., Savill P. S., Pryor S. N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 215. P. 285–294. DOI:10.1016/j.foreco.2005.05.016.
15. Hou R., Chai Z. Predicting crown width using nonlinear mixed-effects models accounting for competition in multi-species secondary forests // Peer Journal. 2022. Vol. 10. Article e13105. <http://doi.org/10.7717/peerj.13105>.
16. Ishii H. T., Tanabe S. I., Hiura T. Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems // Forest Science. 2004. Vol. 50 (3). P. 342–355.
17. Luo Y., Wang X., Ouyang Z. et al. A review of biomass equations for China's tree species // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12 (1). P. 21–40. DOI:10.5194/essd-12-21-2020.
18. Nowak D. J., Dwyer J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems // Urban and community forestry in the Northeast, 2nd ed. J. E. Kuser (ed.). Springer, 2007. P. 25–46.
19. Philip M. S. Measuring trees and forests, 2nd ed. CAB International: Wallingford, 1994. 310 p.
20. Pretzsch H., Biber P., Uhl E. et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests // Urban Forestry & Urban Greening. 2015. Vol. 14 (3). P. 466–479. [dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006).
21. Putz F. E., Parker G. G., Archibald R. M. Mechanical abrasion and inter crown spacing // The American Midland Naturalist. 1984. Vol. 112 (1). P. 24–28.
22. Qiu S., Gao P., Pan L. et al. Developing nonlinear additive tree crown width models based on decomposed competition index and tree variables // Journal of Forestry Research. 2023. Vol. 34. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s11676-022-01576-0
23. Raptis D., Kazana V., Kazaklis A. et al. A crown width-diameter model for natural even-aged black pine forest management // Forests. 2018. Vol. 9(10). Article 610. <https://doi.org/10.3390/f9100610>.
24. Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., et al. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – an experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany // Canadian Journal of Forest Research. 2010. Vol. 40(8). P. 1636–1652.
25. Seebach Ch. Der modifizierte Buchen-Hochwald-Betrieb // Kritische Blätter für Forst- und Jagdwissenschaft. 1845. Vol. 21. P. 147–185.
26. Sharma R. P., Bilek L., Vacek Z. et al. Modelling crown width-diameter relationship for Scots pine in the central Europe // Trees-Structure and Function. 2017. Vol. 31. P. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.
27. Thill A. Qualites des grumes de quelques essences feuillues, et de l'épicea commun // Bulletin de la Société royale forestière de Belgique. 1980. Vol. 87. P. 1–7.
28. Troxel B., Piana M., Ashton M. S. et al. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA // Urban Forestry & Urban Greening. 2013. Vol. 12 (2). P. 144–153. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.02.006.
29. Wang B., Bu Y., Tao G. et al. Quantifying the effect of crown vertical position on individual tree competition: total overlap index and its application in

sustainable forest management // Sustainability. 2020. Vol. 12. Article 7498. DOI: 10.3390/su12187498.

30. Wang H., Wan P., Wang Q. et al. Prevalence of inter-tree competition and its role in shaping the community structure of a natural Mongolian Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forest // Forests. 2017. Vol. 8. Article 84. DOI: 10.3390/f8030084.

31. Wang J., Jiang L., Xin S. et al. Two new methods applied to crown width additive models: a case study for three tree species in Northeastern China // Annals of Forest Science. 2023. Vol. 80. Article 11. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01165-5>.

32. West G. B., Brown J. H., Enquist B. J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system // Nature. 1999. Vol. 400. P. 664–667. DOI: 10.1038/23251.

33. Whitfield J. All creatures great and small // Nature. 2001. Vol. 413. P. 342–344. DOI: 10.1038/35096683.

34. Yang Y., Huang S. Allometric modelling of crown width for white spruce by fixed-and mixed-effects models // Forestry Chronicle. 2017. Vol. 93. P. 138–147. DOI: 10.5558/tfc2017-020.

35. Zasada M., Stereńczak K., Brach M. Relationship between dbh and crown characteristics derived by airborne laser scanner // Sylwan. 2011. Vol. 155 (11). P. 725–735.

REFERENCES

1. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The third edition, enlarged. Yekaterinburg: Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.

2. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Crown morphology of forest-forming genera of Eurasia: allometry and ranking // Conifers of the Boreal Area. 2023. Vol. XLI. No. 6. P. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.

3. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Chasovskikh V. P. Models for estimating biomass of forest-forming species by crown diameter as related to drone involving // Conifers of the Boreal Area. 2023. Vol. 41(4). P. 300–305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.

4. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49–53.

5. Binkley D., Campoe O. C., Gspaltl M. et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 288. P. 5–13.

6. Briegleb P. A. An approach to density measurement in Douglas fir // Journal of Forestry. 1952. Vol. 50. P. 529–536.

7. Buchacher R., Ledermann T. Interregional crown width models for individual trees growing in pure and mixed stands in Austria // Forests. 2020. Vol. 11. Article 114. DOI: 10.3390/f11010114.

8. Choi J., Lorimer C. G., Vanderwerker J. et al. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 152 (1). P. 235–258.

9. Dawkins H. C. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees // Commonwealth Forestry Review. 1963. Vol. 42. P. 318–333.

10. Fu L., Sharma R. P., Hao K. et al. A generalized interregional nonlinear mixed-effects crown width model for Prince Rupprecht larch in northern China // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 389. P. 364–373. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.12.034.

11. Gering L. R., May D. M. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee // Southern Journal of Applied Forestry. 1995. Vol. 19. P. 177–181.

12. Gominski D., Kariryaa A., Brandt M. et al. Benchmarking individual tree mapping with sub-meter imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023 (in press). DOI: 10.48550/arXiv.2311.07981.

13. Hein S., Spiecker H. Crown and tree allometry of open-grown ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) // Agroforestry Systems. 2008. Vol. 73. P. 205–218.

14. Hemery G. E., Savill P. S., Pryor S. N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 215. P. 285–294. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.016.

15. Hou R., Chai Z. Predicting crown width using nonlinear mixed-effects models accounting for competition in multi-species secondary forests // Peer Journal. 2022. Vol. 10. Article e13105. <http://doi.org/10.7717/peerj.13105>.

16. Ishii H. T., Tanabe S. I., Hiura T. Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems // Forest Science. 2004. Vol. 50(3). P. 342–355.

17. Luo Y., Wang X., Ouyang Z. et al. A review of biomass equations for China's tree species // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12(1). P. 21–40. DOI: 10.5194/essd-12-21-2020.

18. Nowak D. J., Dwyer J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems // Urban and community forestry in the Northeast, 2nd ed. J. E. Kuser (ed.). Springer, 2007. P. 25–46.

19. Philip M. S. Measuring trees and forests, 2nd ed. CAB International: Wallingford, 1994. 310 p.

20. Pretzsch H., Biber P., Uhl E. et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests // Urban Forestry & Urban Greening. 2015. Vol. 14(3). P. 466–479. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.04.006.

21. Putz F. E., Parker G. G., Archibald R. M. Mechanical abrasion and inter crown spacing // The American Midland Naturalist. 1984. Vol. 112(1). P. 24–28.

22. Qiu S., Gao P., Pan L. et al. Developing nonlinear additive tree crown width models based on decomposed competition index and tree variables // Journal of Forestry Research. 2023. Vol. 34. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s11676-022-01576-0.

23. Raptis D., Kazana V., Kazaklis A. et al. A crown width-diameter model for natural even-aged black pine forest management // Forests. 2018. Vol. 9(10). Article 610. <https://doi.org/10.3390/f9100610>.

24. Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., et al. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – an experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany // *Canadian Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 40(8). P. 1636–1652.

25. Seebach Ch. Der modifizierte Buchen-Hochwald-Betrieb // *Kritische Blätter für Forst- und Jagdwissenschaft*. 1845. Vol. 21. P. 147–185.

26. Sharma R. P., Bilek L., Vacek Z. et al. Modelling crown width-diameter relationship for Scots pine in the central Europe // *Trees-Structure and Function*. 2017. Vol. 31. P. 1875–1889. DOI: 10.1007/s00468-017-1593-8.

27. Thill A. Qualites des grumes de quelques essences feuillues, et de l'epicea commun // *Bulletin de la Société royale forestière de Belgique*. 1980. Vol. 87. P. 1–7.

28. Troxel B., Piana M., Ashton M. S. et al. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2013. Vol. 12(2). P. 144–153. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.02.006.

29. Wang B., Bu Y., Tao G. et al. Quantifying the effect of crown vertical position on individual tree competition: total overlap index and its application in sustainable forest management // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Article 7498. DOI: 10.3390/su12187498.

30. Wang H., Wan P., Wang Q. et al. Prevalence of inter-tree competition and its role in shaping the

community structure of a natural Mongolian Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forest // *Forests*. 2017. Vol. 8. Article 84. DOI 10.3390/f8030084.

31. Wang J., Jiang L., Xin S. et al. Two new methods applied to crown width additive models: a case study for three tree species in Northeastern China // *Annals of Forest Science*. 2023. Vol. 80. Article 11. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01165-5>.

32. West G. B., Brown J. H., Enquist B. J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system // *Nature*. 1999. Vol. 400. P. 664–667. DOI: 10.1038/23251.

33. Whitfield J. All creatures great and small // *Nature*. 2001. Vol. 413. P. 342–344. DOI: 10.1038/35096683.

34. Yang Y., Huang S. Allometric modelling of crown width for white spruce by fixed-and mixed-effects models // *Forestry Chronicle*. 2017. Vol. 93. P. 138–147. DOI: 10.5558/tfc2017-020.

35. Zasada M., Stereńczak K., Brach M. Relationship between dbh and crown characteristics derived by airborne laser scanner // *Sylwan*. 2011. Vol. 155(11). P. 725–735.

© Усольцев В. А., Плюха Н. И.,
Цепордей И. С., 2024

Поступила в редакцию 05.12.2023
Принята к печати 22.01.2024

ХАРАКТЕРИСТИКА РОДА *SALIX* И ОСОБЕННОСТИ ФЕНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ В НОРИЛЬСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ РАЙОНЕ

Н. Н. Чербакова^{1, 2}, Г. С. Вараксин³

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28

²Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики –
филиал ФИЦ КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 663305, г. Норильск, ул. Комсомольская, 1

E-mail: ^{1, 2}natalya.ochikolova@mail.ru, ¹varaksings@mail.ru

Дана общая характеристика видов ивы, произрастающих в условиях Норильского промышленного района (НПП). Выявлены особенности фенологического развития 3-х видов – *Salix lanata* L. s. str., *Salix hastata* L., *Salix viminalis* L. в данных условиях произрастания. Полученные результаты позволяют в дальнейшем выбрать наиболее перспективный вид для выращивания посадочного материала с использованием семенного и черенкового материала.

Ключевые слова: характеристика ивовых НПП, фенологическое развитие ивы, техногенно нарушенные территории.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 43–50

CHARACTERIZATION OF THE GENUS *SALIX* AND PECULIARITIES OF PHENOLOGICAL DEVELOPMENT OF SOME SPECIES IN THE NORILSK INDUSTRIAL REGION

N. N. Cherbakova^{1, 2}, G. S. Varaksin³

¹The V. N. Sukachev Forest Institute SB RAS – separate subdivision FIC KSC SB RAS
50, build. 28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Research Institute of Agriculture and Arctic Ecology – branch FIC SRC SB RAS
1, Komsomolskaya St., Norilsk, 663305, Russian Federation

E-mail: ^{1, 2}natalya.ochikolova@mail.ru, ¹varaksings@mail.ru

A general characterization of willow species growing in the Norilsk Industrial Region (NPR) is given. Peculiarities of phenological development of 3 species – *Salix lanata* L. s. str., *Salix hastata* L., *Salix viminalis* L. in these growing conditions are revealed. The obtained results will allow further selection of the most promising species for cultivation of planting material using seed and cuttings.

Keywords: characterization of willow NPR, phenological development of willow, technogenically disturbed areas.

ВВЕДЕНИЕ

Род Ива – *Salix* L. входит в большое семейство Ивовые (*Salicaceae*) и включает около 370 видов [1–3], которые произрастают почти во всех географических зонах России. Всего на Таймыре 26 видов ивы, произрастающих от арктической тундры до лесотундры [4]. Во флоре окрестностей Норильска по описанию Н. Г. Маскаленко [5] встречается 15 видов рода *Salix*: *Salix reticulata* L., *Salix polaris* Wahlenb., *Salix pulchra* Cham., *Salix saxatilis* Turcz. ex. Ledeb., *Salix glauca* L., *Salix reptans* Rupr., *Salix lanata* L. ssp., (incl. *S. glandulifera* Flod.), *Salix recurvigemma* A. Skv., *Salix lapponum* L., *Salix myrtilloides* L., *Salix pyrolifolia*

Ledeb., *Salix hastata* L., *Salix viminalis* L., *Salix dasyclados* Wimm., *Salix jenissensis* (Fr. Schmidt.) Flod.

Благодаря исследованиям Филатовой С. Н. [6] к вышеперечисленным видам были добавлены (*Salix alaxensis* Cov., *Salix bebbiana* Sarg., *Salix boganiensis* Trautv., *Salix fuscescens* Anderss., *Salix rhamnifolia* Pall., *Salix phylicifolia* L.). Учеными Научно-исследовательского института сельского хозяйства и экологии Арктики, проводившими геоботанические обследования в окрестностях Норильска, обнаружены вид *Salix arctica* Pall. s. str. и *Salix nummularia* Anderss. [7], что также подтверждено в сводке Н. А. Секретаревой [8]. В географическом отношении род *Salix*

представлен наполовину видами евроазиатского типа распространения, в меньшей степени – циркумполярными и в очень малой степени – восточносибирскими субэндемиками [4]. Данные виды имеют широкую экологическую амплитуду, но часто избегают сухие малоснежные места, предпочитая увлажненные уча-

стки. В таких условиях произрастания ивы входят в состав устойчивых длительносуществующих фитоценозов [4; 9].

Для рода *Salix* НПП характерны разнообразные жизненные формы, начиная от древовидных кустарников и заканчивая полукустарниками (табл. 1).

Таблица 1
Характеристика ивовых в пределах НПП

№ п/п	Вид	Жизненная форма	По требованию к характеру увлажнения	По требованию к плодородию почв	Местообитание
1	<i>Salix alaxensis</i> Cov.	древовидные кустарники	мезофиты	мезотрофные	на аллювиальных песчаных, галечных отложениях пойм
2	<i>Salix bebbiana</i> Sarg.		мезофиты	эвтрофные	в пойменных участках
3	<i>Salix boganidensis</i> Trautv.		мезофиты	мезотрофные	на сырых илах по берегам рек, иногда образует заросли
4	<i>Salix dasyclados</i> Wimm.		мезофиты	мезотрофные	в приречных кустарниковых зарослях
5	<i>Salix jenissensis</i> (Fr. Schmidt.) B. Floder.		мезофиты	эвтрофные	на луговых надпойменных террасах
6	<i>Salix pyrolifolia</i> Ledeb.		мезогигрофиты	эвтрофные	в пойменных участках, в редколесьях
7	<i>Salix viminalis</i> L.		мезофиты	мезотрофные	в приречных кустарниковых зарослях
8	<i>Salix fuscescens</i> Anderss.	кустарники	мезогигрофиты	мезотрофные	на тундровых болотах, в болотинах вокруг озер
9	<i>Salix glauca</i> L. s. str.		эвритопные растения	мезотрофные	на склонах к озерам, среди кустарников на возвышениях, в редколесьях
10	<i>Salix hastata</i> L.		мезофиты	мезотрофные	на песчаных участках надпойменных террас, в кустарниковых тундрах
11	<i>Salix lanata</i> L. s. str.		мезофиты	эвтрофные	в приречных кустарниковых зарослях, в редколесьях в тундрах
12	<i>Salix lapponum</i> L.		мезогигрофиты	эвтрофные	в тундрах, прирусловых зарослях кустарников
13	<i>Salix myrtilloides</i> L.		мезогигрофиты	эвтрофные	во влажных тундрах, ерниках
14	<i>Salix phylicifolia</i> L.		эвритопные растения	мезотрофные	в приречных кустарниковых зарослях, в лугово-кустарниковых комплексах
15	<i>Salix pulchra</i> Cham.		эвритопные растения	олиготрофные, мезотрофные	на болотистых окраинах озер, на песках
16	<i>Salix reptans</i> Rupr.		мезогигрофиты	мезотрофные	на открытых залужовых песках, в густых, но низких кустарниках на скатах
17	<i>Salix reticulata</i> L.		эвритопные растения	эвтрофные	на голых пятнах в тундрах, под кустами на склонах к озерам, в низкокустарниковых тундрах
18	<i>Salix recurvigemma</i> A. Skv.		эвритопные растения	эвтрофные	в тундрах, на пойменных лужайках
19	<i>Salix rhamnifolia</i> Pall.		мезофиты	мезотрофные	в приозерных ивняках, местами на глыбовых развалах
20	<i>Salix saxatilis</i> Turcz. ex. Ledeb.		эвритопные растения	мезотрофные	на песчаных лужках, по приречным опушкам кустарников, на влажных склонах
21	<i>Salix arctica</i> Pall. s. str.	полукустарники	мезофиты	мезотрофные	в каменистых дриадовых и травяно-дриадовых тундрах
22	<i>Salix nummularia</i> Anderss.		ксеромезофиты	мезотрофные	на песчаных гривах в поймах, на которых доминирует
23	<i>Salix polaris</i> Wahlenb.		гигромезофиты	эвтрофные	на голых пятнах в тундрах

Главным фактором, определяющим формы роста и размещения растений данного рода, является тепло. По мере перемещения к южной части территории НПП, увеличиваются размеры кустарников. В условиях благоприятного сочетания тепла и влаги ивовые растения способны достигать огромных размеров [9]. Древовидные кустарники наиболее распространены в районе Талнах, где присутствует 7 видов. В Центральном районе встречаются 4 вида, отмечается отсутствие *Salix alaxensis* Cov., *Salix bebbiana* Sarg., *Salix boganidensis* Trautv. Особенно часто в городских районах встречается вид *Salix alaxensis* Cov. Кустарники в районе Талнах представлены 10 видами, в Центральном районе – 12 видами, при этом *Salix fuscescens* Anderss. не встречается в окрестностях Норильска [10]. Полукустарники выражены небольшими скоплениями, местами единичными экземплярами [7]. Характеристика ивовых представлена в табл. 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках проведенных фенологических наблюдений в окрестностях г. Норильска, недалеко от реки Норильской (координаты: широта 69.388407 долгота 88.360347) были исследованы три вида ивы: *Salix lanata* L. s. str., *Salix hastata* L., *Salix viminalis* L., как наиболее устойчивые растения к техногенному воздействию [11], способные к высокой продуктивности в сочетании со способностью к аутовегетативному размножению [12], а также применяемые при фиторемедиации [13].

Наблюдения проводили в течение вегетационного периода 2022–2023 гг. и результаты сопоставляли с данными наблюдений 2003 г [14]. Для проведения наблюдений было выбрано 15 модельных деревьев, которые исследовались каждые 3–5 дней. Для изучения фенологических фаз развития применялась методика фенологических наблюдений в ботанических садах и общая фенология и методы фенологических исследований [15–17]. Фенофазы отмечались в том случае, если не менее 50 % всех образцов проходили данную фазу одновременно.

Климат НПП является субарктическим и характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха, которая составляет $-9,6^{\circ}\text{C}$. Средняя температура воздуха в июле колеблется от 8°C до 15°C , а в январе от -29°C до -34°C с минимальным значе-

нием -53°C . Количество осадков, выпадающих за год, варьирует в диапазоне 220–550 мм. Снежный покров на территории района появляется в конце сентября и сохраняется в течение 250 дней. Высота снежного покрова зависит от рельефа и может достигать 10 и более метров. Снег сходит в конце мая – начале июня, вскрытие рек происходит в то же время. Преобладающее направление ветров в зимний период – юго-восточное и восточное, в летний период – северо-западное и юго-восточное. Среднее значение скорости ветра составляет 5,0 м/с, абсолютный максимум может достигать ~ 40 м/с [18].

В табл. 2 представлены значения среднемесячных температур воздуха и количество осадков в вегетационные периоды наблюдений, сравниваемые с двадцатилетним периодом, на основании данных Таймырского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ТЦГМС), доступных на сайте www.rp5.ru.

Анализ погодных условий 2003 и 2022–2023 гг. и средние данные за 20-летний период времени показали, что наибольшие отклонения среднемесячной температуры воздуха зафиксированы в вегетационном периоде 2022 г. Следует отметить, что этот год отличался более ранним приходом весны и холодной осени, остальные месяцы имели небольшое различие показателей с многолетними данными. Погодные условия вегетационного периода 2023 года складывались благоприятно для роста и развития ивы. Однако в начальный период вегетации растений наблюдалась прохладная и влажная погода. В дальнейшем температурные условия соответствовали среднему значению, характерному за последний двадцатилетний период наблюдений. В ходе анализа погодных данных 2003 года не было обнаружено существенных изменений в показателях температуры воздуха по сравнению со среднемноголетними. Важно отметить, что вегетационный период 2022 года имел значительные различия по количеству выпавших осадков и их неравномерному распределению. В начале периода наблюдался дефицит осадков, а в конце вегетации – избыток. Количество выпавших осадков в 2023 г. превышало среднюю норму последнего 20-летнего периода более чем в 1,5 раза. Несмотря на обилие осадков, но низкую температуру воздуха в июне, растения поздно начали вегетацию.

Таблица 2
Погодные условия вегетационного периода 2003 и 2022–2023 гг.

Месяцы	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$				Количество осадков, мм			
	средняя фактическая			сред. мног. 2001–2021	фактическое			сред. мног. 2001–2021
	2003	2022	2023		2003	2022	2023	
Май	–2,3	1,8	–2,0	–2,6	38	11,4	74,4	36,1
Июнь	10,8	13,5	8,5	9,7	32	16	78,6	42,3
Июль	11,4	15,6	15,6	14,9	81	7,7	99,4	51,2
Август	14,0	11,6	15,5	11,5	67	103,1	25,8	62,8
Сентябрь	6,1	2,7	5,4	5,03	42	116,6	102,5	45,3
Сумма					260	254,8	380,7	237,7
Количество дней вегетационного периода					95	119	115	–
Преобладающие ветры в вегетационный период					СЗ, ЮВ	З, СЗ	СЗ; ЮВ	СЗ, ЮВ

Таблица 3
Даты наступления фенофаз у 3-х видов ивы НПП в период наблюдений 2003 г. и 2022–2023 гг.

Фен-ие фазы развития ив	Вид								
	<i>Salix hastata</i> L. (ива копьевидная)			<i>Salix viminalis</i> L. (ива прутовидная)			<i>Salix lanata</i> L. s. str. (ива шерстистая)		
	2003	2022	2023	2003	2022	2023	2003	2022	2023
Пч	02.VI–20.VI	20.V–07.VI	08.VI–25.VI	07.VI–23.VI	25.V–10.VI	01.VI–18.VI	26.V–12.VI	15.V – 31.V	02.VI–20.VI
Прод-ть	18 дн.	18 дн.	17 дн.	16 дн.	15 дн.	17 дн.	16 дн.	16 дн.	18 дн.
Л¹	20.VI–27.VI	30.V–05.VI	20.VI–30.VI	23.VI–30.VI	10.VI–18.VI	16.VI–25.VI	12.VI–20.VI	28.V–03. VI	20.VI–29.VI
Прод-ть	7 дн.	5 дн.	10 дн.	7 дн.	8 дн.	9 дн.	8 дн.	6 дн.	9 дн.
Ц^{1,2}	01.V–20.V	05.V–22.V	20.V–10.VI	04.V–29.V	01.V–25.V	15.V–10.VI-	25.IV–05.VI	20.IV–30.V	30.IV–10.VI
Прод-ть	20 дн.	17 дн.	21 дн.	25 дн.	25 дн.	26 дн.	40 дн.	40 дн.	41дн.
Ц³	10.VI	05.VI-	15.VI	01.VI	25.V	12.VI	22.V	15.V	25 V
Ц⁴	22.VI	18.VI	30.VI	13.VI	10.VI	23.VI	13.VI	04.VI	16 VI
Прод-ть	12 дн.	13 дн.	15 дн.	13 дн.	15 дн.	11 дн.	22 дн.	19 дн.	22 дн.
Пл¹	22.VI–02.VIII	18.VI–25.VII	25.VI–31.VII	18.VI–31.VII	22.VI–03.VIII	20.VI–01.VIII	07.VI–22.VII	12.VI–28.VII	16.VI–04.VIII
Прод-ть	40 дн.	37 дн.	36 дн.	42 дн.	41 дн.	41 дн.	49 дн.	46 дн.	48 дн.
Пл²	25.VII–06.VIII	18.VII–29.VII	20.VII–31.VII	04.VII–20.VII	01.VII–20.VII	02.VII–22.VII	28.VI–20.VII	04.VII–24.VII	09.VII–02.VIII
Прод-ть	12 дн.	11 дн.	11 дн.	16 дн.	20 дн.	20 дн.	22 дн.	20 дн.	24 дн.
Л²	23.VIII	22.VIII	25.VIII	18.VIII	18.VIII	22.VIII	25.VIII	20.VIII	23.VIII
Период вегетации растений	115	109	97	105	110	99	122	122	115



Salix lanata L. s. str.
(ива шерстистая)



Salix viminalis L.
(ива прутовидная)



Salix hastata L.
(ива копьевидная)

Рис. 1. Набухание цветочных почек



Salix lanata L. s. str.
(ива шерстистая)



Salix viminalis L.
(ива прутовидная)



Salix hastata L.
(ива копьевидная)

Рис. 2. Цветение



Salix lanata L. s. str.
(ива шерстистая)



Salix viminalis L.
(ива прутовидная)



Salix hastata L.
(ива копьевидная)

Рис. 3. Созревание семян

В исследованиях 2003 г не было выявлено отличий данных в количестве выпавших осадков за последний двадцатилетний период. Анализируя собранные метеорологические данные вегетационных периодов 2003 г. и 2022–2023 гг., можно сделать вывод, что эти наблюдения отражают особенность климата НПП с его неравномерным распределением осадков и резкими колебаниями температуры воздуха.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Сезонный ритм развития растений является ключевым показателем их взаимодействия с окружающей средой. Изучение этого ритма позволяет определить временные рамки различных фаз развития растений, оценить устойчивость к неблагоприятным климатическим условиям местообитания и продуктивность наблюдаемых растений.

В рамках годичного цикла развития ив И. Н. Елагин и А. И. Лобанов выделяют несколько фенологических фаз [19]. Для изучения фенологических особенностей и различий в развитии ив НПП нами были выбраны следующие важнейшие фазы: Набухание листовых почек (Пч), Развертывание листьев (Л1), Набухание цветочных почек и бутонизация (Ц1,2), Начало цветения (Ц3), Конец цветения (Ц4), Созревание семян (Пл1), Рассеивание семян (Пл2), Массовое расцветивание листьев (Л2). Исследуя наступление фенологических фаз развития местных видов ив, проводили аналогию между ранними и поздними сроками наступления фенофаз данных растений в других регионах [20–25]. Данные наблюдений представлены выше в табл. 3.

Анализируя данные фенологических наблюдений, выявили особенности развития трех видов ивы, произрастающих в НПП:

1. Раньше всех отходила от «зимнего покоя» *Salix lanata* L. s. str. (ива шерстистая). Её цветочные почки начинали набухать в апреле, затем в начале мая *Salix hastata* L. (ива копьевидная), через 5–10 дней присоединялась к этой фазе *Salix viminalis* L. (ива прутьевидная).

2. Замечено, что *Salix lanata* L. s. str. имела самый продолжительный период набухания цветочных почек и бутонизации, который составлял 40 дней. Затем следовала *Salix viminalis* L. – 26 дней, и с 20-дневным периодом *Salix hastata* L. (рис. 1).

3. Вторая декада мая являлась началом набухания листовых почек у *Salix lanata* L. s. str., в то время как у других видов ив данное явление происходило в основном в первую неделю июня. Продолжительность этой фазы развития практически одинакова для всех видов ив и составляет примерно 15–17 дней.

4. Развертывание листовой пластинки у всех видов происходило достаточно быстро, как правило, за 5–7 дней. Раньше начинали распускаться листья у *Salix lanata* L. s. str. и *Salix hastata* L. str.

5. Фаза цветения ив в значительной степени определялась температурными условиями. Средняя продолжительность этой фазы составляла примерно 16 дней. Однако можно отметить, что самым продолжительным периодом цветения из трех видов ив является у *Salix lanata* L. s. str. – до 22 дней (рис. 2).

6. Созревание семян у всех видов ив начиналось в конце июня. Первыми начали созревать семена *Salix lanata* L. s. str., затем – остальные виды. Самыми продолжительными сроками созревания обладали семена *Salix lanata* L. s. str., которым требовалось 46–49 дней. За ними следовали семена *Salix viminalis* L., которые достигали зрелости за 41–42 дня, и семена *Salix hastata* L. str., для которых этот процесс занимал 36–40 дней (рис. 3).

7. Ранняя фаза рассеивания семян проявлялась у *Salix hastata* L. (28 июня), позднее у *Salix lanata* L. s. str. (25 июля). Рассеивание семян *Salix viminalis* L. начиналось в начале июля. Продолжительность этой фазы различна у трех видов ив. Быстрее всего этот процесс происходил у *Salix hastata* L. – всего за 11 дней, затем *Salix viminalis* L. – 16 дней. У *Salix lanata* L. s. str., самая длительная фаза рассеивания семян – 24 дня.

8. Первое пожелтение листьев у ив наблюдалось в конце июля. Вероятно, это происходило из-за воздействия аэротехногенных выбросов промышленных предприятий на растительный покров НПП. Массовое расцветивание листьев происходило с середины августа. В первой декаде сентября у всех растений листья опадали, завершая годовой цикл их развития. *Salix lanata* L. s. str. имела самый продолжительный цикл развития – 122 дня, за ним следовала *Salix hastata* L. str. – 115 дней и *Salix viminalis* L. – 110 дней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью фенологических наблюдений было выявлено, что продолжительность цикла развития у трех видов ив незначительно различается по годам и зависит от генетически выработанных фенологических особенностей вида. Календарные сроки наступления основных фаз развития для каждого вида растений примерно одинаковые и в основном зависят от температурных условий в исследуемом районе. Резкие колебания температуры весной и внезапное похолодание в мае могут вызвать задержку начала цветения на несколько дней. Однако ход развития растений в остальные фазы происходит в ритмичном порядке.

Анализ полученных результатов наблюдений позволил получить более полное представление о фенологических особенностях развития данных видов ив, которые могут представлять интерес для специалистов лесного хозяйства и природоохранных организаций, занимающихся вопросами изучения, сбора и выращивания посадочного материала ивы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Недосеко О. И., Викторов В. П. Жизненные формы видов рода *Salix* L. России // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2018. Vol. 3 (2). DOI: 10.21685/2500-0578-2018-2-5. URL: <http://rjee.ru/rjee-3-2-2018-5/>.
2. Валягина-Малютин Е. Т. Ивы европейской части России // Иллюстрированное пособие для работников лесного хозяйства. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. 217 с.
3. Васина А. Л. Ива – *Salix* L. // Определитель растений Ханты-Мансийского автономного округа / Новосибирск, Екатеринбург : Баско, 2006. С. 95–101.

4. Пospelova E. B., Pospelov I. N. Флора сосудистых растений Таймыра и сопредельных территорий. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2007. Ч. 1. 457 с.
5. Москаленко Н. Г. К флоре окрестностей Норильска (северо-запад Средне-Сибирского плато) // Ботанический журнал. 1970. Т. 55, № 2. С. 263–272.
6. Филатова С. Н. Семейство *Salicaceae* во флоре Норильска // TerraArctica-2017: Биологические ресурсы и рациональное природопользование : материалы Международной научно-практической конференции: г. Норильск, 7–9 апреля 2017 г. С. 119–120.
7. Янченко З. А., Филатова С. Н. Растительность водоохранной зоны рек в окрестностях города Норильска // Биологические ресурсы Крайнего Севера: современное состояние и рациональное использование : сб. науч. тр. СПб.: ГУАП, 2014. С. 287–307.
8. Секретарева Н. А. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2004. 131 с.
9. Анциферов Г. И. Ива. М. : Лесная промышленность, 1984. 101 с.
10. Филатова С. Н., Сергеева О. К. Древесно-кустарниковые виды сосудистых растений в урбановлоре Норильска // Культура. Наука. Производство. 2021. № 7. С. 28–32.
11. Вараксин Г. С., Кузнецова Г. В. Особенности биологической рекультивации в Норильском промышленном районе // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 92–101.
12. Karp A. Willows as a source of renewable fuels and diverse products // Forestry Sciences. 2014. № 81. P. 617–641.
13. Zioch M. et al. Modeling of phytoextraction efficiency of microbially stimulated *Salix dasyclados* L. in the soils with different speciation of heavy metals // International Journal of Phytoremediation. 2017. № 19 (12). P. 1150–1164.
14. Вараксин Г. С., Антоненко С. Н. Фенологические особенности кустарниковых видов ив в окрестностях г. Норильска // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 60-летию института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН и 70-летию образования Красноярского края. Красноярск : Институт леса СО РАН, 2004. 491 с.
15. Методика фенологических наблюдений в Ботанических садах СССР // Сб. статей / под ред. П. И. Лапина. М. : Изд-во Гл. бот. сада АН СССР, 1972. 135 с.
16. Шульц Г. Э. Общая фенология. Л. : Наука, 1981. 188 с.
17. Общая фенология и методы фенологических исследований: учебное пособие для студентов геогр.-биол. фак. // Сост.: О. В. Янцер, Е. Ю. Терентьева / Екатеринбург : Изд-во УрГПУ, 2013. 218 с.
18. Савченко В. А., Новицкий М. А. Современный климат Норильска. М. : ИПФ «ГАРТ», 2003. 168 с.
19. Елагин И. Н., Лобанов А. И. Атлас-определитель фенологических фаз у растений. М. : Наука, 1979. 96 с.
20. Гашева Н. А. Викарирующие виды ивы *Salix* L. Тюменской области // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2010. № 10. С. 82–94.
21. Епанчинцева О. В. Особенности цветения и плодоношения аркто-монтанных ив в коллекции Ботанического сада УрО РАН // Материалы Международ. науч.-практич. конф., посвящ. 115-летию со дня рождения выдающегося советского фенолога В. А. Батманова: Современное состояние фенологии и перспективы развития / Екатеринбург : УГПУ. 2015. С. 14–17.
22. Епанчинцева О. В. Опыт интродукции некоторых видов аркто-монтанных ив Южной Сибири в ботаническом саду УРО РАН // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2018. № 17. С. 473–477.
23. Марченко А. М. Семязачатки и идентификация ив (*Salix*) / М. : Нон-стоп, 2019. 116 с.
24. Пахов А. С. Фенология аллювиальных видов ив в условиях дельты реки Северной Двины // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития : тезисы докладов Всероссийской научной конференции. М. : ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2017. С. 408–409.
25. Макаренко В. П., Мартыненко О. Н. Фенологические наблюдения за древесными растениями заповедника «БАСТАК» // Вестник Дальневосточной государственной социально-гуманитарной академии. 2010. № 2 (6). С. 83–96.

REFERENCES

1. Nedoseko O. I., Viktorov V. P. Life forms of species of the genus *Salix* L. Russia // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2018. Vol. 3 (2). DOI: 10.21685/2500-0578-2018-2-5. URL: <http://rjee.ru/rjee-3-2-2018-5/>.
2. Valyagina-Malyutina E. T. Willows of the European part of Russia // Illustrated manual for forestry workers. Moscow: Partnership of scientific publications KMK, 2004. 217 s.
3. Vasina A. L. Willow – *Salix* L. // Definitel of plants of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug / Novosibirsk, Yekaterinburg : Basco, 2006. S. 95–101.
4. Pospelova E. B., Pospelov I. N. Flora of vascular plants of Taymyr and adjacent territories. Moscow : Partnership of scientific publications KMK, 2007. Ch. 1. 457 s.
5. Moskalenko N. G. To the flora of the vicinity of Norilsk (northwest of the Middle Siberian Plateau) // Botanical Journal. 1970. T. 55, № 2. S. 263–272.
6. Filatova S. N. Family *Salicaceae* in the flora of Norilsk // TeggArctic-2017: Biological resources and rational nature management. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference : Norilsk, April 7–9, 2017. S. 119–120.
7. Yanchenko Z. A., Filatova S. N. Vegetation of the water protection zone of rivers in the vicinity of Norilsk // Biological resources of the Far North: current state and rational use: Collection of scientific papers. SPb. : GUAP, 2014. S. 287–307.
8. Secretareva N. A. Vascular plants of the Russian Arctic and adjacent territories. Moscow : Partnership of scientific publications KMK, 2004. 131 s.
9. Antsiferov G. I. Willow. Moscow : Lesnaya Promyshlennaya Promyshlennost', 1984. 101 s.
10. Filatova S. N., Sergeeva O. K. Tree and shrub species of vascular plants in the urban flora of Norilsk // Culture. Science. Production. 2021. № 7. S. 28–32.

11. Varaksin G. S., Kuznetsova G. V. Features of biological reclamation in the Norilsk industrial region // Siberian Forestry Journal. 2016. № 2. S. 92–101.
12. Karp A. Willows as a source of renewable fuels and diverse products // Forestry Sciences. 2014. № 81. P. 617–641.
13. Zioch M. et al. Modeling of phytoextraction efficiency of microbially stimulated *Salix dasyclados* L. in the soils with different speciation of heavy metals // International Journal of Phytoremediation. 2017. № 19 (12). S. 1150–1164.
14. Varaksin G. S., Antonenko S. N. Phenological features of shrubby willow species in the vicinity of Norilsk // Proceedings of the All-Russian Conference dedicated to the 60th anniversary of the V. N. Sukachev Institute of Forestry SB RAS and the 70th anniversary of the Krasnoyarsk region. Krasnoyarsk : Institute of Forestry SB RAS, 2004. 491 s.
15. Methods of phenological observations in the Botanical Gardens of the USSR // Collection of articles / edited by P. I. Lapin. Moscow : Izd. of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences, 1972. 135 s.
16. Shultz G. E. General phenology. L. : Nauka, 1981. 188 c.
17. General phenology and methods of phenological research: textbook for students of geogr.-biological faculty // Compiled by: O. V. Yantser, E. Y. Terentyeva / Yekaterinburg : Izd-voor UrGPU, 2013. 218 s.
18. Savchenko V. A., Novitsky M. A. Modern Climate of Norilsk. M. : IPF “GART”, 2003. 168 s.
19. Elagin I. N., Lobanov A. I. Atlas-determiner of phenological phases in plants. Moscow : Nauka, 1979. 96 s.
20. Gasheva N. A. Vicarious species of willow *Salix* L. Tyumen region // Bulletin of ecology, forestry and landscape science. 2010. № 10. S. 82–94.
21. Epanchintseva O. V. Peculiarities of flowering and fruiting of arcto-montane willows in the collection of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 115th anniversary of the outstanding Soviet phenologist V. A. Batmanov : Current state of phenology and prospects of development / Ekaterinburg : USPU. 2015. S. 14–17.
22. Epanchintseva O. V. Experience of introduction of some species of arcto-montane willows of South Siberia in the botanical garden of URO RAS // Problems of botany of South Siberia and Mongolia. 2018. № 17. S. 473–477.
23. Marchenko A. M. Seedpods and identification of willows (*Salix*) / M. : Non-stop, 2019. 116 s.
24. Pakhov A. S. Phenology of alluvial species of willows in the conditions of the Northern Dvina River delta // Abstracts of the All-Russian scientific conference “Monitoring of the state and pollution of the environment. Main results and ways of development”. Moscow : FGBU IGCE Roshydromet and RAS, 2017. S. 408–409.
25. Makarenko V. P., Martynenko O. N. Phenological observations of woody plants of the reserve “BASTAK” // Bulletin of the Far Eastern State Socio-Humanitarian Academy. 2010. № 2 (6). S. 83–96.

© Чербаков Н. Н., Вараксин Г. С., 2024

Поступила в редакцию 10.10.2023
Принята к печати 22.01.2024

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674-419.32; 674.049

DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-51-63

Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. XLII, № 1. С. 51–63

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛУЩЕНОГО ШПОНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАНЕРЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ СВОЙСТВАМИ

А. И. Криворотова, А. А. Орлов, В. Д. Эскин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: tkmkai@mail.ru

В статье приведены результаты сравнительного анализа исследований свойств фанерной продукции на основе карбамидоформальдегидных смол с использованием термообработанного березового лущеного шпона. Проведенные полнофакторные эксперименты показали, что высокие показатели водостойкости и прочности у фанеры на основе термообработанного шпона обеспечиваются при температуре обработки 160 °С и продолжительность 240 мин, у комбинированной фанеры с наружными слоями из термообработанного шпона – при температуре в 200 °С и продолжительности нагрева 180 мин. Использование рекомендованных режимов термообработки шпона, не приводящих к снижению прочности фанеры, приводит к уменьшению показателей водопоглощения и разбухания для комбинированной фанеры на величину до 9 и 44 % соответственно. Установлено, что фанера с наружными слоями из термомодифицированного шпона обладает более высокими прочностными характеристиками в сравнении с фанерой на основе термомодифицированного шпона и незначительно уступает ей в водостойкости. Применение термомодифицированного шпона только для наружных слоев фанерной продукции не приводит к существенному снижению прочностных показателей фанеры, однако позволяет значительно снизить ее гигроскопичность и повысить водостойкость, что расширяет область ее применения.

Ключевые слова: фанера, слоистость, комбинирование, пакет, термомодифицированный лущеный шпон, термообработка, температура, продолжительность, режим, прочность, водопоглощение, разбухание.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 51–63

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF CUT-SHELLED VENEER FOR THE PRODUCTION OF PLYWOOD WITH INCREASED CONSUMER PROPERTIES

A. I. Krivorotova, A. A. Orlov, V. D. Eskin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: tkmkai@mail.ru

The article presents the results of a comparative analysis of the properties of plywood products based on urea-formaldehyde resins using heat-treated birch shelled veneer. The conducted full-factor experiments have shown that high water resistance and strength indicators of plywood based on heat-treated veneer are provided at a processing temperature of 160 °C and a duration of 240 minutes, for combined plywood with outer layers of heat-treated veneer – at a temperature of 200 °C and a heating duration of 180 minutes. The use of recommended veneer heat treatment modes that do not lead to a decrease in the strength of plywood leads to a decrease in water absorption and swelling rates for combined plywood by up to 9 and 44 %, respectively. It has been established that plywood with outer layers of thermomodified veneer has higher strength characteristics in comparison with plywood based on thermomodified veneer and is slightly inferior to it in water resistance. The use of thermomodified veneer only for the outer layers of plywood products does not lead to a significant decrease in the strength indicators of plywood, however, it can significantly reduce its hygroscopicity and increase water resistance, which expands the scope of its application.

Keywords: plywood, layering, combination, package, thermomodified peeled veneer, heat treatment, temperature, duration, mode, strength, water absorption, swelling.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное понимание процесса термической обработки древесины известно с начала 1950-х годов [1; 2], но несмотря на это, ее применение началось совсем недавно. Этому способствовало постепенное нарастающее увеличение экологической нагрузки на окружающую среду, в результате крупнотоннажного использования биоцидов для обработки и консервации древесины с целью её защиты от дереворазрушающих грибов и насекомых. Образование в древесине грибов неизбежно приводит к появлению гнили. Пораженная гнилью древесина легче впитывает влагу, непредсказуемо изменяет линейные размеры при усушке и разбухании. Термическая модификация является альтернативным способом экологически безопасной защиты древесины от грибов, насекомых и других факторов, разрушающих древесину.

Термическая модификация – это физический процесс, который химически изменяет структуру полимеров клеточной стенки древесины посредством различных химических реакций, придавая материалу новые свойства (гигроскопичность, стабильность размеров, стойкость к разрушающим грибам, уменьшение коробления), при этом его прочность уменьшается в разной степени, в зависимости от режима обработки. Благодаря повышению стойкости к гниющим грибкам, термически обработанная древесина рассматривается как небактерицидная альтернатива классическим консервантам для древесины. Помимо этого, термически модифицированная древесина, в зависимости от режимных параметров обработки (продолжительности и температуры), изменяет свой цвет – от светлого до темно-коричневого, однородного по всей толщине материала. Данный эффект открывает широкие возможности использования термодревесины. При помощи термической обработки при использовании малоценных пород, например, березы, осины, сосны, возможно имитировать ценные породы древесины, такие как дуб, карагач, венге [3; 4].

Технологии термической модификации подразумевают термическую обработку древесины при температуре от 160 °С до 280 °С в среде водяного пара или защитного газа. Известно, что свойства и цвет термодревесины в определенной мере можно менять в зависимости от температуры и продолжительности обработки, давления и вида агента обработки, а также от породы и начальной влажности древесины. Но при этом необходимо учитывать, что при улучшении одних характеристик может произойти ухудшение других. Так, в частности, значительное повышение температуры улучшает биостойкость материала, но приводит к росту хрупкости и уменьшению прочности древесины [5].

При увеличении температуры и продолжительности обработки повышается формостабильность материала, но одновременно снижаются прочностные показатели древесины, что ограничивает применение такого материала как конструкционного. С другой стороны, длительная термическая обработка при очень низких температурах не позволяет полноценно модифицировать древесину, а многоступенчатое изменение по сравнению с одноступенчатым может

иметь существенно меньший эффект на формирование заданных свойств материала.

В России термическую модификацию древесины проводят в основном по технологиям зарубежных фирм. В качестве обрабатывающей среды используют водяной пар, как один из самых доступных и эффективных агентов обработки древесины. Другие агенты и среды, как инертный газ, вакуум, перенасыщенный пар не выдерживают конкуренции.

Автором работы [6] предложен способ сокращения энергетических затрат на процесс термомодифицирования древесины. Способ подразумевает постепенный нагрев древесного материала до температуры 200–240 °С и выдержку при заданной температуре в течение 5–7 часов. Нагрев и выдержка при заданной температуре осуществляются в атмосфере топочных газов, которые образуются в результате газификации отходов деревообрабатывающих предприятий и последующего сжигания синтез-газа. Топочные газы охлаждаются в теплообменнике до температуры 200–240 °С. Излишняя тепловая энергия, отведенная при охлаждении топочных газов, направляется для предварительной сушки древесины.

Одним из недостатков термомодифицированной древесины является наличие у готовых материалов явно выраженного запаха жженой древесины. При использовании такого материала на открытом воздухе, данное свойство не имеет сильного значения, однако, при использовании в закрытых помещениях, при отделке жилых комнат и т. д., выделяемый запах становится существенным недостатком.

Известен способ [7] позволяющий получать термомодифицированные материалы, не имеющие запаха жженой древесины. Данная проблема решается тем, что при термической обработке древесных материалов в автоклаве, их нагрева и охлаждения, после загрузки осуществляется вакуумирование до давления 0,2 атм с последующей подачей водяного пара до давления в автоклаве 0,7–0,8 атм. Нагрев древесных материалов ведут водяным паром при температуре 180–220 °С с дальнейшей выдержкой в течение 2–5 часов. Охлаждение осуществляют не менее трех раз путем вакуумирования в течение 15–20 мин с последующей подачей насыщенного водяного пара до значения давления в автоклаве, близкого к атмосферному, и выдержкой при этом давлении в течение 5–10 мин.

Термомодификация древесины на данном этапе развития лесопромышленного комплекса является актуальным и современным способом повышения эксплуатационных характеристик древесных материалов. Основное применение термически модифицированных материалов – строительство и отделка. На основе модифицированной древесины изготавливают полы, облицовку стен и потолков, сайдинг для наружной отделки помещений, оконные рамы. Кроме этого термомодифицированная древесина часто используется при изготовлении садовой мебели и террасной доски.

Изделия на основе полуфабрикатов, изготовленных из древесного сырья, таких как, лущеный и строганый шпон, древесная стружка и шерсть, также широко используются во всех областях деятельности

человека. Фанера на основе шпона из лиственных и хвойных пород древесины является одним из самых востребованных материалов для строительной и мебельной отрасли. Общепризнанным недостатком фанерной продукции является ее водостойкость, которая определяется как породой древесного сырья используемого для изготовления лущеного шпона, так и типом применяемого клеевого состава. Вопрос повышения водостойкости фанеры предлагается решать в том числе и способом термообработки шпона [8; 9]. В работе [10] рассмотрен способ контактного термомодифицирования листов березового шпона в разреженной среде при температуре от 413 до 533 К. Установлено, что давление набухания модифицированных образцов шпона уменьшается, при этом основное влияние на изменение качественных характеристик шпона оказывают температура и продолжительность обработки. Полученная фанера по влагопоглощению соответствует фанере марки ФСФ.

Автором работы [11] предлагается использовать для повышения водоотталкивающих свойств фанеры маслотермообработку. Для пропитки образцов фанеры толщиной 15 мм используется модифицированное талловое масло лиственных пород, далее производится термическая обработка. Температура термообработки 160 °С, продолжительность 2, 4, 6 и 8 ч. В результате, установленный оптимальный режим обработки фанеры позволяет уменьшить ее разбухание в 2 раза, водопоглощение – в 1,2 раза, обеспечив при этом требуемую стандартом прочность. Также установлено, что наибольшее влияние на изменение показателей водопоглощения и разбухания оказывают продолжительность маслопропитки и термообработки фанеры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ

На кафедре технологии деревообработки СибГУ им. М. Ф. Решетнева смонтирована и испытана экспериментальная установка для термической модификации древесины на базе сушильного шкафа марки KBCG100/250.

В ходе ранее проводимых экспериментов контроль температуры внутри сушильного шкафа определялся при помощи 2-х термометров сопротивления. По принятому решению 1-й термометр располагался на поверхности образца в его центре, а 2-й термометр у задней стенки сушильного шкафа. Также к сушильному шкафу была подведена увлажняющая труба, чтобы обеспечить парообразование внутри сушильного шкафа.

Опыты показали, что наибольшая температура агента обработки достигается у внутренних стенок шкафа. По результатам полученных данных была разработана и сконструирована тепло-ограждающая конструкция с применением термопласта и строительных уголков, предназначенная обеспечить равномерное и устойчивое расположение образцов и их защиту от теплового излучения с поверхности стенок шкафа. В конструкции были предусмотрены поддерживающие полочки под образцы. Задняя стенка данной конструкции была сделана таким образом, чтобы защищать образцы от теплового излучения, но в тоже вре-

мя свободно пропускать агент обработки, циркулирующий в сушильном пространстве шкафа.

Также ввиду неравномерного распределения температурного поля внутри сушильного пространства шкафа было принято решение о разработке, изготовлении и монтаже осевого вентилятора. Вентилятор был сконструирован и изготовлен таким образом, чтобы обеспечить равномерную циркуляцию агента термообработки. Вентилятор приводился в движение электродвигателем марки АНАТ56В4У4 № 113 ГОСТ 16264–70, который соединялся с осью вентилятора посредством специально изготовленной резиновой муфты.

В 2022 году была проведена модернизация данной установки для достижения следующих целей:

- автоматическое поддержание температуры паровоздушной среды с отклонением ± 5 °С от заданных значений;
- измерение температуры внутри образцов;
- автоматическая подача водяного пара и распыляемой воды;
- автоматическое управление режимом («работа», «пауза») работы вентилятора.

В корпус шкафа смонтировали терморегуляторы ТРМ101 – 2 шт. производства ОБЕН (Москва), реле времени DH48S-S – 2 шт. производства фирмы ZYCN (КНР) и симисторный блок с охлаждением от осевого вентилятора для системы нагрева шкафа. В систему увлажнения и подачи пара поставили соленоидный клапан фирмы Tork.

Модернизация установки позволила практически исключить влияния человеческого фактора на поддержание режима термообработки древесины. Установленные в опыте параметры паровоздушной среды поддерживались путем импульсного нагрева ТЭН шкафа, периодическим включением осевого вентилятора и импульсным увлажнением. Точность поддержания режима термообработки составила ± 5 °С. Однако следует отметить, что в ходе опытов необходимо было периодически изменять (подстраивать) режим работы («продолжительность работы», «продолжительность паузы») осевого вентилятора. В ходе опытов значения температуры в шкафу и температуры образцов заносятся в протокол каждые 10–15 мин.

В ранее опубликованной работе авторов были представлены результаты эксперимента по термической модификации лущеного березового шпона с последующим склеиванием карбамидоформальдегидными клеями [12]. Реализация в работе ПФЭ позволила установить, что качественные изменения характеристик лущеного шпона наблюдались в диапазоне температур от 160 до 200 °С. При температуре менее 160 °С не происходило изменения внешнего вида и плотности шпона, при температуре более 200 °С – потеря плотности шпона становилась значительной. Также установлено, что термообработка шпона, не приводящая к снижению прочности фанеры, позволила снизить показатели водопоглощения и разбухания на величину от 20,4 до 33,5 %. Тем не менее, режимные параметры процесса термообработки шпона в исследуемом диапазоне оказывали существенное влияние на прочностные свойства фанерной продукции. Снизить влия-

ние термообработки на прочностные свойства фанеры было предложено за счет комбинирования в фанерном пакете слоев термообработанного и нетермообработанного лущеного шпона.

В ходе эксперимента процесс термообработки проводился в соответствии с планом Бокса. Принятые обозначения, факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 1. В качестве выходных параметров были определены прочность при статическом изгибе, прочность при скалывании, показатели разбухания и водопоглощения. Прессование образцов фанеры осуществлялось по стандартной методике и традиционному режиму прессования фанеры общего назначения марки ФК [13]. Необходимая точность обеспечивалась 5-и кратным дублированием измерений. Для контроля физико-механических свойств образцов использовалась испытательная машина УТС 110 МН-30. Плотность изготовленных образцов фанеры составила от 650 до 680 кг/м³.

Для качественного описания результатов проведенного эксперимента далее в работе условимся о

следующих обозначениях изготовленных образцов клееной фанеры: пятислойную березовую фанеру, изготовленную полностью на основе термомодифицированного шпона и карбамидоформальдегидной смолы, обозначим как «термомодифицированная фанера» или «фанера на основе термомодифицированного шпона»; пятислойную березовую фанеру с наружными слоями из термомодифицированного шпона и внутренними (тремя) слоями из стандартного лущеного шпона обозначим как «фанера комбинированная» или «фанера с наружными слоями из термомодифицированного шпона».

Оценку влияния исследуемых факторов (режима термообработки) на прочностные характеристики фанерной продукции проводили по графической интерпретации уравнения регрессии и графикам эффектов факторов и эффектов их взаимодействий, приведенных на рис. 1–6, 9–14.

В табл. 2 приведены результаты испытания прочности при статическом изгибе фанеры на основе термомодифицированного шпона.

Таблица 1

Факторы и уровни варьирования режима термомодифицирования лущеного березового шпона

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования		
		верхний	основной	нижний
		+1	0	–1
Продолжительность термообработки, мин	τ/X_1	240	180	120
Температура агента термообработки, °C	T/X_2	200	180	160

Таблица 2

Результаты испытаний прочности при статическом изгибе фанеры на основе термомодифицированного шпона

X_0	X_1	X_2	Предел прочности на статический изгиб, МПа
1	1	1	29,17
1	–1	1	40,98
1	1	–1	41,50
1	–1	–1	37,06
1	0	1	36,87
1	0	–1	46,05
1	1	0	32,17
1	–1	0	40,73
1	0	0	39,18

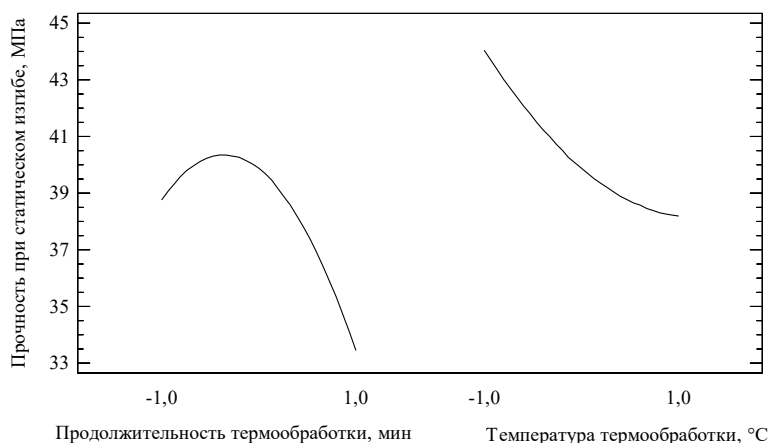


Рис. 1. График эффектов факторов

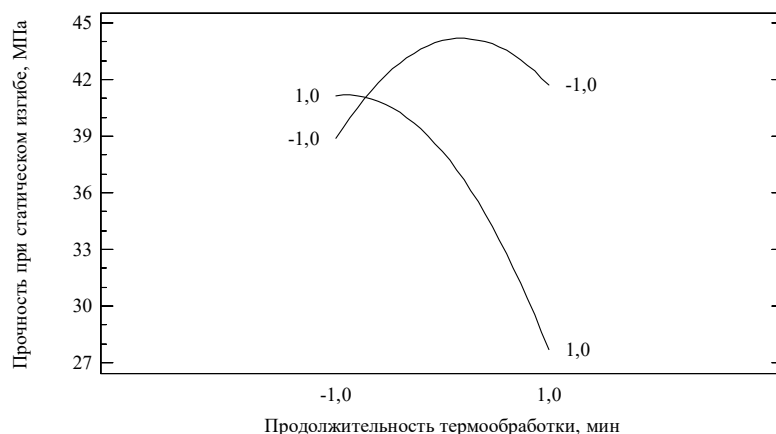


Рис. 2. График эффектов взаимодействия факторов

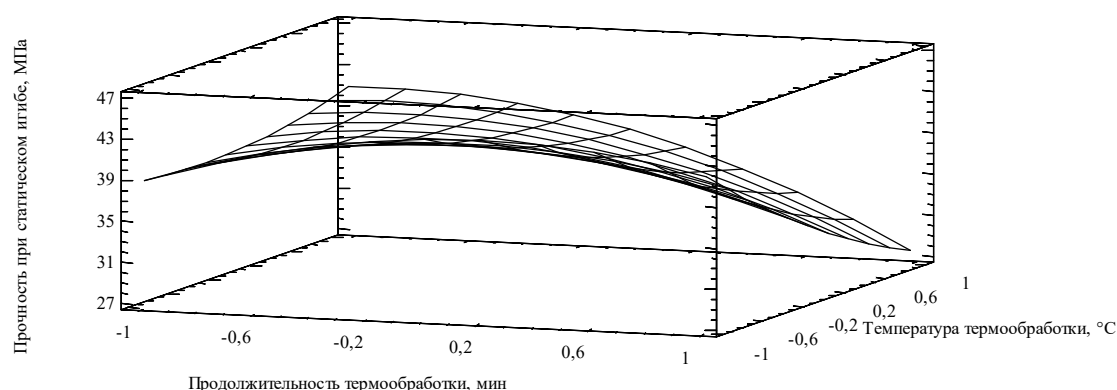


Рис. 3. Поверхность отклика

Приведенные на рис. 1–3 графические зависимости показывают наличие прямо пропорциональных зависимостей между продолжительностью и температурой термообработки и прочностью фанеры при статическом изгибе. С увеличением продолжительности и температуры термообработки наблюдается снижение прочности образцов фанеры. При этом характер изменения прочностных показателей отличается: при определенных условиях (при температуре среднего диапазона равной 180 °C и повышении продолжительности нагрева до 140 мин) прочность термомодифицированной фанеры незначительно увеличивается с последующим снижением, в то время как при увеличении температуры термообработки стабильно уменьшается. При этом увеличение продолжительности при максимальной температуре термообработки (200 °C) приводит к более значительной потере прочности, чем при обработке при минимальной температуре. При увеличении температуры термообработки от 160 до 200 °C прочность фанеры снижается на величину порядка 10–12 МПа (с 43 до 29 МПа). В то же время при увеличении продолжительности термообработки прочность фанеры уменьшается примерно на аналогичную величину, но диапазон значений прочности находится в интервале от 38 до 29 МПа. При этом при температуре термообработки 180 °C и продолжительности 180 мин наблюдается рост прочности фанеры при статическом изгибе. Вероятно, это связано с достижением оптимальных условий термообработки для шпона при данных параметрах. С одной

стороны, под действием термообработки поверхность шпона выравнивается, поры, трещины на поверхности шпона «запечатываются» продуктами термического распада древесины, что обеспечивает оптимальный адгезионный контакт клея с поверхностью шпона и, как следствие, высокую прочность. С другой стороны, в древесине шпона еще не происходит значительной потери массы и, как результат, имеющаяся плотность шпона обеспечивает высокую когезионную прочность в массе термообработанного лущеного шпона. На графическом отображении эффектов взаимодействия факторов наблюдается аналогичная зависимость. При максимальной температуре термообработки и увеличении продолжительности термообработки прочность термомодифицированной фанеры уменьшается, при минимальной температуре с увеличением продолжительности термообработки прочность до определенного временного показателя возрастает, затем снижается.

При оптимизации полученной зависимости с помощью программы «Statgraphics» установлено, что оптимальными параметрами, обеспечивающими максимальную прочность фанеры при статическом изгибе на термомодифицированном шпоне, является температура в 160 °C и продолжительность 240 мин.

В табл. 3 и на рис. 4–6 представлены зависимости прочности при скалывании по клеевому слою от параметров термомодификации шпона.

Таблица 3

Результаты испытаний прочности при скалывании по клеевому слою фанеры на основе термомодифицированного шпона

X_0	X_1	X_2	Предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа
1	1	1	0,99
1	-1	1	2,05
1	1	-1	1,75
1	-1	-1	1,71
1	0	1	2,12
1	0	-1	1,93
1	1	0	1,97
1	-1	0	2,49
1	0	0	1,86

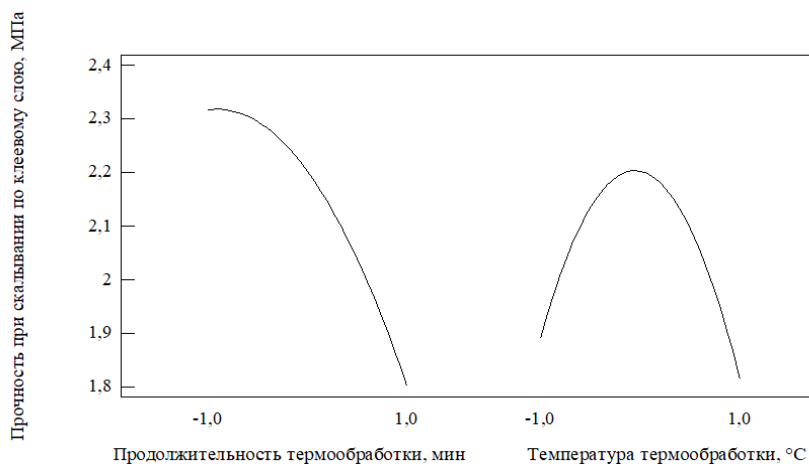


Рис. 4. График эффектов факторов

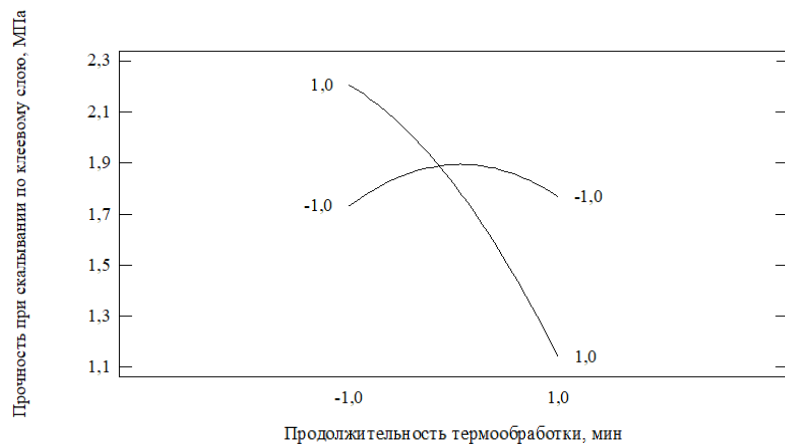


Рис. 5. График эффектов взаимодействия факторов

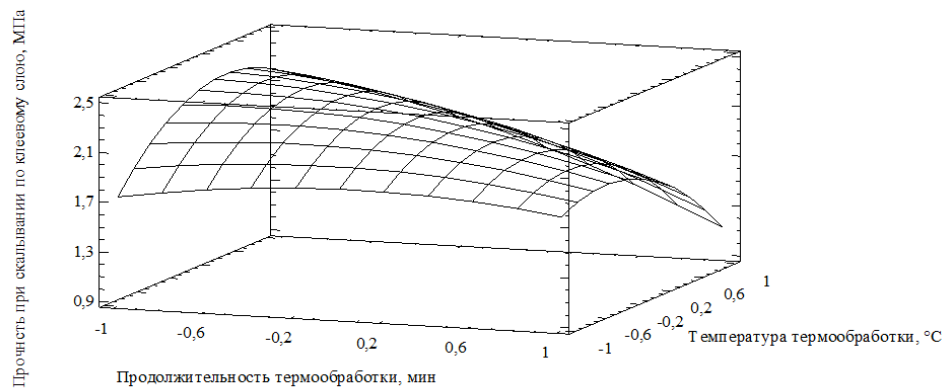


Рис. 6. Поверхность отклика

Анализ данных при испытании термомодифицированной фанеры на показатель прочности при скалывании по клеевому слою показывает аналогичное, рассмотренному выше, снижение прочности при увеличении продолжительности термообработки. В случае с изменением температуры термообработки наблюдается другая зависимость. Увеличение температуры термообработки до 180 °С приводит к повышению прочности фанеры при скалывании по клеевому слою. Это также связано с некоторой потерей плотности шпона в процессе термообработки, что первоначально способствует более глубокому проникновению клеевого состава в шпон и образованию единой монолитной структуры шпона и клея, что, как следствие, ведет к повышению прочности при скалывании. Дальнейшее увеличение температуры термообработки снижает прочность фанеры при скалывании за счет более значительной потери древесины шпона своей массы. Кроме этого на поверхности шпона формируется слой, препятствующего смачиванию поверхности клеем, приводящий к снижению адгезионного контакта между клеем и древесиной.

Данные предположения подтверждаются внешним видом поверхностей разрушения образцов фанеры при скалывании. Разрушение образцов из шпона, обработанного при температуре до 180 °С имеет смешанный характер, последующие образцы имеют когезионный характер разрушения по клеевому слою или по древесине. Также следует отметить, что увеличение продолжительности термообработки при минимальной температуре практически не изменяет прочностные показатели образцов фанеры, а при максимальной температуре увеличение продолжительности термообработки приводит к значительному снижению прочности.

В результате математической обработки экспериментальных данных, были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимости предела прочности фанеры от режима термообработки:

– при статическом изгибе

$$\sigma_{\text{изг}} = 39,870 - 2,655 \cdot \tau - 2,931 \cdot T - 3,765 \cdot \tau^2 - 4,062 \cdot \tau \cdot T + 1,245 \cdot T^2;$$

– при скалывании по клеевому слою

$$\sigma_{\text{ск}} = 2,202 - 0,256 \cdot \tau - 0,038 \cdot T - 0,143 \cdot \tau^2 - 0,275 \cdot \tau \cdot T - 0,348 \cdot T^2.$$

Результаты испытаний фанеры на основе термомодифицированного шпона на показатели водопоглощения и разбухания представлены в виде гистограмм на рис. 7 и 8. Сравнение результатов производилось с фанерой, изготовленной на основе исходного лущеного березового шпона, которая имеет максимальные значения показателей водопоглощения и разбухания. При анализе показателей термомодифицированной фанеры необходимо отметить, что и водопоглощение, и разбухание зависят и от температуры, и от продолжительности термообработки шпона. Минимальные показатели водопоглощения и разбухания наблюдаются у фанеры на основе шпона термомодифицированного при температуре 180 °С в течение

180 мин. При параметрах термообработки 160 °С и 180 мин, 200 °С и 120 мин, 200 °С и 180 мин наблюдаются примерно одинаковые показатели водопоглощения, и в диапазоне от 52,92 до 55,60 % для водопоглощения, и в диапазоне от 8,1 до 9,86 % для разбухания. Также низкий показатель разбухания наблюдается для параметров 180 °С и 180 мин. Подобный вид зависимостей для показателей водопоглощения и разбухания может объясняться тем, что при увеличении параметров термообработки до определенных пределов наблюдается совместное действие процессов сужения пор в результате термической усушки и их закупоривания продуктами разложения древесины, однако при дальнейшем повышении параметров термообработки может наблюдаться «прокалка» пор шпона от продуктов разложения, приводящая к некоторому увеличению показателей водопоглощения и разбухания.

Таким образом, показатель водопоглощения образцов изготовленных из термомодифицированного шпона по сравнению с образцами фанеры на основе исходного шпона снижается на величину от 5,6 до 24,0 %. Разбухание снижается на величину от 16,2 до 71,4 %.

В табл. 4 приведены результаты испытания прочности при статическом изгибе комбинированной фанеры с наружными слоями из термомодифицированного шпона. Пакет комбинированной фанеры собирался по стандартной методике, при этом для наружных слоев использовались листы лущеного шпона, прошедшего термообработку в одной партии в соответствии с параметрами, указанными в табл. 1. Прессование и дальнейшая подготовка образцов комбинированной фанеры проводилась при условиях аналогичных изготовлению образцов термомодифицированной фанеры

Приведенные на рис. 9–11 графические зависимости показывают аналогичный характеру изменения прочности термомодифицированной фанеры характер изменения прочности при статическом изгибе для образцов фанеры с наружными слоями из термомодифицированного шпона. Так же, как и в случае испытания образцов фанеры на основе термомодифицированного шпона с увеличением продолжительности и температуры термообработки прочность комбинированной фанеры снижается. Однако следует отметить более высокие значения показателей прочности при статическом изгибе у фанеры с наружными слоями из термомодифицированного шпона в сравнении с фанерой, полностью изготовленной из такого шпона. Например, при максимальных значениях параметров термообработки шпона – продолжительности термообработки 240 мин и температуре 200 °С – прочность образцов термомодифицированной фанеры составила 29,17 МПа, а прочность образцов комбинированной фанеры 36,18 МПа. Это позволяет констатировать, что при использовании термомодифицированного шпона в качестве наружных слоев потеря прочности у фанерных образцов становится значительно меньше.

В табл. 5 и на рис. 12–14 представлены зависимости прочности при скалывании по клеевому слою от параметров термомодификации шпона.

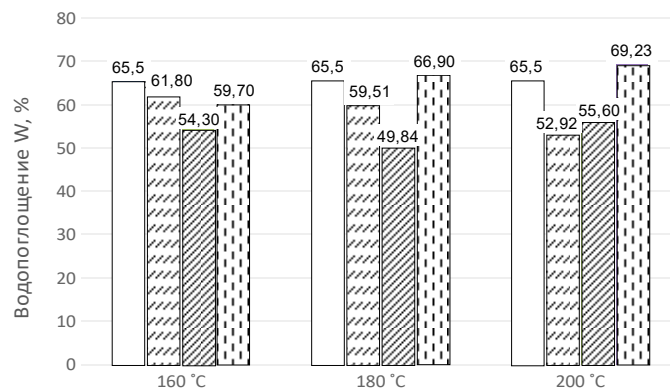


Рис. 7. Результаты испытания образцов фанеры на основе термомодифицированного шпона на водопоглощение:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

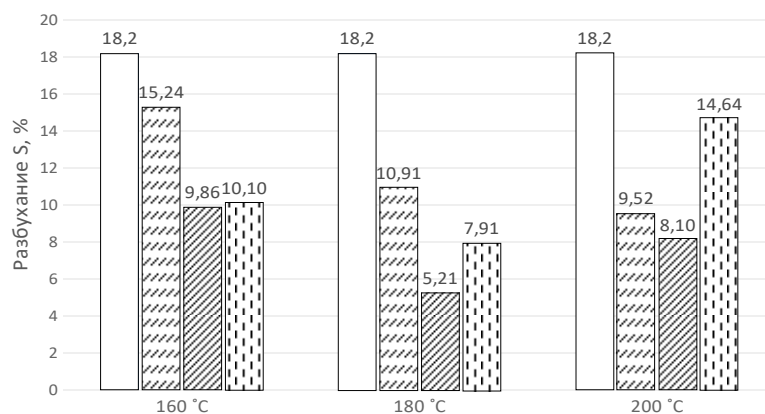


Рис. 8. Результаты испытания образцов фанеры на основе термомодифицированного шпона на разбухание:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

Таблица 4

Результаты испытаний прочности при статическом изгибе комбинированной фанеры

X_0	X_1	X_2	Предел прочности при статическом изгибе, МПа
1	1	1	36,18
1	-1	1	48,92
1	1	-1	47,40
1	-1	-1	43,17
1	0	1	42,98
1	0	-1	53,05
1	1	0	38,26
1	-1	0	46,08
1	0	0	45,31

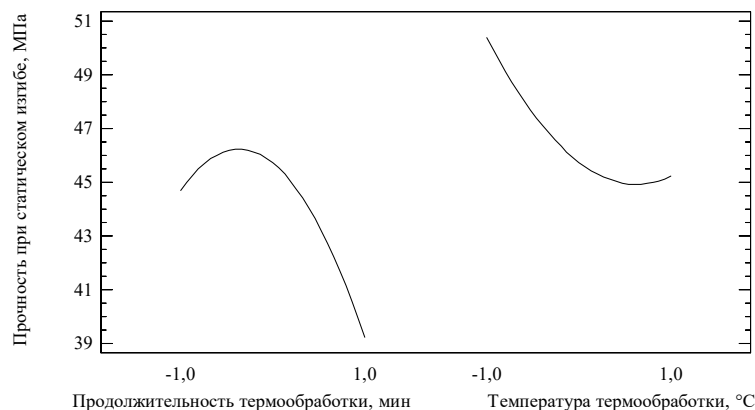


Рис. 9. График эффектов факторов

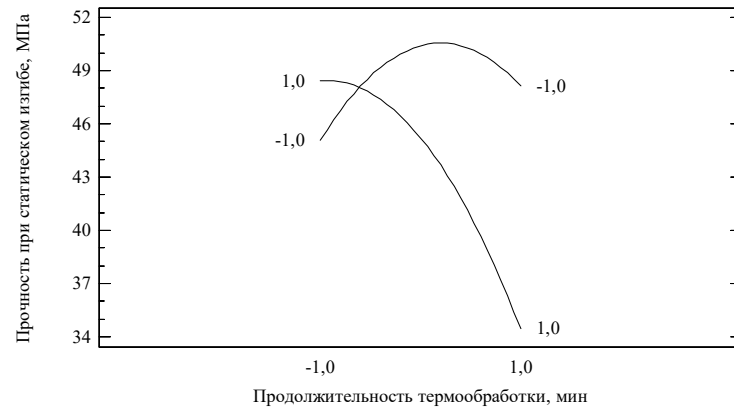


Рис. 10. График эффектов взаимодействия факторов

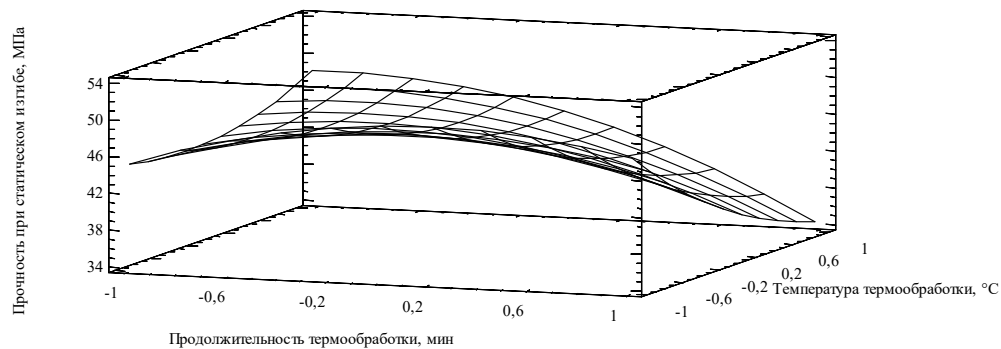


Рис. 11. Поверхность отклика

Таблица 5

Результаты испытаний прочности при скалывании по клеевому слою комбинированной фанеры

X_0	X_1	X_2	Предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа
1	1	1	1,74
1	-1	1	2,7
1	1	-1	1,44
1	-1	-1	2,49
1	0	1	2,84
1	0	-1	3,68
1	1	0	2,7
1	-1	0	3,24
1	0	0	2,6

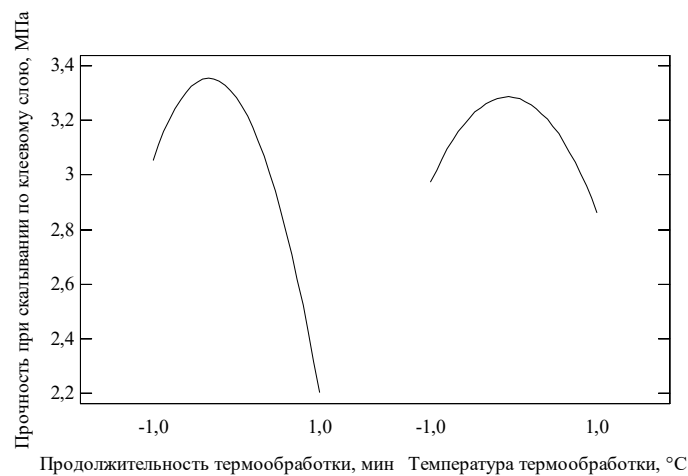


Рис. 12. График эффектов факторов

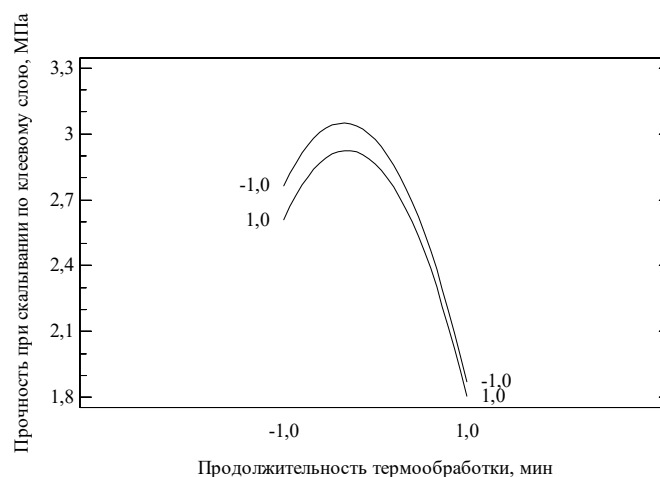


Рис. 13. График эффектов взаимодействия факторов

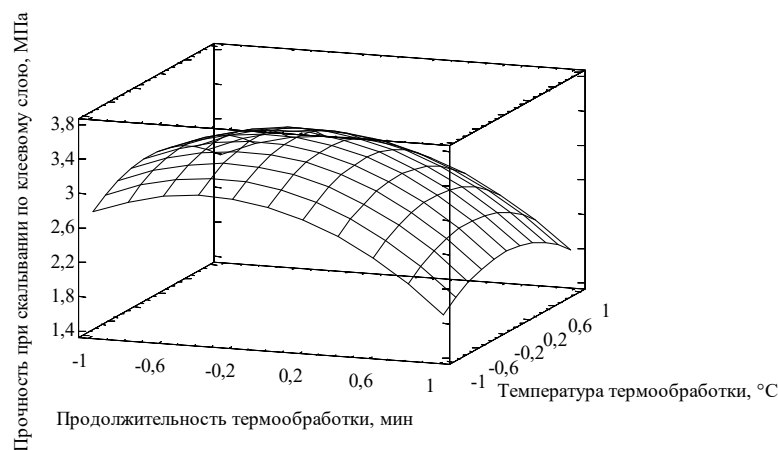


Рис. 14. Поверхность отклика

Испытание на скалывание комбинированной фанеры проводилось по клеевому слою между термомодифицированным и исходным шпоном. График эффектов факторов показывает практически идентичные зависимости прочности от параметров термообработки шпона с некоторым откликом в диапазоне числовых значений. Из графика эффектов взаимодействий факторов видно, что с увеличением продолжительности термообработки прочность при скалывании по клеевому слою вне зависимости от уровня варьирования температуры первоначально незначительно возрастает, затем уменьшается по аналогичной закономерности с максимальной разницей в 0,1 МПа. При этом зависимости прочности при скалывании во всех случаях имеют экстремальный характер, что, также как и в случае с термомодифицированной фанерой можно объяснить первоначально более глубоким проникновением клеевого состава в шпон и образованием единой монолитной структуры шпона и клея с последующим снижением плотности шпона в массе слоя. Следует также отметить, что в данной партии испытаний практически все образцы продемонстрировали смешанный характер разрушения.

При оптимизации полученной зависимости с помощью программы «Statgraphics» установлено, что оптимальными параметрами, обеспечивающими максимальную прочность фанеры на модифицированном шпоне, является температура в 200 °C и продолжительность 180 мин.

Для проведенных испытаний также были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимости прочности от режима термообработки:

– при статическом изгибе

$$\sigma_{\text{изг}} = 45,735 - 2,721 \cdot \tau - 2,591 \cdot T - 3,778 \cdot \tau^2 - 4,242 \cdot \tau \cdot T + 2,066 \cdot T^2;$$

– при скалывании по клеевому слою

$$\sigma_{\text{ск}} = 3,283 - 0,425 \cdot \tau - 0,055 \cdot T - 0,655 \cdot \tau^2 - 0,023 \cdot \tau \cdot T - 0,365 \cdot T^2.$$

Результаты испытаний образцов комбинированной фанеры на показатели водопоглощения и разбухания представлены на рис. 15 и 16. При проведении анализа представленных гистограмм, первоначально необходимо отметить менее интенсивный характер сни-

жения значений показателей водопоглощения и разбухания фанеры после выдержки в воде в течение 24 ч. Минимальными значениями водопоглощения и разбухания обладают образцы с наружными слоями из шпона, обработанного при температуре 200 °С в течение 180 и 240 мин. Близкие значения имеют образцы с наружными слоями шпона, обработанного при температуре 160 и 180 °С в течении 240 мин. Для всех образцов с увеличением температуры и продолжительности выдержки наблюдается уменьшение показателей водопоглощения и разбухания. Водопоглощение в зависимости от режима термообработки снижается на величину от 0,6 до 11,6 %, разбухание на величину от 5,4 до 60,3 %. При этом максимальное повышение водостойкости наблюдается у образцов фанеры с наружными слоями из шпона, обработанного при температуре 200 °С. Характер изменения данных показателей несколько отличается от данных, представленных для термомодифицированной фанеры.

ры. Вероятно, это связано с преобладанием в массе материала стандартного лущеного шпона. Наружный слой термомодифицированного шпона выступает в качестве преграды для проникновения влаги во внутрь материала, который в свою очередь имеет по сравнению с термомодифицированным шпоном более плотную структуру и закрытые поры, по сравнению с «прокаленными» порами шпона в полностью термомодифицированной фанере. Поэтому повышение температуры и продолжительности термообработки шпона в случае с его использованием только для наружных слоев фанеры приводит к постоянному снижению водостойкости и разбухания фанеры в отличие от фанеры, изготовленной на полностью термомодифицированном шпоне. Тем не менее, минимальное водопоглощение отмечаемое для комбинированной фанеры около 57,9 %, а для термомодифицированной фанеры – 49,84 %, минимальное разбухание 7,21 % и 5,21 % соответственно.

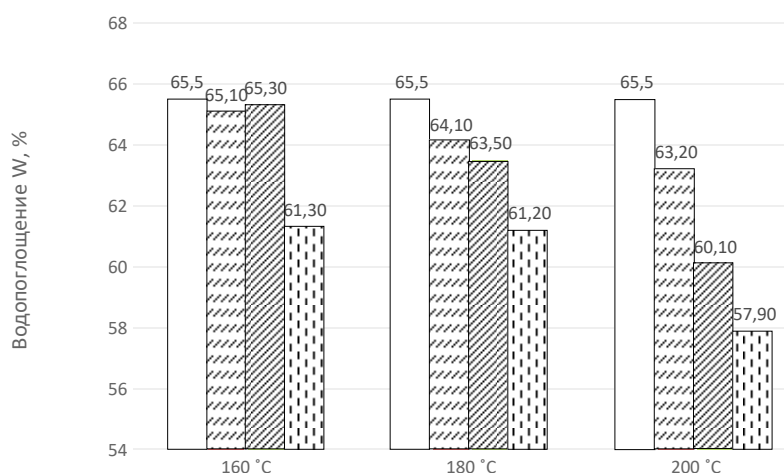


Рис. 15. Результаты испытания образцов комбинированной фанеры с наружными термомодифицированными слоями на водопоглощение:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

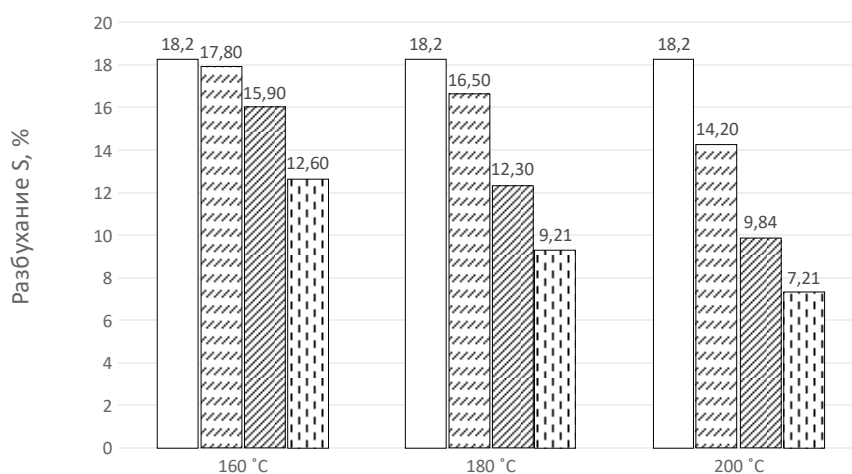


Рис. 16. Результаты испытания образцов комбинированной фанеры с наружными термомодифицированными слоями на разбухание:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение термомодифицированного лущеного шпона для изготовления фанеры, обладающей повышенными показателями водо- и атмосферостойкости, обосновано является одним из способов улучшения ее качественных эксплуатационных показателей.

Реализованный в работе сравнительный анализ проведенных ПФЭ позволил установить, что для получения высоких эксплуатационных характеристик термообработанной фанеры оптимальным режимом термообработки лущеного березового шпона является температура 160 °С и продолжительность 240 мин, для изготовления комбинированной фанеры наружные слои шпона оптимально обрабатывать при температуре в 200 °С в течение 180 мин.

Установлено, что прочность образцов фанеры при статическом изгибе и при скалывании зависит от режима термомодификации шпона и при использовании рекомендованных режимов возрастает.

Термомодифицирование шпона приводит к снижению гигроскопичности, изменению цвета, незначительному изменению плотности и массы образцов фанеры.

Водопоглощение и разбухание более выражено снижается при применении более высоких температур и увеличении продолжительности нагрева. Использование рекомендованных режимов термообработки шпона, не приводящих к снижению прочности фанеры, приводит к уменьшению показателей водопоглощения и разбухания для комбинированной фанеры на величину до 9 и 44 % соответственно.

Использование термомодифицированного шпона только для наружных слоев фанерной продукции не приводит к существенному снижению прочностных показателей фанеры, однако позволяет значительно снизить ее гигроскопичность и повысить водостойкость.

Фанера с наружными слоями из термомодифицированного шпона обладает более высокими прочностными характеристиками в сравнении с фанерой на основе термомодифицированного шпона и незначительно уступает ей в водостойкости. При сравнении стоимости данных видов фанеры, фанера, комбинированная с наружными слоями из термомодифицированного шпона, имеет значительное преимущество перед полностью термомодифицированной фанерой.

Применение для наружных слоев фанеры термомодифицированного шпона позволяет значительно расширить область её применения за счет повышения водостойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Р. Bekhta, P. Niemz, *Holzforsch*, 57, 5, 539–546 (2003).
2. Guide to heat treatment of wood (2003) [Электронный ресурс]. URL: www.thermowood.fi (дата обращения: 23.03.2023).
3. Свойства и характеристики термоберезы [Электронный ресурс]. URL: <https://woodneva.ru/info/svoystva-i-harakteristiki-termoberezy> (дата обращения: 05.06.2023).

4. Термически модифицированная древесина. Ирина Железняк, Собкор интернет-издания «AtmWood. Дерево-промышленный вестник» [Электронный ресурс]. URL: <https://atmwood.com.ua/2018/10/20/termicheski-modifitsirovannaya-drevesina-xarakteristiki-i-primenenie/?ysclid=lo1hk8l0xe734054300> (дата обращения: 10.08.2023).

5. Шайхутдинова А. Р., Сафин Р. Р. Термодревесина: дизайн и технология // Труды Академии технической эстетики и дизайна. 2016. № 1. С. 5–9.

6. Патент № 2422266 РФ, МПК В 27 К 5/00. Способ термообработки древесины / Сафин Р. Р., Сафин Р. Г., Разумов Е. Ю., Тимербаев Н. Ф., Кайнов П. А. и др.; патентообладатель ООО «НТЦ РПО»; опубл. 27.06.2011.

7. Патент № 2453425 РФ, МПК В 27 К 3/02. Способ термической обработки древесины / Сафин Р. Р., Хасаншин Р. Р., Кайнов П. А. и др.; патентообладатель ГОУ ВПО КГТУ; опубл. 20.06.2012.

8. Хасаншин Р. Р., Зиятдинов Р. Р. Повышение эксплуатационных характеристик клееных материалов, созданных на основе термообработанного шпона // Вестник Казанского технологического университета. Казань. 2013. № 13. С. 87–90.

9. Разработка технологии создания влагостойкой фанеры / Р. Р. Сафин, Р. Р. Хасаншин, Р. Р. Зиятдинов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 20. С. 64–65.

10. Зиятдинов Р. Р. Технология производства влагостойкой фанеры из термомодифицированного шпона : автореф. дис. ... канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2013. 18 с.

11. Матюшенкова Е. И. Совершенствование эксплуатационных свойств фанеры для строительства путем маслотермообработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 16 с.

12. Исследование свойств клеёных материалов на основе термически модифицированного шпона / Криворотова А. И., Орлов А. А. Текст: непосредственный // Хвойные бореальной зоны. 2018. № 6. С. 548–554.

13. Справочник фанерщика. Сост. коллективом сотрудников ЦНИИФ / под ред. канд. техн. наук И. А. Шейдина, изд. 3-е испр. и доп., изд-во «Лесная промышленность», 1968. 832 с.

REFERENCES

1. Bekhta P., Niemz P., *Holzforsch*, 57, 5, 539–546 (2003).
2. Guide to heat treatment of wood (2003) [Elektronnyy resurs]. URL: www.thermowood.fi (data obrashcheniya: 23.03.2023).
3. Svoystva i kharakteristiki termoberezy [Elektronnyy resurs]. URL: <https://woodneva.ru/info/svoystva-i-harakteristiki-termoberezy> (data obrashcheniya: 05.06.2023).
4. Termicheski modifitsirovannaya drevesina. Irina Zheleznyak, Sobkor internet-izdaniya “AtmWood. Derevo-promyshlennyy vestnik” [Elektronnyy resurs]. URL: <https://atmwood.com.ua/2018/10/20/termicheski-modifitsirovannaya-drevesina-xarakteristiki-i-primenenie/?ysclid=lo1hk8l0xe734054300>

primenie/?ysclid=lo1hk8l0xe734054300 (data obra-shcheniya: 10.08.2023).

5. Shaykhutdinova A. R., Safin R. R. Termodre-vesina: dizayn i tekhnologiya // Trudy Akademii Tekhnicheskoy Estetiki i Dizayna. 2016. № 1. S. 5–9.

6. Patent № 2422266 RF, MPK V 27 K 5/00. Sposob termoobrabotki drevesiny / Safin R. R., Safin R. G., Razumov E. Yu., Timerbaev N. F., Kaynov P. A. i dr.; patentoobladatel' OOO "NTTs RPO"; opubl. 27.06.2011.

7. Patent № 2453425 RF, MPK V 27 K 3/02. Sposob termicheskoy obrabotki drevesiny / Safin R. R., Khasanshin R. R., Kaynov P. A. i dr.; patentoobladatel' GOU VPOKGTU; opubl. 20.06.2012.

8. Khasanshin P. P., Ziatdinov P. P. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kleennykh materialov, sozdannykh na osnove termoobrabotannogo shpona // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Kazan'. 2013. №. 13. S. 87–90.

9. Razrabotka tekhnologii sozdaniya vlagostoykoy fanery / R. R. Safin, R. R. Khasanshin, R. R. Ziatdinov [i dr.] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012. T. 15, № 20. S. 64–65.

10. Ziatdinov R. R. Tekhnologiya proizvodstva vlagostoykoy fanery iz termomodifitsirovannogo shpona // Avtoreferatdiss. kand. tekhn. nauk, Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet, Kazan', 2013. 18 s.

11. Matyushenkova E. I. Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv fanery dlya stroitel'stva putem maslotermoobrabotki : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2012. 16 s.

12. Krivorotova A. I., Orlov A. A. Issledovanie svoystv kleennykh materialov na osnove termicheskii modifitsirovannogo shpona. Tekst: neposredstvennyy // Khvoynye boreal'noy zony. 2018. № 6. S. 548–554.

13. Spravochnik fanershchika. Sost. kolektivom sotrudnikov TsNIIF / pod redaktsiey kand. tekhn. nauk I. A. Sheydina, izd. 3-e ispr. i dop. Izd-vo "Lesnaya promyshlennost'", 1968. 832 s.

© Криворотова А. И., Орлов А. А.,
Эскин В. Д., 2024

Поступила в редакцию 31.10.2023
Принята к печати 22.01.2024

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
И РЕМОНТА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ****В. В. Сиваков**Брянский государственный инженерно-технологический университет
Российская Федерация, 241037, г. Брянск, пр. Станке Димитрова, 3

Проблема повышения эффективности лесозаготовительной техники за счет мониторинга ее технического состояния и своевременного проведения необходимого технического обслуживания и ремонта является актуальной, так как поддержание работоспособного состояния машин требует больших временных, материальных и финансовых затрат, при этом внезапный выход машины из строя приводит к простоям и убыткам предприятия. Особое значение данная задача имеет для лесозаготовительной техники, которая находится на лесосеке, вдали от сервисной базы предприятия. В этом случае важен постоянный мониторинг состояния машин и контроль всех мероприятий, связанных с качественным и своевременным техническим обслуживанием и ремонтом, который может быть осуществлен самостоятельно оператором машины, выездной бригадой предприятия, выездным сервисом универсального или дилерского предприятия. Применение электронных систем, облегчающих работу современных машин, а также систем самодиагностики создает предпосылки для внедрения технологии удаленного мониторинга их технического состояния. В то же время, для эффективного решения задачи поддержания работоспособности машин необходимо учитывать большое число разнообразных факторов, связанных как с условиями работы машины и ее реальным техническим состоянием, так и наличием свободных ремонтных мощностей, квалифицированного ремонтного персонала, запасных частей и материалов, возможностей сторонних сервисных организаций. Успешное решение задачи повышения эффективности управления системой ТО и Р возможно за счет внедрения цифровых технологий как для мониторинга технического состояния машин, так и для планирования работ и приобретения необходимых запчастей и материалов, управления всеми производственными процессами на базе единой информационной системы управления класса ERP. Выбор программного обеспечения для управления техническим обслуживанием и ремонтом должен осуществляться на основе анализа возможностей конкретного программного продукта, потребностей предприятия и возможности встраивания приобретаемого программного обеспечения в единую информационную систему управления.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, лесозаготовительные машины, программное обеспечение, цифровизация ТО и Р.

*Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 64–71***DIGITALISATION OF THE MANAGEMENT SYSTEM
OF MAINTENANCE AND REPAIR OF FORESTRY MACHINES****V. V. Sivakov**Bryansk State Technological University of Engineering
3, Stanke Dimitrova str., Bryansk, 241037, Russian Federation

The problem of increasing the efficiency of forestry machinery by monitoring its technical condition and timely performance of necessary maintenance and repair is relevant, since maintaining the working condition of machines requires large time, material and financial expenses, with sudden machine failure leading to downtime and losses of the enterprise. This is particularly important for forestry machines that are located at the harvesting area, far away from the company's service base. In this case, it is important to constantly monitor the condition of the machines and control all activities related to quality and timely maintenance and repair, which can be carried out by the machine operator himself, by a visiting company team, a field service of a universal or dealership. The use of electronic systems that facilitate the operation of modern machines, as well as self-diagnostic systems, creates the prerequisites for the introduction of technology for the remote monitoring of their technical condition. At the same time, in order to effectively solve the problem of maintaining machine operability it is necessary to take into account a large number of various factors related both to operating conditions of the machine and its real technical condition, and availability of spare repair capacities, qualified repair personnel, spare parts and materials, capabilities of third-party service organizations. A successful solution to the problem of improving the efficiency of the maintenance and repair system is possible through the introduction of digital technologies for both monitoring the technical condition of machines, and

for planning work and the purchase of necessary spare parts and materials, management of all production processes on the basis of a unified management information system of ERP class. The selection of a specific maintenance and repair management software should be based on an analysis of the capabilities of the specific software product, the needs of the company, and the possibility of integrating the purchased software into a unified management information system.

Keyword: Maintenance and repair system, forestry machines, software, digitalisation of maintenance and repair.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения эффективности управления процессом технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники может быть решена путем широкого внедрения цифровых технологий, так как управление сложными техническими объектами, требующими регулярного технического обслуживания и ремонта, является сложной и трудоемкой задачей, от решения которой во многом зависит экономическая эффективность производства [1]. Управление техническим состоянием машин на предприятиях осуществляется, как правило, в соответствии с планово-предупредительной системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) [2] (рис. 1). Однако данная система не учитывается фактическое состояние машины, что снижает ее эффективность.

Широкое внедрение в конструкцию машин электронных систем, систем их диагностирования, в том числе удаленного [3], технологии «Интернета вещей» (IoT) [4; 5] позволили разработать ряд других систем, направленных на повышение эффективности управления системой ТО и Р:

- системы, ориентированные на надежность (RCM) [6];
- обслуживание, ориентированное на предотвращение рисков (RBI) [7];
- ремонт по состоянию [8; 9].

Указанные системы не решают всех проблем эффективной организации технического обслуживания и ремонта, обладают своим набором достоинств и недостатков [10], поэтому поиск путей совершенствования продолжается. Особенно актуальна данная ситуация в случае эксплуатации техники вдали от ремонтной базы предприятия, поэтому для таких машин в качестве основной системы целесообразно использовать систему «ремонт по состоянию», однако для ее внедрения необходимо оснащение техники цифровой диагностической системой, позволяющей осуществ-

лять непрерывный мониторинг состояния контролируемых узлов, телекоммуникационным оборудованием, позволяющим передавать полученные данные на сервер компании, а также квалифицированными сотрудниками [11].

Цель работы заключается в оценке применимости цифровых информационных технологий для управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники, обеспечивающей повышение эффективности деятельности предприятия.

Новизна работы заключается в определении специфики проведения технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники, находящейся на лесосеке, вдали от сервисной базы предприятия, проведении анализа функциональных возможностей предлагаемых в настоящее время информационных систем для обеспечения эффективного управления техническим обслуживанием и ремонтом машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье рассмотрены особенности работы системы технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники и проблемы, связанные с повышением ее эффективности за счет ее цифровизации. Рассмотрены программные продукты, применяемые для управления техническим обслуживанием и ремонтом машин на предприятии, выполнен анализ их функциональности, уровни применения, модульности построения, развертыванию, возможностям встраивания в единую информационную среду.

Задача поддержания работоспособности машин лесозаготовительного предприятия осложняется необходимостью учета большого числа факторов, зависящих от условий работы машин, их реального технического состояния, наличия свободных сервисных мощностей, квалифицированных механиков, запасных частей и материалов [12; 13].



Рис. 1. Система планово-предупредительного ремонта машин

В прошлом, эта работа требовала больших усилий со стороны управленческого персонала, умения предвидеть возможное развитие ситуации, однако, зачастую, техника простаивала, ведь точно указать время выхода из строя того или иного узла было практически невозможно.

Совершенствование элементной базы электроники позволила производителям машин создать электронные системы, управляющие работой многих систем и агрегатов, а также осуществлять мониторинг технического состояния машин и оборудования. Цифровизация деятельности лесозаготовительных предприятий [14] позволяет эффективнее планировать техническое обслуживание и ремонт техники, приобретать необходимые запчасти и материалы, управлять всеми производственными процессами.

Специфика работы предприятия требует учета различных факторов, позволяющих эффективно управлять системой ТО и Р. Учитывая, что на лесозаготовительном предприятии может быть как лесозаготовительные машины, так и стационарное технологическое оборудование, возникает необходимость организовать управление их техническим обслуживанием и ремонтом не только на ремонтной базе предприятия, но и вдали от нее, при работе на лесосеке. В этом случае выполнение мероприятий по техническому обслуживанию, в том числе ежесменному, а также внеплановому ремонту приходится выполнять не на самом предприятии (что усложняет процесс, появляются дополнительные затраты на транспортировку), а непосредственно на месте работы или временной стоянки техники (рис. 2). Это может привести к некачественному обслуживанию или же вовсе к его пропуску вследствие слабого контроля проводимых мероприятий, а также затруднению качественного ремонта вследствие отсутствия необходимого оборудования, квалифицированных сотрудников сервисной службы, отсутствия доступа к необходимой сервисной документации по обслуживанию и ремонту.

Проведение ЕТО на месте работы или стоянки техники может осуществляться самостоятельно оператором машины, технические обслуживания и ремонт, в зависимости от сложности, могут проводиться или выездной бригадой предприятия или же, в случае использования сложной техники зарубежного производства, мобильной ремонтной службой специализированного предприятия или официального дилера. Широкое применение электронных систем в конструкции современных машин обуславливает необходимость их диагностирования и настройки, для чего требуется фирменное диагностическое оборудование производителя, доступ к его базам данных с технической информацией, что доступно только для официальных дилеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ведущие мировые производители лесозаготовительной техники, такие как Ponsse, John Deere, Komatsu, для мониторинга и управления своей техникой разработали и широко применяют оригинальные программные решения (рис. 3), так, управления техническим обслуживанием и ремонтом машин компа-

нии Ponsse осуществляется на основе программы Fleet Manager [15], Komatsu организывает процесс управления на базе программы MaxiFleet [16]. Компания John Deere с помощью разработанного приложения TimberLink [17] предлагает управление не только харвестерами и форвардерами, но и другой лесозаготовительной техникой, например, погрузчиками, трелевщиками, валочно-пакетирующими машинами.

Как показал проведенный анализ, стандартным решением для производителей является доступ к электронному каталогу запчастей и электронному руководству к машине, поиску дилеров и организации связи с ними. Также организован сбор данных о состоянии машины, ее производительности с отправкой или в специализированную программу компании (Komatsu, John Deere) или же в используемую предприятием ERP систему (Ponsse). Дальнейшим развитием электронных систем компаний John Deere является удаленный доступ к машине и ее удаленная диагностика посредством JDLINK. Данное решение применяется не только для лесозаготовительной техники, производимой компанией John Deere, но и для всей выпускаемой линейки (сельскохозяйственной, строительной и другой техники).

Таким образом, данные, собранные с отдельных лесных машин, обрабатываются в облачной среде и далее предоставляются ИТ-системам заказчика. На основе этих данных создаются различные отчеты, позволяющие эффективно планировать ресурсы и соответствующим образом планировать предстоящую работу.

Учитывая, что в настоящее время происходит активное внедрение цифровых технологий в разные сферы экономики [18; 19], осуществляется переход на новый технологический уклад [20; 21; 22], задача разработки и внедрения систем, контролирующих состояние машин, является актуальной. Разработаны как отечественные системы мониторинга работы карьерных экскаваторов [23; 24] и самосвалов [25; 26], так и зарубежные [27; 28].

Для совершенствования управления процессом ТО и Р техники, интеграции получаемых данных в систему управления предприятием, рядом компаний, не связанных с производителями лесозаготовительных машин, применяется достаточно большое количество систем управления ТО и Р, которые разделяются на 5 классов (рис. 4).

Применяемое программное обеспечение представлено в таблице.

Рассматриваемое программное обеспечение зачастую дублирует часть функций, относится к нескольким классам, разработано в рамках единой системы управления предприятием класса ERP, как отечественных: 1С (1С:ТОИР, 1С:RCM Управление надежностью), Галактика (Галактика EAM), так и иностранных: IBM (IBM Maximo), SAP (SAP Predictive Maintenance and Service, SAP Asset Intelligence Network), Oracle (Oracle Enterprise Asset Management). Такие системы управления ТО и Р могут быть развернуты как на базе сервера предприятия, так и облачных решений сторонних компаний, некоторые предлагаются дополнительно на мобильных устройствах (телефонах, планшетах).



Рис. 2. Возможность проведения ТО и Р



Рис. 3. Программное обеспечение для управления техническим обслуживанием техники ведущими мировыми производителями лесозаготовительной техники



Рис. 4. Системы управления техническим обслуживанием и ремонтом

Программное обеспечение для управления техническим обслуживанием и ремонтом [29]

	Системы управления активами предприятия (EAM)	Автоматизированные системы управления техническим обслуживанием (CMMS)	Системы предиктивного технического обслуживания (PdM)	Системы надёжно-ориентированного технического обслуживания (RCM)	Системы управления выездным сервисным обслуживанием (FSM)
1C:ТОИР	+	+	+	+	
TRIM	+	+		+	+
NERPA EAM	+	+	+		
Infor EAM	+	+	+		
F5 EAM	+	+	+		
Ellipse EAM	+	+	+		
Галактика EAM	+	+		+	
HubEx	+	+			+
openMAINT	+	+			+
Seascope	+	+			
Global-EAM	+	+			
F5 PMM		+	+		
1C:RCM Управление надёжностью			+	+	
IBM Maximo	+		+		
SAP Predictive Maintenance and Service	+				+
робоТОиР		+			+

Последнее важно при организации выездного обслуживания техники, так как ускоряет ввод данных в систему управления. Для лесозаготовительной техники, эксплуатируемой вдали от телекоммуникационных каналов связи, важным является режим автономной работы устройства до появления возможности синхронизации с сервером.

Таким образом, проблема повышения эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта машин, снижения расходов на поддержание исправного состояния машин актуальна и может быть решена за счет цифровизации процессов на основе программных решений как производителей лесозаготовительной техники, так и сторонних IT-компаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований установлено, что вопросам цифровизации технического обслуживания и ремонта лесозаготовительных машин в последнее время уделяют большое внимание. Активно развиваются программные продукты, направленные на автоматизацию процесса управления техническим обслуживанием и ремонтом машин [30; 31] как ведущими производителями лесозаготовительных машин, так и сторонними компаниями, при этом представленное программное обеспечение предлагается как отечественными, так и зарубежными IT-компаниями, функционально, может развертываться как на основе сервера, так и облачных технологий. Наиболее продвинутые программные продукты направлены не просто на упорядочение управления техническим обслуживанием и ремонтом, а на повышение работоспособности оборудования за счет постоянного монито-

ринга и прогнозирования изменения контролируемых узлов и систем. Выбор конкретного программного продукта должен осуществляться исходя из совместимости с уже используемыми ERP системами управления предприятием и необходимости создания единой цифровой среды для повышения эффективности работы предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Фанта Е. А. Ключевые показатели эффективности в использовании запасных частей как точки контроля в системе управления производственным предприятием // Вопросы инновационной экономики. 2019. Том 9. № 1. С. 267–274. DOI: 10.18334/vinec.9.1.39935.
2. Иовлев Г. А. Мировая практика организации технического сервиса // Агропродовольственная политика России. 2018. № 4(76). С. 49–53.
3. Гурский А. С., Ивашко В. С. Использование транспортной телематики и дистанционной диагностики для совершенствования технического обслуживания и ремонта транспортных средств // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65, № 3. С. 375–383. DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
4. Bauer H., Patel M., Veira J. (2016) The Internet of Things: sizing up the opportunity. New York (NY): McKinsey & Company. URL: <http://www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/the-internet-of-things-sizing-up-the-opportunity/>.
5. Parshina I. S., Frolov E. B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies. *Ekonomika v promyshlennosti* = Russian Journal of Industrial Econom-

ics, 2020. Vol. 13. No. 1. Pp. 29–34. (In Russ.). DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34.

6. Тугенгольд А. К., Волошин Р. Н., Юсупов А. Р., Круглова Т. Н. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 74–80. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.

7. Завьялов А. П. Диагностическое обслуживание оборудования и трубопроводов нефтегазовых производств при риск-ориентированном подходе к эксплуатации // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2020. № 3(117). С. 79–81. DOI: 10.33285/1999-6934-2020-3(117)-79-81.

8. Безуглов А. Е., Кислицына О. А. Ключевые показатели эффективности при проведении технического обслуживания и ремонта оборудования // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9, № 4. С. 1501–1514. DOI: 10.18334/vinec.9.4.41208.

9. Гончаров А. Б., Тулинов А. Б., Перепечай Б. А., Гончаров А. А. Методы организации системы технического обслуживания и ремонта оборудования с целью обеспечения его безотказной работы // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 2. С. 35–40.

10. Мерданов Ш. М., Конев В. В. Совершенствование организации технического обслуживания и ремонта строительно-дорожных машин // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2020. № 2. С. 15–21.

11. Семькина А. С., Загородний Н. А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерного автомобильного транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-4(78). С. 35–41. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-35-41.

12. Тесовский А. Ю. Пути повышения качества технического обслуживания и ремонта оборудования и машин лесозаготовок и лесного хозяйства на местах эксплуатации // Строительные и дорожные машины. 2017. № 5. С. 40–41.

13. Запруднов В. И., Карпачев С. П., Быковский М. А. Потребность парка лесосечных машин в техническом обслуживании // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 2. С. 76–79. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-76-79.

14. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, В. А. Зеликов [и др.] // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 1(45). С. 96–109. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8.

15. Multifleet by ponsse [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ponsse.com/en/service/multifleet/#/> (дата обращения: 10.05.2023).

16. Komatsu. MaxiFleet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.komatsuforest.ru/сервис/maxifleet> (дата обращения: 10.05.2023).

17. Система удаленного мониторинга техники JDLink [Электронный ресурс]. URL: <https://tmbk.ru/media/k2/attachments/Буклет%20Система%20удаленного%20мониторинга%20техники%20JDLink.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).

18. Gölzer P., Fritzsche A. (2017) Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. Production Planning and Control 28(16): 1332–1343 DOI: 10.1080/09537287.2017.1375148.

19. Tolstykh T. O., Afonin S. E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. Russian Journal of Industrial Economics. 2021; 14(4): 410–417. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>.

20. Meissner H., Ilsena R., Auricha J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0//Procedia CIRP. Vol. 62. P. 165–169.

21. Kolberg D., Zühlke D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. December 2015 IFAC-Papers On Line 48(3): 1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.

22. Erboz G. (2020). A qualitative study on industry 4.0 competitiveness in Turkey using Porter diamond model. Journal of Industrial Engineering and Management 13(2): 266. DOI: 10.3926/jiem.2915.

23. Дрыгин М. Ю. Разработка системы контроля и учета работы для карьерных экскаваторов типов драглайн и мехлопата // Вестник КузГТУ. 2020. № 1 (137). С. 29–39. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-29-39.

24. Вин Зо Хтэй, Певзнер Л. Д., Темкин И. О. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение бортовой информационной системы шагающего драглайна // ГИАБ. 2019. № 2. С. 190–196. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-190-196.

25. Аброськин А. С. Мониторинг работы карьерных автосамосвалов на современном этапе // Вестник ИргТУ. 2015. № 3 (98). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-raboty-kariernyh-avtosamosvalov-na-sovremennom-etape> (дата обращения: 07.02.2023).

26. Семенов М. А., Большунова О. М. Контроль загрузки карьерных автосамосвалов // Записки Горного института. 2008. Т. 178. С. 143–145. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-zagruzki-kariernyh-avtosamosvalov> (дата обращения: 07.02.2023).

27. Gupta, Dr & Bansal, Dr & Singh, Sandeep. (2020). Application of Failure Mode Effect Analysis for Improved Scheduling in Maintenance of Machines. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 9. 895–899. 10.35940/ijitee.E3025.049620.

28. Kurniawan, Rizki & Kholik, Heri. (2017). Usulan Perawatan Mesin Stitching Dengan Metode Reliability Centered Maintenance. Jurnal Teknik Industri. 16. 83. Vol. 16, No. 2. Pp. 83–91. 10.22219/JTIUMM.

29. Сравнение системы управления техническим обслуживанием и ремонтом (СУ ТО и Р) [Электронный ресурс]. URL: <https://soware.ru/categories/maintenance-management-systems> (дата обращения: 05.05.2023).

30. Дракунов И. И., Сиваков В. В., Деревягин Р. Ю. Современное программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта автомобилей // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2022. Т. 1. С. 30–33. EDN SHTJGY.

31. Дракунов И. И., Сиваков В. В., Заикин А. Н. Анализ программного обеспечения для управления системой технического обслуживания и ремонта автомобилей // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : сборник научных трудов по материалам 81-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 31 января – 02 2023 года. Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2023. С. 91–99. EDN IUUCTA.

REFERENCES

1. Fanta E. A. Klyuchevye pokazateli effektivnosti v ispol'zovanii zapasnykh chastej kak tochki kontrolya v sisteme upravleniya proizvodstvennym predpriyatiem // Voprosy innovacionnoj ekonomiki 2019. Vol. 9. № 1. Pp. 267–274. DOI: 10.18334/vinec.9.1.39935.
2. Iovlev G. A. Mirovaya praktika organizacii tekhnicheskogo servisa // Agropredo-vol'stvennaya politika Rossii. 2018. № 4(76). Pp. 49–53.
3. Gurskij A. S., Ivashko V. S. Ispol'zovanie transportnoj telematiki i distancionnoj diagnostiki dlya sovershenstvovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta transportnykh sredstv // Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk. 2020. Vol. 65, № 3. Pp. 375–383. DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
4. Bauer H., Patel M., Veira J. (2016) The Internet of Things: sizing up the opportunity. New York (NY): McKinsey & Company. URL: <http://www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/the-internet-of-things-sizing-up-the-opportunity/>.
5. Parshina I. S., Frolov E. B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies // Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics, 2020. Vol. 13. No. 1. Pp. 29–34. DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34.
6. Tugengol'd A. K., Voloshin R. N., Yusupov A. R., Kruglova T. N. Tekhnicheskoe obsluzhivanie tekhnologicheskikh mashin na baze cifrovizacii // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. Vol. 19, № 1. Pp. 74–80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
7. Zav'yalov A. P. Diagnosticheskoe obsluzhivanie oborudovaniya i truboprovodov neftegazovykh proizvodstv pri risk-orientirovannom podhode k ekspluatatsii // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa. 2020. № 3(117). Pp.79–81. DOI 10.33285/1999-6934-2020-3(117)-79-81.
8. Bezuglov A.E., Kislicyna O.A. Klyuchevye pokazateli effektivnosti pri provedenii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya // Voprosy innovacionnoj ekonomiki. 2019. Vol 9. № 4. Pp. 1501–1514. DOI: 10.18334/vinec.9.4.41208.
9. Goncharov A. B., Tulinov A. B., Perepechaj B. A., Goncharov A. A. Metody organizacii sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya s cel'yu obespecheniya ego bezotkaznoj raboty // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2017. № 2. Pp. 35–40.
10. Merdanov Sh. M., Konev V. V. Sovershenstvovanie organizacii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta stroitel'no-dorozhnykh mashin // Transport i mashinostroenie Zapadnoj Sibiri. 2020. № 2. Pp. 15–21.
11. Semykina A. S., Zagorodnij N. A. Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kar'ernogo avtomobil'nogo transporta // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2022. № 3-4(78). Pp. 35–41. DOI 10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-35-41.
12. Tesovskij A. Yu. Puti povysheniya kachestva tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya i mashin lesozagotovok i lesnogo hozyajstva na mestah ekspluatatsii // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2017. № 5. Pp. 40–41.
13. Zaprudnov V. I., Karpachev S. P., Bykovskij M. A. Potrebnost' parka lesosechnykh mashin v tekhnicheskome obsluzhivanii // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2017. Vol. 21. № 2. Pp. 76–79. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-76-79.
14. Zaikin A. N., Sivakov V. V., Zelikov V. A., Stasyuk V. V., Chuikov A. S., Zelikova N. V. (2022) Software for management of forestry and logging processes: assessment of applicability. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 1 (45), pp. 96–109 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8>.
15. Multifleet by ponsse. URL: <https://www.ponsse.com/en/service/multifleet/#/> (data obrashcheniya: 10.05.2023).
16. Komatsu. MaxiFleet. URL: <https://www.komatsu-forest.ru/сервис/maxifleet> (data obrashcheniya: 10.05.2023).
17. Sistema udalennogo monitoringa tekhniki JDLINK. URL: <https://tmbk.ru/media/k2/attachments/Буклет%20Система%20удаленного%20мониторинга%20техники%20JDLINK.pdf> (data obrashcheniya: 10.05.2023).
18. Gölzer P., Fritzsche A. (2017) Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. Production Planning and Control 28(16): 1332–1343 DOI: 10.1080/09537287.2017.1375148.
19. Tolstykh T. O., Afonin S. E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. Russian Journal of Industrial Economics. 2021; 14(4): 410–417. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>.
20. Meissner H., Ilsena R., Auricha J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0//Procedia CIRP. Vol. 62. P. 165–169.
21. Kolberg D., Zühlke D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. December 2015 IFAC-Papers On Line 48(3):1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.
22. Erboz G. (2020). A qualitative study on industry 4.0 competitiveness in Turkey using Porter diamond model. Journal of Industrial Engineering and Management 13(2): 266. DOI: 10.3926/jiem.2915.
23. Drygin M. Yu. Razrabotka sistemy kontrolya i ucheta raboty dlya kar'ernykh ekskavatorov tipov draglajn i mekhlopata // Vestnik KuzGTU. 2020. № 1 (137). Pp. 29–39. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-29-39.
24. Vin Zo Htej, Pevzner L. D., Temkin I. O. Algoritmicheskoe i apparatnoe obespechenie bortovoj

informacionnoj sistemy shagayushchego draglajna // GIAB. 2019. № 2. Pp. 190–196. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-190-196.

25. Abros'kin A.S. Monitoring raboty kar'ernyh avtosamosvalov na sovremennom etape // Vestnik IrGTU. 2015. № 3 (98). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-raboty-kariernyh-avtosamosvalov-na-sovremennom-etape> (data obrashcheniya: 07.02.2023).

26. Semenov M. A., Bol'shunova O. M. Kontrol' zagruzki kar'ernyh avtosamosvalov // Zapiski Gornogo instituta. 2008. Vol. 178. Pp. 143–145. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-zagruzki-kariernyh-avtosamosvalov> (data obrashcheniya: 07.02.2023).

27. Gupta, Dr & Bansal, Dr & Singh, Sandeep. (2020). Application of Failure Mode Effect Analysis for Improved Scheduling in Maintenance of Machines. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 9. 895–899. 10.35940/ijitee.E3025.049620.

28. Kurniawan, Rizki & Kholik, Heri. (2017). Usulan Perawatan Mesin Stitching Dengan Metode Reliability Centered Maintenance. Jurnal Teknik Industri. 16. 83. Vol. 16. No. 2. Pp. 83–91. 10.22219/JTIUMM.

29. Sravnenie sistemy upravleniya tekhnicheskimi obsluzhivaniem i remontom (SU TO i R). URL: <https://soware.ru/categories/maintenance-management-systems> (data obrashcheniya: 05.05.2023).

30. Drakunov I. I., Sivakov V. V., Derevyagin R. Yu. Sovremennoe programmnoe obespechenie dlya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta avtomobilej // Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. 2022. Vol. 1. Pp. 30–33. EDN SHTJGY.

31. Drakunov I. I., Sivakov V. V., Zaikin A. N. Analiz programmnoho obespecheniya dlya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta avtomobilej // Aktual'nye voprosy tekhnicheskoy ekspluatacii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta: Sbornik nauchnyh trudov po materialam 81-oj nauchno-metodicheskoy i na-uchno-issledovatel'skoj konferencii MADI, Moskva, 31 yanvarya – 02 2023 goda. Moskva : Moskovskij avtomobil'no-dorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (MADI), 2023. Pp. 91–99. EDN IUUCTA.

© Сиваков В. В., 2024

Поступила в редакцию 31.05.2023
Принята к печати 22.01.2024

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТЕПЛООТДАЧИ
ВСТРОЕННОГО ДЕФЛЕГМАТОРА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ
ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ.**

М. М. Баяндина, А. В. Кустов, Я. С. Гончарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

В статье представлено исследование коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи встроенного теплообменника (дефлегматора) ректификационной колонны, применяемой в технологических линиях химической переработки биомассы древесины. Проведено математическое моделирование по влиянию изменения одного из технологических параметров (диаметр трубок теплообменника, материала изготовления теплообменника и охлаждающей жидкости) теплообменника на коэффициент теплоотдачи.

Ректификация широко используется в следующих отраслях: в технологиях комплексной переработки древесины; в лесохимической промышленности при получении продуктов потребления; при восстановлении экстракционных растворов в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; в технологии химической переработки древесины при производстве этанола; при переработке нарастающих природных отходов газификацией и использования синтез-газа для получения биополимера на стадии регенерации растворителей (хлористый метилен, гипохлорит натрия, гексан и т. д.), где также востребованы высокоэффективные и производительные ректификационные колонны.

В большинстве своём, ректификации подлежат многокомпонентные смеси, как правило, азеотропные, имеющие схожую температуру кипения, что объясняет использование для их разделения многоступенчатых ректификационных колонн. При этом применяются различные способы ректификации, такие как азеотропная, экстрактивная, молекулярная, дробная, парциальная.

Ключевые слова: ректификация, теплообмен, дефлегматор, коэффициент теплоотдачи, критерий Рейнольдса, критерий Нуссельта, моделирование, материал.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 72–78

**INVESTIGATION OF THE HEAT TRANSMISSION AND HEAT TRANSFER COEFFICIENTS
OF THE INTEGRATED DEFLEGMATOR IN DISTILLATION COLUMN DURING
THE PROCESSING OF RAW MATERIALS.**

M. M. Bayandina, A. V. Kustov, Ya. S. Goncharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

The article presents a study of the coefficients of heat transfer and heat transmission of an integrated heat exchanger (deflegmator) of a distillation column used in technological lines of chemical processing of wood biomass. Mathematical modeling was carried out on the effect of changes in one of the technological parameters (dimeter of the heat exchanger tubes, material of the heat exchanger and coolant) of the heat exchanger on the heat transfer coefficient.

Rectification is widely used in the following industries: in the technologies of complex wood processing; in the forestry industry in the production of consumer products; in the recovery of extraction solutions in the extraction of biologically active substances from plant raw materials; in the technology of chemical processing of wood in the production of ethanol; when processing increasing natural waste by gasification and using synthesis gas to produce a biopolymer at the stage of solvent regeneration (methylene chloride, sodium hypochlorite, hexane, etc.), where highly efficient and productive distillation columns are also in demand.

For the most part, multicomponent mixtures are subject to rectification, usually azeotropic, having a similar boiling point, which explains the use of multi-stage rectification columns for their separation. At the same time, various methods of rectification are used, such as azeotropic, extractive, molecular, fractional, partial.

Keywords: rectification, heat exchange, deflegmator, heat transfer coefficient, Reynolds criterion, Nusselt criterion, modeling, material.

В ректификационных установках очень широкое применение получили теплообменники различных конструкций. Устанавливается два теплообменника. Один из которых, предназначен для частичной конденсации паров и возвращения их в жидкой фазе обратно в колонну для увеличения концентрации головного продукта. Такой теплообменник называется дефлегматор, а сконденсированные пары – флегмой [1; 2; 3].

В лабораторном либо мелкосерийном производстве, для экономии пространства и из-за небольших объемов производства, используется встроенный дефлегматор, выполненный в одном корпусе с ректификационной колонной.

Для малотоннажных ректификационных колонн с целью достижения наибольшей эффективности наиболее целесообразно использование встроенных дефлегматоров. Основное назначение дефлегматора – получение температуры флегмы, близкой к температуре паровой смеси в зоне конденсации. Для сравнения работоспособности таких устройств были изготовлены и исследованы дефлегматоры, схемы которых представлены на рис. 1.

Применение дефлегматора, выполненного в виде кожухотрубчатого теплообменника (рис. 1, а), не позволило получить температуру флегмы, близкую к ее кипению. Разность температуры между конденсатом и контактирующими с ней парами составила $\Delta t = 15\text{--}20^\circ\text{C}$, из-за охлаждения конденсата на поверхности вертикально установленных труб. Кроме того, не обеспечивается компенсация температурных напряжений в сварных швах корпуса и трубок.

Использование дефлегматора с горизонтально размещенными трубами (рис. 1, б) не позволило обес-

печить требуемую поверхность теплообмена из-за достижения больших его габаритов и металлоемкости и, в этой связи, не представляет интереса для дальнейшего совершенствования.

Наиболее эффективным является дефлегматор, выполненный из медных трубок, изготовленных в виде спиралей Архимеда (рис. 1, г), который в настоящее время активно рекламируются в печати. Такая компоновка дефлегматора позволяет обеспечить требуемую поверхность теплообмена при сравнительно малых габаритах, создать дополнительную зону контакта пара с жидкостью, устранить температурные напряжения.

В связи со слабой изученностью процессов, протекающих в дефлегматоре, и отсутствием рекомендаций по его изготовлению, были проведены исследования режимов работы и коэффициентов теплоотдачи.

Поверхность теплообмена дефлегматора составила $F = 0,35\text{ м}^2$, диаметр медных трубок – $8 \times 1\text{ мм}$, количество витков – 5 шт., расстояние между ними – 50 мм, величина зазора между витками – 1,5 мм. Для устранения пленки конденсата с поверхности трубок на них наматывалась медная проволока толщиной 0,1 мм с шагом 35 мм. Внутренний диаметр корпуса дефлегматора составил 120 мм, диаметр насадочной колонны – 100 мм. Кубовая часть колонны емкостью $0,1\text{ м}^3$, была снабжена рубашкой и встроенными в ней электронагревателями мощностью до 10 кВт. Расход подаваемой воды в дефлегматор составил $0,04\text{--}0,2\text{ м}^3/\text{ч}$ при ее начальной температуре $5\text{--}7^\circ\text{C}$. Исследовалась смесь этиловый спирт-вода при начальной концентрации этанола 40 % об.

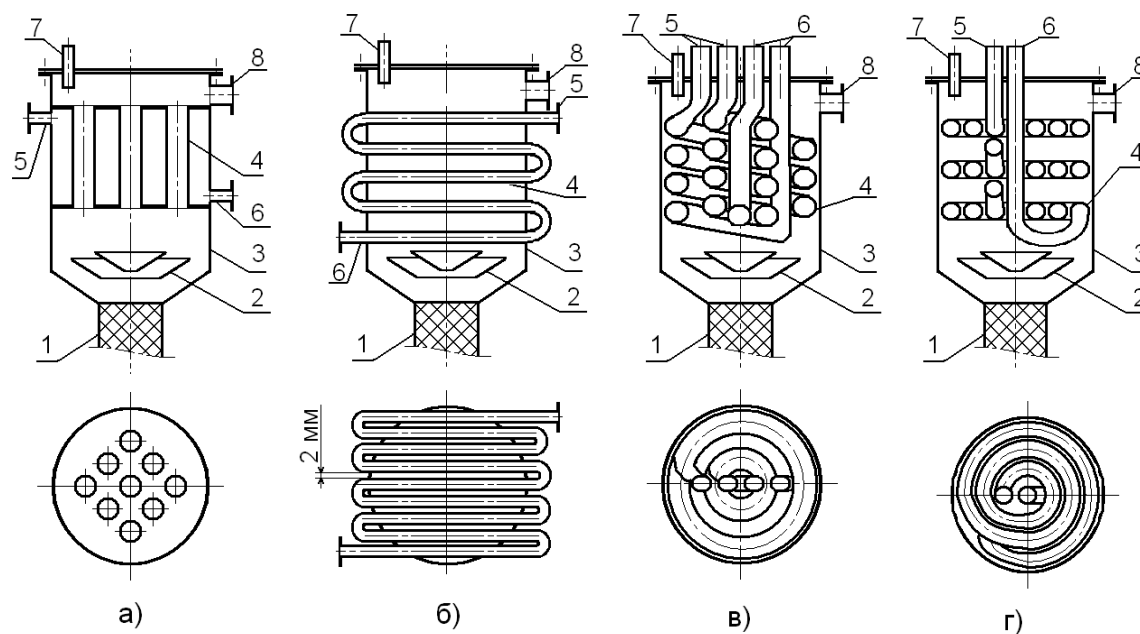


Рис. 1. Схемы встроенных дефлегматоров:

а – вертикальный трубчатый; б – горизонтальный трубчатый; в – змеевиковый; г – из спиралей Архимеда.

1 – колонна; 2 – распределитель конденсата; 3 – корпус дефлегматора; 4 – дефлегматор; 5 – штуцер для входа воды; 6 – штуцер для выхода воды; 7 – гильза под термометр; 8 – штуцер для выхода паров

Коэффициенты теплопередачи (K) и теплоотдачи (α_1) определялись из общеизвестных зависимостей [2]:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}, \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; F – площадь теплообмена, м^2 ; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разница между температурами горячего и холодного теплоносителей, К ; δ – толщина стенки, м ; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя (пара) к стенке, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; α_2 – коэффициент теплопередачи от стенки к холодному теплоносителю (вода), $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Исследовались три основные схемы подключения охлаждающей воды к дефлегматору, рис. 2.

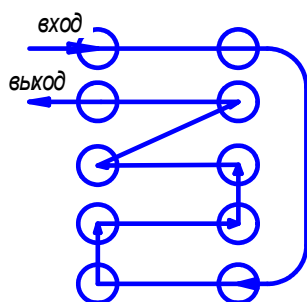


Рис. 2. Схема подключения дефлегматора

При мощности нагревателей 3 кВт, флегмовом числе, равном 3, числе Рейнольдса охлаждающей воды в медных трубках 2500–3000, значения коэффициента теплопередачи составили $K_{\text{оп}} = 300\text{--}400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для конструкции, изображенной на рис. 3. Причем наибольшие значения K получены при работе дефлегматора по схеме, представленной на рис. 4. Величина коэффициента теплоотдачи при конденсации оказалась равной $\alpha_k = 400\text{--}500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис. 5).

Снижение величины Δt в дефлегматоре возможно путем увеличения числа Рейнольдса охлаждающей жидкости в дефлегматоре, мощности нагревателей и поверхности дефлегматора. В этой связи, подогрев воды в дополнительном теплообменнике способствует увеличению числа Рейнольдса воды в трубках дефлегматора, что приводит к росту температуры охлаждающей воды на выходе и, следовательно, увеличению температуры флегмы.

Установлено три гидродинамических режима взаимодействия фаз в дефлегматоре: капельный, провальный, захлебывания (рис. 4). При капельном режиме течения наблюдается срыв конденсата в виде капель (диаметром 2–5 мм) с поверхности витков. При расходе жидкости 0,012–0,027 $\text{м}^3/\text{ч}$ и скорости газа в щелях между витками 0,9–1,5 м/с наблюдается режим течения, соответствующий работе провальной тарелки. При скорости газа выше 2 м/с, устанавливается режим подвисяния, дефлегматор заполняется флегмой, с последующим захлебыванием колонны.

Уменьшение мощности нагревателей в колонне ведет к снижению расхода охлаждающей воды в дефлегматоре, что требует при конструировании дефлегматора использования медных труб малого диаметра с целью обеспечения турбулентного режима. В этой связи, применение колонн диаметром менее 80 мм, со встроенным змеевиковым дефлегматором не эффективно, так как из-за низкой тепловой нагрузки не обеспечивается требуемая температура флегмы.



а



б

Рис. 3. Конструкция дефлегматора установленного в колонне опытного производства по получению биополимера:

а – общий вид; б – вид со стороны входа пара

В работах [3; 4] представлены зависимости для определения коэффициентов в следующем виде:

$$y(x) = 2,106 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,099 \cdot x + 6,502 \cdot 10^{-5}, \quad (1)$$

где y – коэффициент теплоотдачи пара; x – критерий Рейнольдса.

Для уточнения зависимости для определения коэффициентов было проведено математическое моделирование по определению зависимостей коэффициентов от критерия Рейнольдса.

На рис. 5 и рис. 6 представлен диаграммы изменения коэффициента Теплопередачи и теплоотдачи при конденсации паров, соответствующего обработке экспериментальных данных.

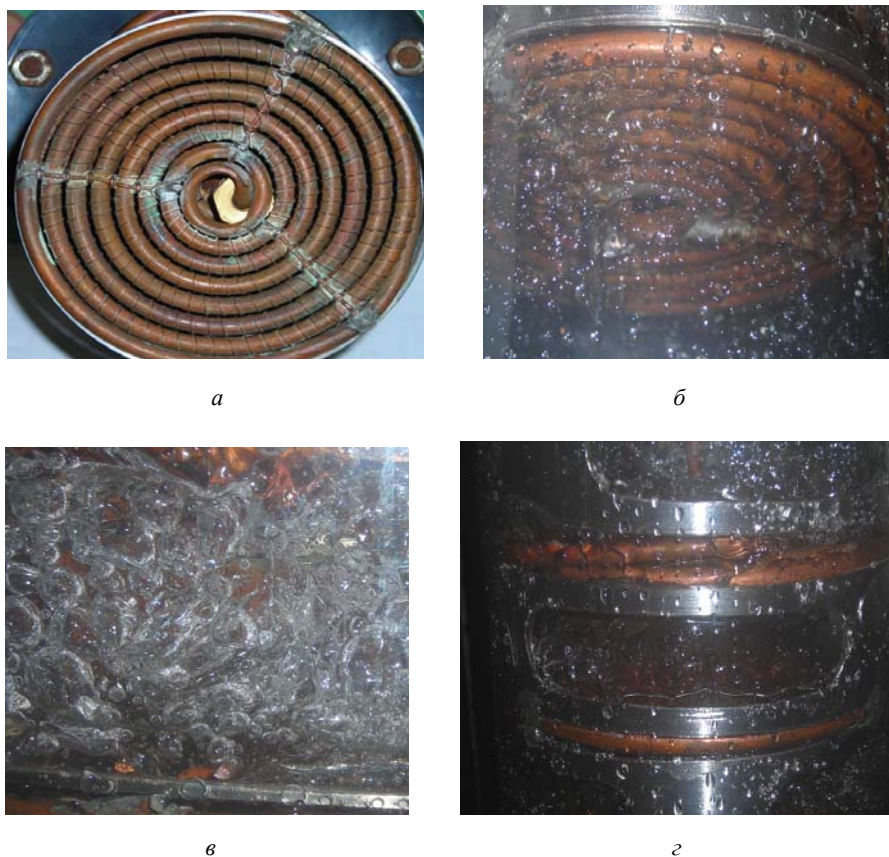


Рис. 4. Режимы движения парожидкостной смеси дефлегматоре:

а – сухие витки дефлегматора; *б* – капельный режим; *в* – провальный; *г* – захлебывания

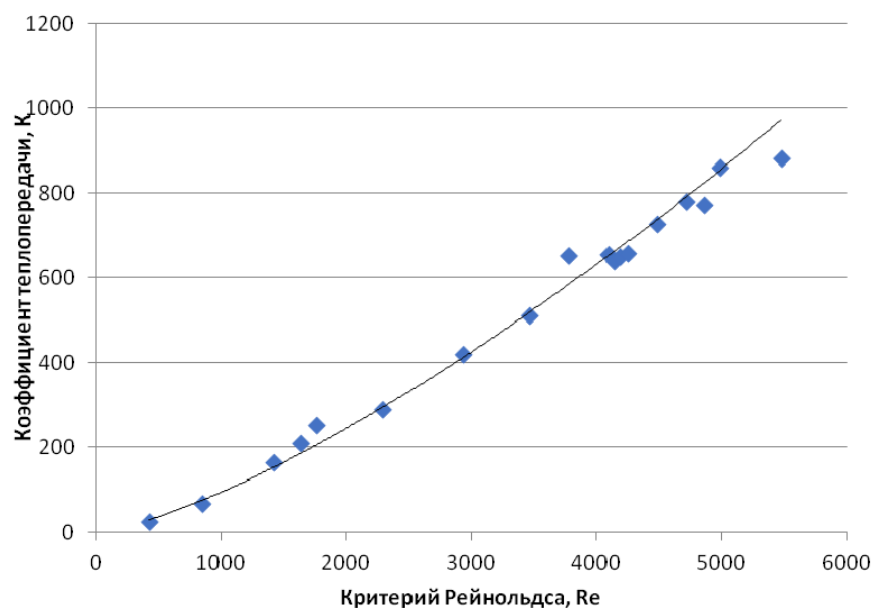


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи от значения критерия Рейнольдса

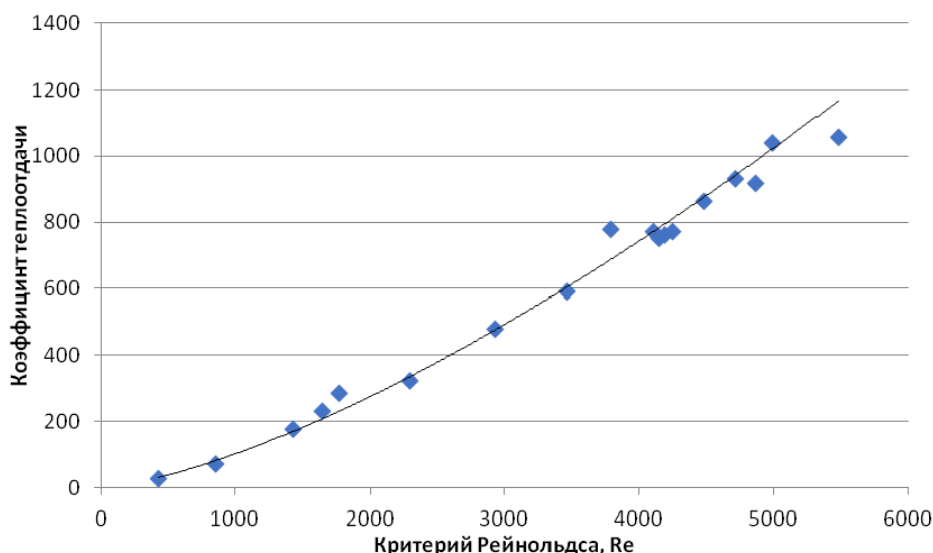


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи горячего теплоносителя от значения критерия Рейнольдса

На основе анализа имеющихся экспериментальных данных и полученных графиков было установлено:

$$K \sim Re^{1,37}, \alpha_1 \sim Re^{1,43}$$

Учитывая, что критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

Получены расчетные зависимости для определения коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи

$$\alpha_1 = 0,007 \times \left(\frac{G}{d \times v} \right)^{1,43}, \quad (3)$$

$$K = 0,0073 \times \left(\frac{G}{d \times v} \right)^{1,37}. \quad (4)$$

Расчеты по приведенным формулам (3) и (4) представлены на рис. 2 и рис. 3 в виде прямой линии. Расхождения между расчетными данными и экспериментальными составили в пределах 3,5 %.

После этого было проведено математическое моделирование по определению коэффициента теплоотдачи (α_1) в зависимости от материала изготовления дефлегматора.

В качестве материалов использовались следующие материалы (см. таблицу).

Характерные значения определения коэффициента теплоотдачи представлены на рис. 7.

Из представленных на графике данных видно, что при величине критерия Рейнольдса более 4000 наблюдается расслоение полученных величин. По нашему мнению, это связано с увеличением турбулизации потока жидкости в трубке дефлегматора.

Как видно, величины коэффициентов теплоотдачи для дефлегматора, выполненного из меди, а также моделирование для латуни и алюминия дают близкие друг к другу значения. Это связано с тем, что данные

материалы имеют близкие значения коэффициентов теплопроводности, что видно из таблицы.

Как видно из приведенных графиков, при изменении охлаждающей жидкости сопоставимыми величинами коэффициентов обладает этиленгликоль при этом режим течения жидкости изменится на ламинарный.

При математической обработке экспериментальных данных по работы дефлегматора в случае использования в случае изменения диаметра трубок изготовления дефлегматора (рис. 9).

При изменении диаметров трубок, происходит смещение значений коэффициентов теплоотдачи, что связано с тем, что при увеличении диаметра трубок происходит снижение коэффициент Рейнольдса.

Уменьшение мощности нагревателей в колонне ведет к снижению расхода охлаждающей воды в дефлегматоре, что требует при конструировании дефлегматора использования медных труб малого диаметра с целью обеспечения турбулентного режима. В этой связи, применение колонн диаметром менее 80 мм, со встроенным змеевиковым дефлегматором не эффективно, так как из-за низкой тепловой нагрузки не обеспечивается требуемая температура флегмы.

Согласно данным, представленным на рис. 10, гидравлическое сопротивление дефлегматора без орошения составило не более 35 мм.вод.ст. С увеличением нагрузки по жидкости и газу, сопротивление дефлегматора возрастает. В процессе ректификации ($N = 6$ кВт) сопротивление дефлегматора на системе этанол-вода не превышало 80 мм. вод. ст.

Как показали измерения концентрации паров смеси на входе и выходе из дефлегматора, его эффективность при капельном режиме не превысила 0,1.

Дефлегматор, представленный на рис. 3, был установлен в колонне для ректификации гидролизного этилового спирта под вакуумом на Красноярском биохимическом заводе.

Материал	Медь	Алюминий	Бронза	Железо	Латунь	Никель
Коэффициент теплопроводности	401	209,3	58	74,4	244	90,9

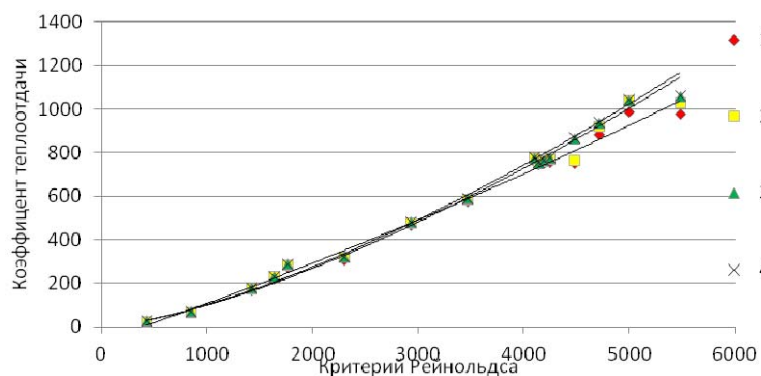


Рис. 7. Значения коэффициента теплоотдачи:

1 – никель, 2 – латунь, 3 – медь, 4 – алюминий

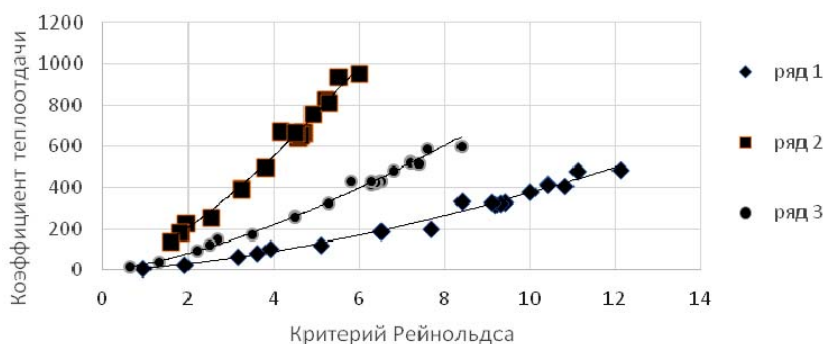


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса:

1 – гексан; 2 – этиленгликоль; 3 – глицерин

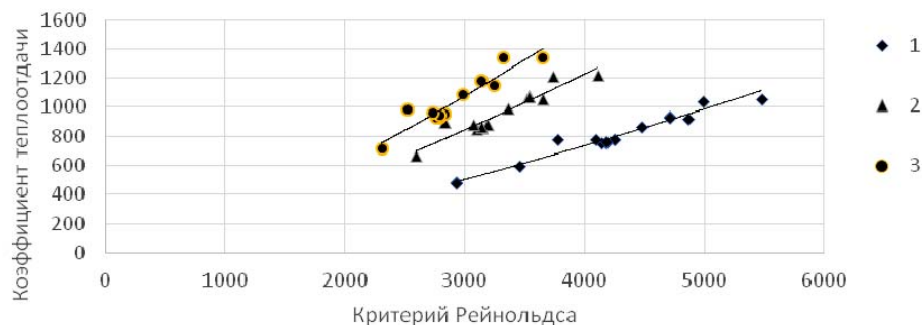


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса

изменения диаметра трубок дефлегматора:

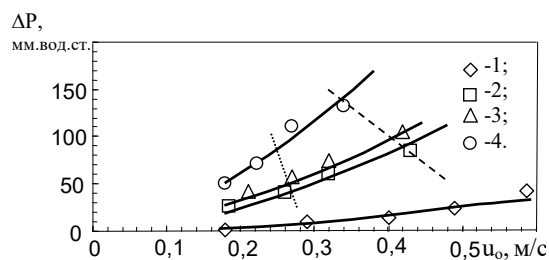
1 – $d = 8 \cdot 1$, 2 – $d = 10 \cdot 1$, 3 – $d = 12 \cdot 1,5$ 

Рис. 10. Зависимость сопротивления дефлегматора от скорости газа по сечению дефлегматора:

 $D_0 = 120$ мм; $\delta_0 = 1,5$ мм, $d = 8$ мм, количество спиралей – 5 шт, витков – 8 шт. Экспериментальные точки (1–4):1 – сухая; 2 – расход жидкости $0,012$ м³/ч; 3 – $0,014$; 4 – $0,056$. Пунктирная линия – начало захлебывания.

Линии из точек начало провального режима

При очистке технического этилового спирта ректификованного в вихревой спиртовой колонне со встроенным дефлегматором, выполненным из спиралей Архимеда, получено снижение концентрации примесей в дистилляте (альдегидов, сложных эфиров) в 1,6 раза, по сравнению с использованием традиционного дефлегматора, выполненного из кожухотрубчатого теплообменника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химических технологий. М. : Химия, 1973. 750 с.
2. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи / И. В. Доманский [и др.]. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1982. 384 с.
3. Математическое моделирование работы встроенного теплообменника в зависимости от геометрического исполнения / Е. О. Материкина [и др.] // Энергетика в современном мире. 2019. С. 131–136.
4. Математическое моделирование работы встроенного теплообменника при разных материалах исполнения / А. В. Снегирева [и др.] // Энергетика в современном мире. 2019. С. 136–140.
5. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья : дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03. Красноярск : СибГТУ, 2010.
6. Баяндина М. М., Кустов А. В. Исследование коэффициента теплопередачи встроенного теплообменника ректификационной колонны // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. 2023. С. 188–193.
7. Влияние на коэффициенты теплоотдачи материала встроенного дефлегматора / А. В. Снегирева [и др.] // Инноватика-2020. 2020. С. 57–60.
8. Влияние диаметра трубок встроенного дефлегматора на коэффициенты теплоотдачи / Е. О. Материкина [и др.] // Инноватика-2020. 2020. С. 53–56.
9. Баяндина М. М. Определение коэффициентов теплоотдачи для встроенного дефлегматора ректификационной колонны // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2023. С. 271–273.
10. Математическое моделирование работы встроенного дефлегматора / А. В. Кустов [и др.] // Решетневские чтения. 2020. С. 176–177.

11. Изучения встроенного дефлегматора в насадочной колонне [текст] / Н. А. Войнов [и др.] // Химическая промышленность сегодня. 2010. № 3. С. 52–56.

REFERENCES

1. Kasatkin A. G. Basic processes and apparatus of chemical technologies. M. : Chemistry, 1973. 750 p.
2. Machines and apparatus for chemical production: Examples and tasks / I. V. Domansky [and others]. L. : Mechanical Engineering, Leningrad. Department, 1982. 384 p.
3. Mathematical modeling of the operation of a built-in heat exchanger depending on the geometric design / E. O. Materikina [et al.] // Energy in the modern world. 2019. Pp. 131–136
4. Mathematical modeling of the operation of a built-in heat exchanger with different materials / A. V. Snegireva [et al.] // Energy in the modern world. 2019. Pp. 136–140.
5. Kustov A. V. Hydrodynamics and mass transfer in vortex distillation stages during processing of plant raw materials : dis. ... cand. tech. Sciences; 05.21.03. Krasnoyarsk : SibSTU, 2010.
6. Bayandina M. M., Kustov A. V. Study of the heat transfer coefficient of the built-in heat exchanger of a distillation column // Science and youth: problems, searches, solutions. 2023. Pp. 188–193
7. Influence on the heat transfer coefficients of the material of the built-in dephlegmator / A. V. Snegireva [et al.] // Innovatika-2020. 2020. Pp. 57–60
8. The influence of the diameter of the tubes of the built-in dephlegmator on the heat transfer coefficients. / E. O. Materikina [etc.] // Innovatika-2020. 2020. Pp. 53–56.
9. Bayandina M. M. Determination of heat transfer coefficients for the built-in reflux condenser of a distillation column // Current problems of aviation and astronautics. 2023. Pp. 271–273.
10. Mathematical modeling of the operation of the built-in reflux condenser / A. V. Kustov [et al.] // Reshetnev readings. 2020. Pp. 176–177.
11. Study of a built-in dephlegmator in a packed column [text] // N. A. Voinov [and others] // Chemical industry today. 2010. No. 3. Pp. 52–56.

© Баяндина М. М., Кустов А. В.,
Гончарова Я. С., 2024

Поступила в редакцию 01.11.2023
Принята к печати 22.01.2024

АВТОРСКАЯ ССЫЛКА

Авдеева Е. В., см. Безруких В. А.

Андропова А. А., см. Вайс А. А.

Асадов Х. Г., см. Сулейманов Т. И.

Баяндина М. М. Исследование коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи встроенного дефлегматора ректификационной колонны при переработке растительного сырья, с. 72–79

Безруких В. А. Распространение пашенного земледелия в бореальной зоне Приенисейской Сибири период ее русского освоения, с. 23–26

Вайс А. А. Таксационные особенности роста и развития насаждений березы кустарниковой в условиях Средне-Сибирского плоскогорно-таёжного района, с. 7–12

Вараксин Г. С., см. Чербаков Н. Н.

Гончарова Я. С., см. Баяндина М. М.

Коростелев А. С., см. Щерба Ю. Е.

Коротков А. А., см. Безруких В. А.

Криворотова А. И. Оптимизация процесса термической обработки лущеного шпона для изготовления фанеры с повышенными потребительскими свойствами, с. 51–63

Кузнецова О. А., см. Безруких В. А.

Кустов А. В., см. Баяндина М. М.

Лигаева Н. А., см. Безруких В. А.

Матвеева Т. А. Особенности послепожарного возобновления сосны в горных лесах Южной Сибири, с. 17–22

Орлов А. А., см. Криворотова А. И.

Плюха Н. И., см. Усольцев В. А.

Попова В. В., см. Вайс А. А.

Сиваков В. В. Цифровизация управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники, с. 64–71

Сулейманов Т. И. О возможности стабилизации усредненной величины надземной биомассы по вегетационному индексу при некоторой высоте деревьев, с. 13–16

Тахмазов Т. М., см. Сулейманов Т. И.

Титов Е. В. Влияние местоположения на рост и состояние внутривидовых гибридов кедра сибирского в Центральной лесостепи, с. 31–35

Усольцев В. А. Отношение диаметра кроны к диаметру ствола: всеобщие модели лесобразующих видов Евразии, с. 36–42

Цепордей И. С., см. Усольцев В. А.

Чербаков Н. Н. Характеристика рода *salix* и особенности фенологического развития некоторых видов в Норильском промышленном районе, с. 43–50

Шенмайер Н. А., см. Щерба Ю. Е.

Щерба Ю. Е. Оценка 37-летних полусибов плюсовых деревьев сосны кедровой сибирской по образованию микростробилов, с. 27–30

Эскин В. Д., см. Криворотова А. И.

AUTHOR'S LINK

Andronova A. A., see Vais A. A.

Asadov H. G., see Suleymanov T. I.

Avdeeva E. V., see Bezrukikh V. A.

Bayandina M. M. Investigation of the heat transmission and heat transfer coefficients of the integrated deflegmator in distillation column during the processing of raw materials, p. 72–79

Bezrukikh V. A. Development of arable agriculture in the boreal zone of the Yenisei Siberia during its russian exploration, p. 23–26

Cherbakova N. N. Characterization of the genus salix and peculiarities of phenological development of some species in the Norilsk industrial region, p. 43–50

Eskin V. D., see Krivorotova A. I.

Goncharova Ya. S., see Bayandina M. M.

Korostelev A. S., see Shcherba Iu. E.

Korotkov A. A., see Bezrukikh V. A.

Krivorotova A. I. Optimization of the process of heat treatment of cut-helled veneer for the production of plywood with increased consumer properties, p. 51–63

Kustov A. V., see Bayandina M. M.

Kuznetsova O. A., see Bezrukikh V. A.

Ligaeva N. A., see Bezrukikh V. A.

Matveeva T. A. Features of post-fire renewal of pine in the mountain forests of Southern Siberia, p. 17–22

Orlov A. A., see Krivorotova A. I.

Plyukha N. I., see Usoltsev V. A.

Popova V. V., see Vais A. A.

Shcherba Iu. E. Evaluation of 37-year-old siblings of plus trees of pinus sibirica du tour by the formation of microstrobiles, p. 27–30

Shenmayer N. A., see Shcherba Iu. E.

Sivakov V. V. Digitalisation of the management system of maintenance and repair of forestry machines, p. 64–71

Suleymanov T. I. The possibility of stabilisation of the average value of above-ground biomass by vegetation index at some tree height, p. 13–16

Takhmazov T. M., see Suleymanov T. I.

Titov E. V. Impact of location on growth and wealth of intra-specific hybrids of the siberian cedar in the central forest-steppe, p. 31–35

Tsepordey I. S., see Usoltsev V. A.

Usoltsev V. A. The ratio of crown diameter to stem diameter: generic models of forest-forming species of Eurasia, p. 36–42

Vais A. A. Taxation and forestry features of the growth and development of plantations of shrub birch under conditions of the Central Siberian plano-mountain-taiga region, p. 7–12

Varaksin G. S., see Cherbakova N. N.

