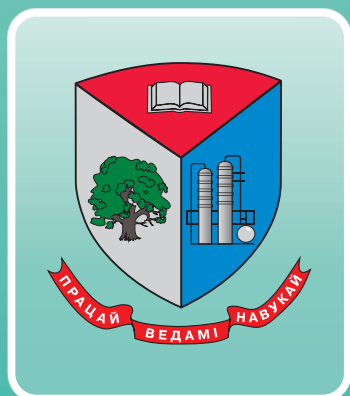


ISSN 2519-402X



ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал



Серия 1

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО,
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ПЕРЕРАБОТКА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ

№ 1 (288) 2025 год

Рубрики номера:

Управление лесами, лесоустройство
и информационные системы в лесном хозяйстве

Лесная экология и лесоводство

Лесовосстановление и лесоразведение

Лесозащита и садово-парковое строительство

Туризм и лесохотничье хозяйство

Лесопромышленный комплекс.

Транспортно-технологические вопросы

Деревообрабатывающая промышленность



Минск 2025

Учреждение образования
«Белорусский государственный
технологический университет»

ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал

Издается с июля 1993 года

Серия 1

**ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО,
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ПЕРЕРАБОТКА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ**

№ 1 (288) 2025 год

Выходит два раза в год

Минск 2025

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Главный редактор журнала – Войтов Игорь Витальевич, доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь

Редакционная коллегия журнала:

Флейшер В. Л. кандидат технических наук, доцент (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Жарский И. М., кандидат химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Флорик Е. А., кандидат биологических наук, доцент (секретарь), Республика Беларусь;
Водопьянов П. А., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор философских наук, профессор, Республика Беларусь;
Прокопчук Н. Р., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Наркевич И. И., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Новикова И. В., доктор экономических наук, профессор, Республика Беларусь;
Черная Н. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Куликович В. И., кандидат филологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Щекин А. К., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Российская Федерация;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Каухова И. Е., доктор фармацевтических наук, профессор, Российская Федерация;
Жантасов К. Т., доктор технических наук, профессор, Республика Казахстан;
Эркаев А. У., доктор технических наук, профессор, Республика Узбекистан;
Горинштейн Ш., доктор наук, профессор, Государство Израиль;
Маес Воутер, доктор наук, профессор, Королевство Бельгия.

Редакционная коллегия серии:

Черная Н. В., доктор технических наук, профессор (главный редактор серии), Республика Беларусь;
Козлов Н. Г., доктор химических наук, профессор (заместитель главного редактора серии), Республика Беларусь;
Латышев И. А., кандидат технических наук, доцент (ответственный секретарь), Республика Беларусь;
Козел А. В., кандидат сельскохозяйственных наук, доцент (секретарь), Республика Беларусь;
Каплич В. М., доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Крук Н. К., кандидат биологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Носников В. В., кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Республика Беларусь;
Цыганов А. Р., академик НАН Беларуси, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Республика Беларусь;
Усень В. В., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Республика Беларусь;
Босак В. Н., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Республика Беларусь;
Вавилов А. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Коробко Е. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Саевич К. Ф., доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Богданович Н. И., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Герц Э. Ф., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация.

Адрес редакции: ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.

Телефоны: главного редактора журнала – (+375 17) 343-94-32;

главного редактора серии – (+375 17) 374-80-46.

E-mail: root@belstu.by, <http://www.belstu.by>

Свидетельство о государственной регистрации средств массовой информации

№ 1329 от 23.04.2010, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

Журнал включен в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований»

Educational institution
“Belarusian State Technological University”

PROCEEDINGS OF BSTU

Scientific Journal

Published monthly since July 1993

Issue 1

**FORESTRY.
NATURE MANAGEMENT.
PROCESSING OF RENEWABLE
RESOURCES**

No. 1 (288) 2025

Published biannually

Minsk 2025

Publisher – educational institution “Belarusian State Technological University”

Editor-in-chief – Voitau Ihar Vital’evich, DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus

Editorial (Journal):

Fleisher V. L., PhD (Engineering), Associate Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;

Zharskiy I. M., PhD (Chemistry), Professor, Republic of Belarus;

Flyurik E. A., PhD (Biology), Associate Professor (secretary), Republic of Belarus;

Vodop’yanov P. A., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Philosophy), Professor, Republic of Belarus;

Prokopchuk N. R., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Republic of Belarus;

Narkevich I. I., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;

Novikova I. V., DSc (Economics), Professor, Republic of Belarus;

Chernaya N. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;

Kulikovich V. I., PhD (Philology), Associate Professor, Republic of Belarus;

Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;

Shchekin A. K., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Russian Federation;

Bashkirov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;

Kaukhova I. E., DSc (Pharmaceutics), Professor, Russian Federation;

Zhantasov K. T., DSc (Engineering), Professor, Republic of Kazakhstan;

Erkayev A. U., DSc (Engineering), Professor, Republic of Uzbekistan;

Gorinshteyn Sh., DSc, Professor, State of Israel;

Maes Wouter, DSc, Professor, Kingdom of Belgium.

Editorial (Issue):

Chernaya N. V., DSc (Engineering), Professor (managing editor), Republic of Belarus;

Kozlov N. G., DSc (Chemistry), Professor (sub-editor), Republic of Belarus;

Latyshevich I. A., PhD (Engineering), Associate Professor (executive editor), Republic of Belarus;

Kozel A. V., PhD (Agriculture), Associate Professor (secretary), Republic of Belarus;

Kaplich V. M., DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;

Kruk N. K., PhD (Biology), Associate Professor, Republic of Belarus;

Nosnikov V. V., PhD (Agriculture), Associate Professor, Republic of Belarus;

Tsyganov A. R., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Agriculture), Professor, Republic of Belarus;

Usenya V. V., DSc (Agriculture), Professor, Republic of Belarus;

Bosak V. N., DSc (Agriculture), Professor, Republic of Belarus;

Vavilov A. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;

Korobko E. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;

Saevich K. F., DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;

Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;

Bashkirov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;

Bogdanovich N. I., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;

Gerts E. F., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation.

Contact: 13a Sverdlova str., 220006, Minsk.

Telephones: editor-in-chief (+375 17) 343-94-32;

managing editor (+375 17) 374-80-46.

E-mail: root@belstu.by, <http://www.belstu.by>

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY

УДК 630*431

А. А. Пушкин, В. В. Коцан, И. В. Толкач, Н. Я. Сидельник, П. В. Севрук
Белорусский государственный технологический университет

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье описан алгоритм моделирования низовых лесных пожаров, который является основой методических рекомендаций по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий. Алгоритм разработан на основании материалов о местах фактических возгораний, обследованных в натуре. Детальная характеристика лесных пожаров, произошедших в лесном фонде Республики Беларусь за период 2018–2022 гг. собрана в базу данных. Разработанный алгоритм моделирования состоит из трех этапов: определение влажности горючих материалов на основании фактических метеорологических условий, установление скорости лесного пожара в зависимости от пирологической характеристики горючих материалов и метеоусловий, определение параметров и построение эллиптической модели распространения лесного пожара. В основании представленного алгоритма лежит принцип Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров с доработками авторов статьи и адаптацией к условиям Республики Беларусь. На основании методических рекомендаций разработан программный комплекс, который моделирует графическое представление развития лесного пожара на геопространственной основе. Дальнейшее совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах, позволит повысить точность пространственно-временного моделирования возможного развития лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар, математическая модель, метеорологические показатели, индекс влажности горючих материалов, лесоводственно-таксационные показатели, эллиптическая модель, программный комплекс.

Для цитирования: Пушкин А. А., Коцан В. В., Толкач И. В., Сидельник Н. Я., Севрук П. В. Методика прогноза развития лесных пожаров на основе геоинформационных систем // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 5–14.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-1.

A. A. Pushkin, V. V. Kotsan, I. V. Tolkach, N. Ya. Sidelnik, P. V. Sevruck
Belarusian State Technological University

THE METHODOLOGY FOR FORECASTING THE PROGRESSION OF FOREST FIRES BASED ON GEOINFORMATION SYSTEMS

The algorithm for modeling low forest fires, which is the basis of the methodological recommendations for forecasting the progression of forest fires, taking into account data on the state of forest areas and meteorological conditions are describes in this article. The algorithm was developed on the basis of materials on the locations of the real ignitions, examined in nature. The detailed description of the forest fires that occurred in the forest fund of the Republic of Belarus for the period 2018–2022 has been collected into the database. The developed modeling algorithm consists of three stages: determination of the

moisture fuel based on factual meteorological conditions, determination of the speed of the forest fire depending on the pyrological characteristics of the fuel and weather conditions, and determination of parameters and parameters of the elliptical model of the forest fire spread. The presented algorithm is based on the principle of the Canadian forecast model of forest fire dynamics with modifications by the authors of the article and adaptation to the conditions of the Republic of Belarus. Based on the methodological recommendations, the software package has been developed that simulates a graphical representation of the progression of the forest fire on the geospatial basis. Further improvement of computational algorithms, taking into account subsequent updates of the database, which includes new information about fires occurring in the forest fund, will increase the accuracy of the spatial-temporal modeling of the possible progression of forest fires.

Keywords: forest fire, mathematical model, meteorological indicators, fuel moisture index, forestry-taxation stands characteristics, elliptical model, software package.

For citation: Pushkin A. A., Kotsan V. V., Tolkach I. V., Sidelnik N. Ya., Sevruck P. V. The methodology for forecasting the progression of forest fires based on geoinformation systems. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 5–14 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-1.

Введение. Лесные пожары из года в год остаются актуальной проблемой не только в Беларуси, но и за ее пределами. Существует ряд причин, по которым они возникают, начиная с выжигания сухой растительности ранней весной и заканчивая умышленными поджогами. Аномально жаркая погода в последние годы только усугубляет сложившуюся ситуацию [1, 2]. По состоянию на 17 сентября за 2024 г. произошло 363 лесных пожара общей площадью 260 га, средняя площадь возгорания составила 0,72 га [3]. Поэтому вопрос прогнозирования распространения лесного пожара остается актуальным.

В существующей на территории нашей страны пожароопасной ситуации в дополнение к быстрому обнаружению лесного пожара еще одним эффективным инструментом по минимизации ущерба является быстрый прогноз динамики пожара для оперативного принятия мер по его ликвидации на основании существующих погодных и лесоводственно-таксационных показателей насаждений.

Прогноз динамики развития лесного пожара строится на основании математического моделирования и является сложным процессом. На процесс горения влияют погодные условия в момент возгорания и погода предшествующего периода, а также пирологическая характеристика лесного насаждения.

Конечной целью исследований является разработка программного комплекса «Моделирование лесного пожара», который должен решать следующие задачи: расчет характеристик лесного пожара, динамики его развития и графическое представление модели развития лесного пожара на геопространственной основе в границах Республики Беларусь. Определение координат возгораний на территории лесного фонда происходит на основе зарегистрированных температурных аномалий, данных видеонаблюдения и авиапатрулирования. Расположение и размеры лесного

пожара должны моделироваться в зависимости от лесоводственно-таксационных характеристик лесных насаждений, определяемых по данным лесоустройства, и метеорологических показателей ближайшей к зарегистрированному возгоранию метеостанции. Для этих целей были разработаны методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий.

Основная часть. Общая схема моделирования. На предыдущих этапах исследований была собрана информация о пожарах, произошедших в лесном фонде. Их характеристика, состоящая из следующих информационных компонентов: метеорологические, лесоводственно-таксационные и общие данные о лесном пожаре, была занесена в разработанную базу данных [4]. На основании этих материалов были разработаны методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий [5]. Данные методические рекомендации легли в основу разработки программного комплекса «Моделирование лесного пожара», который планируется использовать в Республиканском центре управления и реагирования на чрезвычайные ситуации с целью прогнозирования развития лесных пожаров.

В данной статье представлен алгоритм расчета показателей, необходимых для моделирования развития контура лесного пожара на основе лесоводственно-таксационной характеристики выдела [6–8], в котором возникло возгорание, и метеорологических данных [9, 10] в момент его возникновения. На основании этих значений рассчитывается максимальная скорость продвижения фронта пожара и определяются параметры его контура и положение в двумерном пространстве. Общая схема прогнозирования развития лесного пожара представлена на рис. 1.

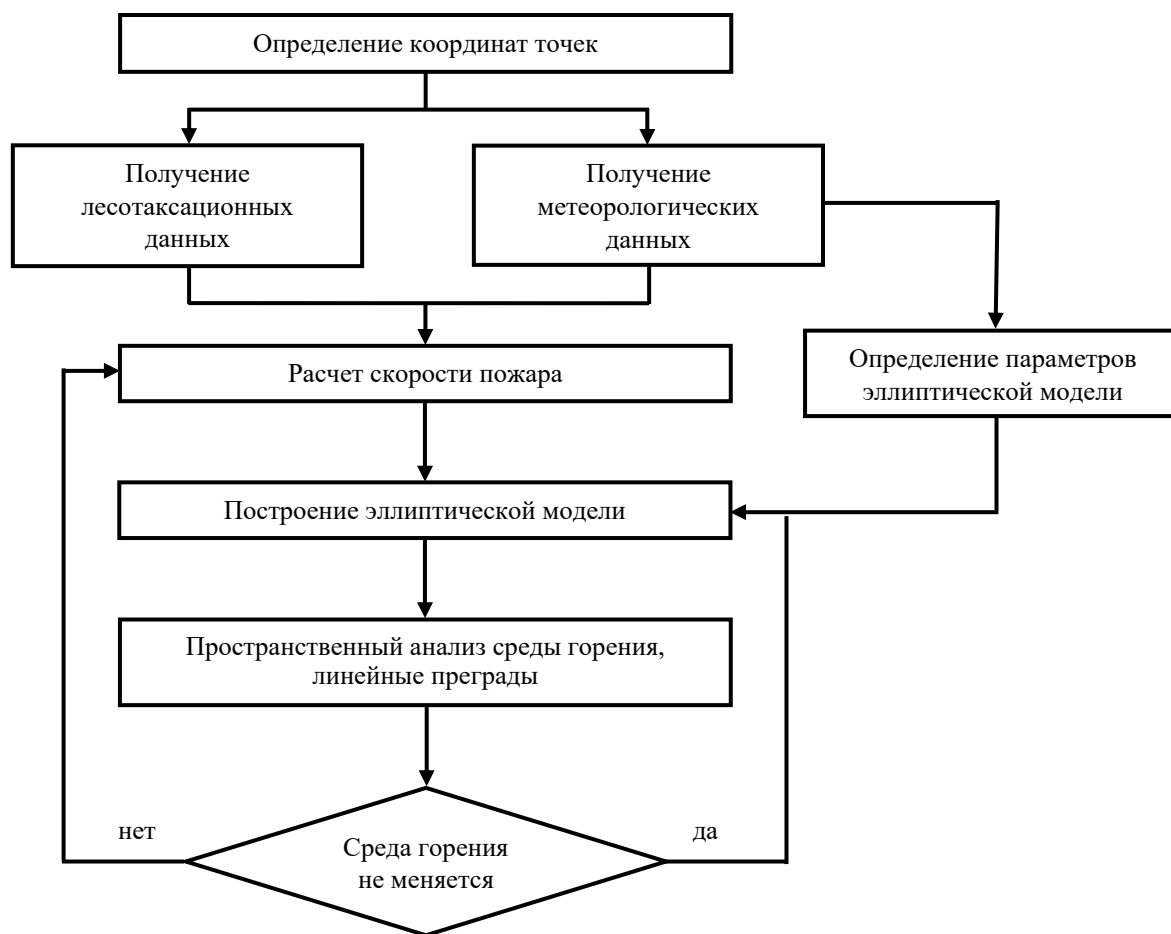


Рис. 1. Схема моделирования развития лесного пожара

С использованием векторного слоя таксационных выделов на основе координат точки возгорания [11, 12] определяется лесоводственно-таксационная характеристика насаждения в выделе, затронутом пожаром. Также учитывается характеристика соседних выделов в радиусе 56 м. Данное расстояние соответствует радиусу круга площадью 1 га (средняя площадь лесных пожаров за последние годы).

На первом временном промежутке моделирования используется таксационная характеристика выдела, в котором он обнаружен.

После определения контура пожара через заданный промежуток времени (30 мин) проводится пространственный анализ для определения соседних выделов, которые могут быть затронуты возникшим лесным пожаром. На втором временном промежутке моделирования для каждого узла эллипса используется таксационная характеристика выдела, в котором он находится. Таким образом, после каждого последующего этапа моделирования проводится пространственный анализ и определяются выделы, таксационная характеристика которых используется для расчета скорости фронта пожара. Также каждые 30 мин проводится анализ метеорологических показателей, влияющих на скорость и форму лесных пожаров. На протяжении каждого временного

промежутка моделирования принимается, что скорость и направление ветра постоянны, а огонь распространяется через один вид горючих материалов и не подвержен действиям по тушению.

Для целей моделирования распространения лесного пожара используется эллиптическая модель его развития, которая позволяет определить его размер и положение на основе дальности распространения пожара и скорости ветра [13, 14].

В основании представленного алгоритма лежит принцип Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров [15, 16] с доработками авторов статьи и адаптацией к условиям Республики Беларусь.

Методика определения индекса влажности горючих материалов. На основании анализа литературных источников [17, 18] и собранных полевых данных было определено, что самое большое влияние на скорость распространения лесного пожара оказывает влажность горючих материалов, находящихся в лесных насаждениях.

Индекс влажности горючих материалов (FFMC) представляет влажность подстилки и других видов горючих материалов и оценивает его воспламеняемость в полдень каждого дня. Методика расчета данного показателя представлена уравнениями (1)–(13).

Для определения индекса влажности горючих материалов на текущий день необходимо знать его значение на предыдущий день (первоначально после схода снежного покрова для него устанавливается значение 85). На основании значения индекса влажности горючих материалов в предыдущий день определяется содержание в нем влаги в этот день:

$$m_{t-1} = 147,2 \cdot \frac{101 - \text{FFMC}_{t-1}}{59,5 + \text{FFMC}_{t-1}}, \quad (1)$$

где m_{t-1} – влажность горючих материалов в предыдущий день; FFMC_{t-1} – индекс влажности горючих материалов в предыдущий день.

В случае дождя (количество осадков больше 0,5 мм) содержание влаги в горючих материалах в текущий день рассчитывается по формуле (2):

$$m_t = m_{t-1} + 42,5 \cdot P_f \cdot \left(\frac{-100}{e^{251-m_{t-1}}} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{-6,93}{P_f}} \right),$$

если $m_{t-1} \leq 150$;

$$m_t = m_{t-1} + 42,5 \cdot P_f \cdot \left(\frac{-100}{e^{251-m_{t-1}}} \right) \times$$

$$\times \left(1 - e^{\frac{-6,93}{P_f}} \right) + 0,0015 \cdot (m_{t-1} - 150)^2 \cdot P_f^{0,5},$$

если $m_{t-1} > 150$,

где m_t – влажность горючих материалов в текущий день; P_f – эффективное количество осадков, мм, которое рассчитывается по уравнению (3):

$$P_f = P - 0,5, \quad (3)$$

где P – количество осадков на открытом воздухе, измеренное 1 раз в полдень, мм. В случае если $m_t > 250$, то оно приравнивается к 250.

Если за прошедшие сутки осадков не наблюдалось, содержание влаги E_d в горючих материалах рассчитывается по уравнению (4):

$$E_d = 0,942 \cdot H_{12}^{0,679} + 11 \cdot e^{\frac{H_{12}-100}{10}} +$$

$$+ 0,18 \cdot (21,1 - T_{12}) \cdot (1 - e^{-0,115 \cdot H_{12}}), \quad (4)$$

где H_{12} – относительная влажность воздуха в полдень, %; T_{12} – температура воздуха в полдень, °C.

Если E_d меньше, чем m_{t-1} , то скорость изменения влажности горючих материалов (k_d) нужно рассчитывать по уравнениям (5) и (6):

$$k_0 = 0,424 \cdot \left(1 - \left(\frac{H_{12}}{100} \right)^{1,7} \right) + 0,0694 \times$$

$$\times U_{12}^{0,5} \cdot \left(1 - \left(\frac{H_{12}}{100} \right)^8 \right); \quad (5)$$

$$k_d = k_0 \cdot 0,581 \cdot e^{0,0365 \cdot T_{12}}, \quad (6)$$

где k_0 – начальная скорость изменения влажности горючих материалов; U_{12} – скорость ветра в полдень, км/ч.

Тогда содержание влаги в горючих материалах рассчитывается по уравнению (7):

$$m_t = E_d + (m_{t-1} - E_d) \cdot 10^{-k_d}. \quad (7)$$

Если E_d больше, чем m_{t-1} , то необходимо рассчитать равновесную влажность мелкодисперсных горючих материалов (E_w) по уравнению (8):

$$E_w = 0,618 \cdot H_{12}^{0,753} + 11 \cdot e^{\frac{H_{12}-100}{10}} +$$

$$+ 0,18 \cdot (21,1 - T_{12}) \cdot (1 - e^{-0,115 \cdot H_{12}}). \quad (8)$$

Если E_w больше, чем m_{t-1} , то скорость изменения влажности горючих материалов рассчитывается по уравнениям (9) и (10):

$$k_0 = 0,424 \cdot \left(1 - \left(\frac{100 - H_{12}}{100} \right)^{1,7} \right) +$$

$$+ 0,0694 \cdot U_{12}^{0,5} \cdot \left(1 - \left(\frac{100 - H_{12}}{100} \right)^8 \right); \quad (9)$$

$$k_d = k_0 \cdot 0,581 \cdot e^{0,0365 \cdot T_{12}}. \quad (10)$$

Содержание влаги в горючих материалах в данном случае определяется по уравнениям (11) и (12):

$$m_t = E_d - (E_d - m_{t-1}) \cdot 10^{-k_d}; \quad (11)$$

$$\text{если } E_d \leq m_{t-1} \leq E_d, \text{ то } m_t = m_{t-1}. \quad (12)$$

После расчета влажности горючих материалов вычисляется индекс влажности горючих материалов для текущего дня по уравнению (13):

$$\text{FFMC}_t = 59,5 \cdot \frac{250 - m_t}{147,2 + m_t}. \quad (13)$$

В дальнейшем на основе значения индекса FFMC рассчитывается функция влажности горючих материалов $f(F)$ по формулам (14) и (15):

$$f(F) = 91,9 \cdot e^{-0,1386 \cdot m_t} \cdot \left[1 + \frac{m_t^{5,31}}{4,93 + 10^7} \right]; \quad (14)$$

$$m_t = \frac{147,2 \cdot (101 - \text{FFMC}_t)}{59,5 + \text{FFMC}_t}. \quad (15)$$

Помимо влажности горючих материалов на скорость распространения пожара значительное влияние оказывает ветер. В этой связи

рассчитывается значение функции влияния ветра $f(W)$ по формулам (16) и (17):

$$f(W) = e^{0,05039 \cdot WS},$$

если $WS \leq 40$ км/ч; (16)

$$f(W) = 12 \cdot \left[1 - e^{-0,0818 \cdot (WS - 28)} \right],$$

если $WS > 40$ км/ч, (17)

где WS – скорость ветра, км/ч.

С использованием значений, полученных из функций (14), (16), (17), определяется начальный индекс распространения пожара ISI на основании уравнения (18):

$$ISI = 0,208 \cdot f(W) \cdot f(F). \quad (18)$$

На основании известного значения начального индекса распространения пожара определяется скорость его распространения.

Методика определения скорости лесного пожара. Одним из основных показателей в процессе моделирования лесного пожара является его скорость. При анализе фактических возгораний было определено, что покрытые и не покрытые лесом площади имеют различные механизмы протекания пожара, поэтому ниже описаны две методики для расчета скорости распространения лесного пожара.

Покрытые лесом площади представлены насаждениями естественного происхождения и лесными культурами хвойных и лиственных древесных пород.

Для расчета скорости распространения фронта пожара на покрытых лесом площадях используются данные, полученные при проведении анализа сформированного ранее массива характеристик лесных пожаров [4]:

$$ROS_{eq} = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot ISI} \right)^c, \quad (19)$$

где ROS_{eq} – максимальная скорость распространения пожара, м/мин; ISI – начальный индекс распространения пожара; a , b , c – свободные члены модели, которые зависят от типа горючих материалов и сезона.

Для условий Республики Беларусь авторами были рассчитаны значения свободных членов модели для различных видов горючих материалов и сезонов года.

Поскольку скорость распространения лесного пожара различается в зависимости от вида лесных земель и растительности, то ее моделирование осуществляется по следующим расчетным группам:

- сосновые молодняки весной и осенью (возраст <20 лет);
- сосновые молодняки летом (возраст <20 лет);
- сосновые насаждения весной и осенью (возраст ≥ 20 лет);

- сосновые насаждения летом (возраст ≥ 20 лет);
- еловые насаждения весной и осенью;
- еловые насаждения летом;
- лиственные насаждения весной и осенью;
- лиственные насаждения летом.

Максимальная скорость, получаемая из уравнения (19), является максимально возможной скоростью распространения кромки пожара в данных условиях. Во время проведения сбора данных о реальных возгораниях в лесном фонде для каждого обследованного лесного пожара было рассчитано значение максимально возможной скорости по алгоритму, описанному в предыдущих публикациях [4]. Определение рассчитанных значений свободных членов модели проводилось на основании данного показателя.

В смешанных насаждениях, где в состав древостоя входят хвойные и лиственные породы, расчет скорости производится по формуле (20):

$$ROS_{eq} = \left(\frac{PC}{100} \cdot ROS_C \right) + \left(\frac{PH}{100} \cdot ROS_H \right), \quad (20)$$

где ROS_{eq} – максимальная скорость пожара, м/мин; PC – коэффициент участия в составе хвойных; ROS_C – максимальная скорость распространения пожара в хвойных древостоях, м/мин; PH – доля в составе лиственных; ROS_H – максимальная скорость распространения пожара в лиственных древостоях, м/мин.

Не покрытые лесом и нелесные площади, на которых моделируется распространение пожара, представлены следующими видами земель: вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота. Перечисленные виды земель лесного фонда несколько различаются по количеству и характеристикам лесных горючих материалов, однако для целей моделирования распространения лесного пожара, упрощения алгоритмизации вычислительного процесса они обобщаются в одну группу с усредненными пирологическими характеристиками.

На основании известного значения начального индекса распространения пожара ISI определяется скорость распространения низового пожара на не покрытых лесом и нелесных площадях по формуле (21):

$$ROS_{eq} = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot ISI} \right)^c \cdot CF, \quad (21)$$

где CF – коэффициент высыхания травянистой растительности.

Свободные члены модели a , b , c для не покрытых лесом и нелесных площадей рассчитаны для условий Беларуси по следующим расчетным группам:

- не покрытые лесом земли (вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) весной и осенью;

– не покрытые лесом земли (вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) летом.

Коэффициент высыхания травянистой растительности определяется по формуле (22):

$$CF = 0,02 \cdot C - 1, \text{ если } C > 50\%;$$

$$CF = 0, \text{ если } C \leq 50\%, \quad (22)$$

где C – степень высыхания травянисто-кустарниковой растительности, %.

Для автоматического определения степени высыхания травянисто-кустарниковой растительности используются ежедневные значения индекса NDVI, который устанавливается по материалам космической съемки. Если значение $NDVI > 0,3$, то $C = 50\%$, если $NDVI < 0$, то $C = 100\%$, если $0 < NDVI < 0,3$, то C определяется по формуле (23):

$$C = -166,6665 \cdot NDVI + 100. \quad (23)$$

Рассчитанная таким образом скорость используется при построении эллиптической модели распространения пожара на следующих этапах моделирования.

Методика определения параметров эллиптической модели лесного пожара. Общая форма лесного пожара, возникающего из единственного источника возгорания, главным образом зависит от скорости и направления ветра. При условии, что направление ветра относительно постоянно, пожары обычно принимают примерно эллиптическую форму. Фундаментальным свойством пожара эллиптической формы является отношение длинной оси эллипса к короткой. Данное отношение определяет форму эллипса, которая может быть, как сильно вытянутой вдоль длинной оси, так и почти круглой. С целью определения данного

отношения используются элементы Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System) [9], а именно уравнение (24):

$$LB = 1,0 + 8,729 \cdot (1 - e^{-0,030 \cdot WS})^{2,155}, \quad (24)$$

где LB – отношение длинной оси эллипса к короткой.

При скорости ветра, равной нулю, в однородной среде пожар распространяется равномерно во все стороны от исходной точки возгорания, и соотношение его осей равно 1. В этом случае контур пожара будет иметь форму круга (рис. 2).

При наличии ветра пожар будет более интенсивно распространяться по его направлению, т. е. вытягиваться по направлению ветра. Распространение по флангам будет менее интенсивным, а в тыл крайне малым. На основании этого в разработанных рекомендациях движением пожара против ветра в тыл пренебрегли. Чем выше скорость ветра, тем соотношение осей пожара больше, поскольку ветер затрудняет распространение огня назад и в стороны, а направляет его вперед. В результате контур пожара приобретает форму эллипса (рис. 3).

Для построения эллипса распространения лесного пожара необходимо знать точку очага возгорания, протяженность короткой и длинной осей эллипса.

Для получения графического представления модели развития лесного пожара на геопространственной основе в границах Республики Беларусь проводятся следующие операции. По координатам точки обнаруженного или предполагаемого возгорания определяется таксационный выдел, на территорию которого попадает данная точка.

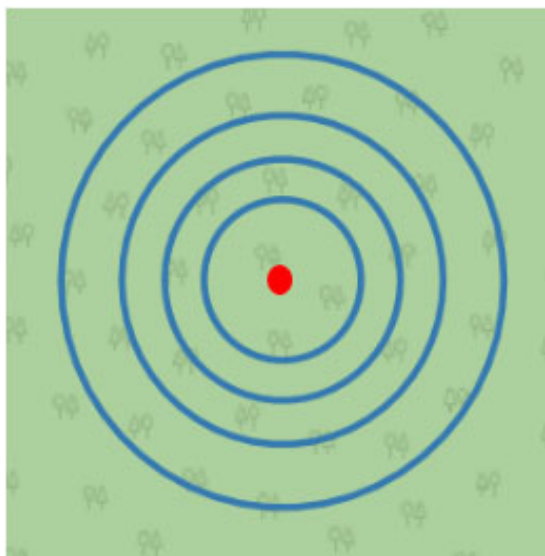


Рис. 2. Распространение лесного пожара с течением времени в однородной среде при отсутствии ветра

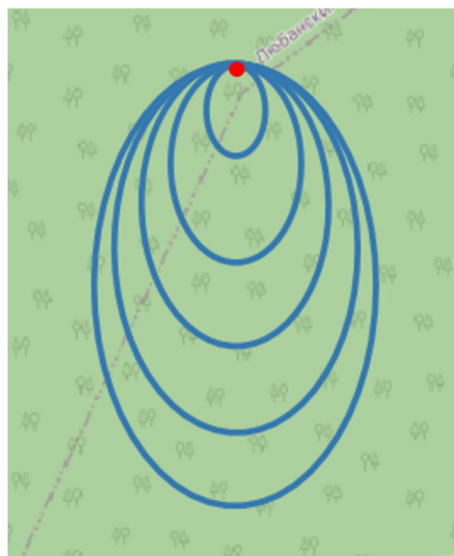


Рис. 3. Распространение лесного пожара с течением времени в однородной среде при наличии ветра

С учетом метеорологических данных на момент обнаружения пожара и лесоводственно-таксационных данных выдела рассчитывается максимальная скорость распространения фронта низового лесного пожара.

На основании полученной максимальной скорости распространения фронта пожара определяется положение и размеры эллиптической модели распространения лесного пожара.

Для правильного размещения эллипса в пространстве используется информация о направлении ветра (румб стороны света, с которого дует ветер), на основании которой определяется направление распространения фронта пожара в виде азимута от точки возгорания. В этом направлении будет располагаться длинная ось эллипса.

Для построения контура лесного пожара в форме эллипса необходимо определить значения его длинной и короткой осей.

На основании рассчитанной максимальной скорости в определенный момент времени и период прогноза по формуле (25) вычисляется расстояние, пройденное фронтом пожара по направлению ветра:

$$l_i = t \cdot ROS_{eq\ i}, \quad (25)$$

где l_i – расстояние, пройденное фронтом пожара по направлению ветра, м; t – период времени прогноза, с; $ROS_{eq\ i}$ – максимальная скорость в определенный момент времени, м/с.

Процесс моделирования развития лесного пожара представляет собой итерационную процедуру, при которой через заданные промежутки времени (30 мин) определяются параметры эллиптической модели: на первом этапе моделирования производится прогноз распространения лесного пожара за первые 30 мин; на втором и последующих этапах (через каждые 30 мин) рассчитывается расстояние, пройденное пожаром с учетом лесотаксационной характеристики затронутых выделов и метеорологической обстановки. Для построения контура лесного пожара на втором и последующих этапах в каждом узле эллипса, построенного на предыдущем этапе, на основании скорости, рассчитанной в данном узле, строится новый эллипс. Его длинная ось располагается по направлению ветра. Для определения длины короткой оси эллипса (формула (26)) первоначально рассчитывается соотношение длин осей эллипса по уравнению (24):

$$b = \frac{a}{LB}. \quad (26)$$

В процессе итерационной процедуры построения эллиптической модели развития лесного пожара направление ветра может изменяться. В этом случае при изменении направления ветра в каждом узле контура лесного пожара на данный

момент строится эллипс параллельно направлению ветра. Контур пожара на следующий временной период определяется путем соединения крайних точек эллипсов (рис. 4).

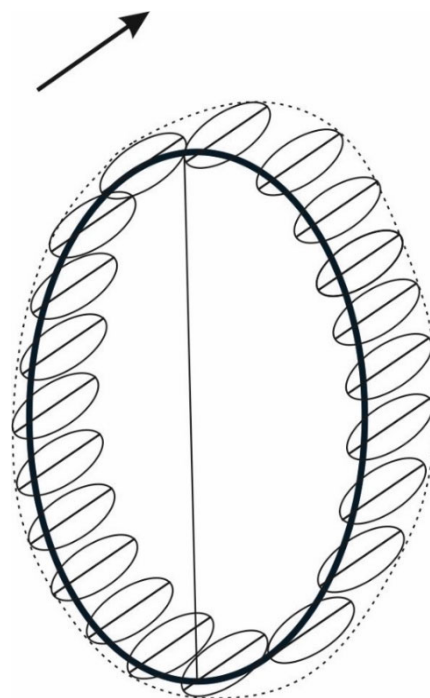


Рис. 4. Моделирование контура пожара при изменении направления ветра

Представленный подход позволяет проводить прогнозирование распространения лесного пожара в древостоях с различными таксационными показателями и при различных метеорологических условиях.

Для уточнения границ распространения пожара с учетом преград после построения эллипса на определенный момент времени выполняется его оверлейный анализ относительно картографического слоя естественных и искусственных преград: квартальные просеки шириной более 4 м, дороги шириной более 4 м, реки, ручьи, каналы, противопожарные разрывы, минерализованные полосы.

В случае наложения эллиптической модели на векторный картографический слой преград построенный эллипс развития лесного пожара должен быть обрезан по границе этой преграды. Таким образом, в результате моделирования рассчитываются расстояния, прошедшие лесным пожаром до фронта и флангов с учетом размещения естественных и искусственных преград распространения пожара. Это позволяет определить прогнозные границы лесного пожара на необходимый момент времени, узнать его прогнозную площадь, что даст возможность более объективно оценить уровень угрозы и необходимый объем ресурсов для его ликвидации.

Заключение. На данном этапе исследований разработаны методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий, на основании которых разработан программный комплекс «Моделирование лесного пожара». Моделирование проводится по разработанному алгоритму с использованием лесоводственно-таксационных и метеорологических показателей. Программный комплекс, созданный на основании алгоритма, рассчитывает скорость распространения лесного пожара и строит графическое представление модели развития лесного пожара на геопрограммной основе.

В ходе проведенных проверок программного комплекса было установлено, что результаты моделирования отображают влияние изменения направления ветра и скорости распространения пожара в зависимости от вида лесных земель и растительности по десяти расчетным группам в соответствии с методическими рекомендациями. Дальнейшее совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах, позволит повысить точность пространственно-временного моделирования возможного развития лесных пожаров.

Список литературы

1. Совершенствование мероприятий по противопожарному обустройству лесного фонда Республики Беларусь / В. В. Усеня [и др.] // Вестник Института инженеров управления МЧС Республики Беларусь. 2007. № 5 (1). С. 40–46.
2. Александр Драгун – о готовности лесхозов к пожароопасному сезону и роли населения в предотвращении лесных пожаров // М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://www.mlh.gov.by/news/9997/> (дата обращения: 13.09.2024).
3. Работа не прекращалась даже ночью. За прошедшие сутки гослесохрана тушила 12 возгораний в лесном фонде // Telegram. URL: <https://web.telegram.org/a/#-1001262331203> (дата обращения: 12.10.2024).
4. База данных характеристик лесных пожаров / А. А. Пушкин [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 5–14. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-1.
5. Методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий. Минск: БГТУ, 2023. 12 с.
6. Технические указания по заполнению карточек таксации при таксации леса. Минск: Белгослес, 2019. 125 с.
7. Справочник таксатора / В. С. Мирошников [и др.]. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.
8. Юркевич И. Д., Гельтман В. С. География, типология и районирование лесной растительности Беларуси. Минск: Наука и техника, 1965. 288 с.
9. Погода в 243 странах мира // Расписание Погоды. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 18.08.2024).
10. Леонович И. И. Метеорологические станции Республики Беларусь. Минск: БНТУ, 2013. 137 с.
11. Meteoeye. URL: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (дата обращения: 12.09.2024).
12. Сервис «Карта пожаров». URL: <https://fires.ru/> (дата обращения: 15.09.2024).
13. Рихтер И. Э. Лесная пирология с основами радиоэкологии: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 1996. 290 с.
14. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
15. Background Information. URL: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi?wbdisable=true#:~:text=The%20Fine%20Fuel%20Moisture%20Code,the%20flammability%20of%20fine%20fuel> (дата обращения: 13.09.2024).
16. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3. Ottawa: Canadian Department of Forestry, 1992. 63 p.
17. Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений / С. А. Хвостиков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 91–98.
18. Численные методы / В. М. Заварыкин [и др.]. М.: Просвещение, 1990. 176 с.

References

1. Usenya V. V., Lasuta G. F., Kasperov G. I. Goman P. N. Improving measures for fire prevention in the forest fund of the Republic of Belarus. *Vestnik Instituta inzhenerov upravleniya MCHS Respubliki Belarus*

[Bulletin of the Institute of Management Engineers of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus], 2007, no. 5 (1), pp. 40–46 (In Russian).

2. Alexander Dragun – on the readiness of forestry enterprises for the fire season and the role of the population in preventing forest fires. Available at: <https://www.mlh.gov.by/news/9997/> (accessed 13.09.2024) (In Russian).

3. The work did not stop even at night. Over the past day, the state forest service extinguished 12 fires in the forest fund. URL: <https://web.telegram.org/a/#-1001262331203> (accessed 12.10.2024) (In Russian).

4. Pushkin A. A., Kotsan V. V., Mashkovsky V. P., Sidelnik N. Ya., Sevruck P. V. The database of the forest fire characteristics. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2024, no. 1 (276), pp. 5–14. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-1 (In Russian).

5. *Metodicheskiye rekomendatsii po prognozirovaniyu razvitiya lesnykh pozharov s uchetom dannykh o sostoyanii lesov i meteorologicheskikh usloviy* [Methodological recommendations for forecasting the development of forest fires, taking into account data on the state of forests and meteorological conditions]. Minsk, BSTU Publ., 2023. 12 p. (In Russian).

6. *Tekhnicheskkiye ukazaniya po zapolneniyu kartochek taksatsii pri taksatsii lesa* [Technical instructions for filling out taxation cards for forest taxation]. Minsk, Belgosles Publ., 2019. 125 p. (In Russian).

7. Miroshnikov V. S., Trull O. A., Ermakov V. E., Dolsky L. V., Kostenko A. G. *Spravochnik taksatora* [Taxi driver's directory]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p. (In Russian).

8. Yurkevich I. D., Gel'tman V. S. *Geografiya, tipologiya i rayonirovaniye lesnoy rastitel'nosti Belarusi* [Geography, typology and zoning of forest vegetation in Belarus]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1965. 288 p. (In Russian).

9. Weather in 243 countries. Available at: <https://rp5.ru> (accessed 18.08.2024) (In Russian).

10. Leonovich I. I. *Meteorologicheskkiye stantsii Respubliki Belarus'* [Meteorological stations of the Republic of Belarus]. Minsk, BNTU Publ., 2013. 137 p. (In Russian).

11. Meteoeye. Available at: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (accessed 12.09.2024) (In Russian).

12. Fire Map service. Available at: <https://fires.ru/> (accessed 15.09.2024) (In Russian).

13. Rihter I. E. *Lesnaya pirologiya s osnovami radioekologii* [Forest pyrology with basics of radioecology]. Minsk, BGTU Publ., 1996. 290 p. (In Russian).

14. Grishin A. M. *Matematicheskoye modelirovaniye lesnykh pozharov i novyye sposoby bor'by s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new ways to combat them]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 404 p. (In Russian).

15. Background Information. Available at: <https://cwffis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi?wbdisable=true#:~:text=The%20Fine%20Fuel%20Moisture%20Code,the%20flammability%20of%20fine%20fuel> (accessed 13.09.2024).

16. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3. Ottawa: Canadian Department of Forestry, 1992. 63 p.

17. Khvostikov S. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Lupyan E. A. Regional optimization of parameters of the forecast model of natural fires and operational modeling of the dynamics of their development using satellite observation data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, vol. 9, no. 3, pp. 91–98. (In Russian).

18. Zavarykin V. M., Zhitomirsky V. G., Lapchik M. P. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1990. 176 p. (In Russian).

Информация об авторах

Пушкин Андрей Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pushkin@belstu.by

Коцан Владимир Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: Wolodia250@belstu.by

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Сидельник Николай Ярославович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sidelnik@belstu.by

Севрук Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sevrupkv@belstu.by

Information about the authors

Pushkin Andrey Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pushkin@belstu.by

Kotsan Vladimir Vasil'evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Wolodia250@belstu.by

Tolkach Igor Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Sidelnik Nikolai Yaroslavovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sidelnik@belstu.by

Sevruk Pavel Vladimirovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sevrupkv@belstu.by

Поступила 15.10.2024

УДК 630*566

И. В. Толкач¹, А. В. Таркан², В. В. Коцан¹, А. А. Пушкин¹, С. С. Цай¹¹Белорусский государственный технологический университет²Лесоустроительное республиканское унитарное предприятие «Белгослес»**ТАБЛИЦЫ ДИНАМИКИ СРЕДНИХ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЧИСТЫХ МОДАЛЬНЫХ СОСНЯКОВ БЕЛАРУСИ**

В публикации дан краткий анализ современных трендов развития лесного хозяйства в области цифровизации, описаны возможности использования повыведельного банка данных для анализа состояния лесного фонда. Рассмотрены методы составления таблиц, отражающих ход роста и возрастную динамику таксационных показателей древостоев, группировки опытных данных по принадлежности древостоев одному естественному ряду роста и развития. Особо выделен метод составления таблиц динамики таксационных показателей модальных древостоев, предложенный академиком Анучиным Н. П. В основу метода положена статистическая обработка массовых производственных данных – материалов таксации насаждений при проведении лесоустройства. Кратко описаны методика и программное обеспечение, использованные для формирования таблиц, а также приведены таблицы динамики средних таксационных показателей чистых модальных сосновых древостоев Беларуси в возрасте 11–160 лет. Выполнен анализ распределения площадей чистых сосновых древостоев по классам возраста и типам леса, возрастной динамики средних диаметров, высот, полнот и запасов. Отмечено увеличение с возрастом показателей среднего диаметра и высоты, постепенное после 40–50 лет снижение относительной полноты, которое приводит к снижению текущего изменения среднего запаса древостоев.

Ключевые слова: лесной фонд, чистые сосновые древостои, тип леса, цифровизация лесного хозяйства, таблицы динамики таксационных показателей, хозяйственная деятельность, ход роста.

Для цитирования: Толкач И. В., Таркан А. В., Коцан В. В., Пушкин А. А., Цай С. С. Таблицы динамики средних таксационных показателей чистых модальных сосняков Беларуси // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 15–23.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-2.

I. V. Tolkach¹, A. V. Tarkan², V. V. Kotsan¹, A. A. Pushkin, S. S. Tsai¹¹Belarusian State Technological University²Republical Unitary Enterprise Forest Inventory “Belgosles”**TABLES OF DYNAMICS OF AVERAGE TAXATION INDEXES
OF PURE MODAL PINE FORESTS OF BELARUS**

The publication provides a brief analysis of current trends in the development of forestry in the field of digitalization, the possibility of using a forestry data bank to analyze the stand of the forest fund. The methods of compiling tables reflecting the course of growth and age dynamics of the taxation indexes of stands, grouping experimental data on the belonging of stands to one natural series of growth and development are considered. The method of compiling tables of the dynamics of taxation indexes of modal stands, proposed by academician N. P. Anuchin, is highlighted. The method is based on statistical processing of mass production data – materials of taxation of crops during forest management. The methodology and software used to form the tables are briefly described, as well as tables of the dynamics of average taxation indexes of pure modal pine stands in Belarus aged 11–160 years. The analysis of the distribution of areas of pure pine stands by age classes and types of forest, age dynamics of average diameters, heights, completeness and stocks of pine stands was performed. There was an increase in the average diameter and height with age, a gradual decrease in relative completeness after 40–50 years, which leads to a decrease in the current change in the average stock of trees.

Keywords: forest fund, pure pine stands, forest type, digitalization of forestry, tables of dynamics of taxation indicators, economic activity, the course of growth.

For citation: Tolkach I. V., Tarkan A. V., Kotsan V. V., Tsai S. S. Tables of dynamics of average taxation indexes of pure modal pine forests of Belarus. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 15–23 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-2.

Введение. По данным лесного кадастра, на 1 января 2024 г. 4036,06 тыс. га, или 48,3%, лесов представлены насаждениями сосны обыкновенной [1].

За последние десятилетия изучением состояния и динамики сосновых лесов Беларуси занимались В. Ф. Багинский, Л. Н. Рожков, В. Е. Ермаков,

Н. Ф. Ловчий, К. В. Лабоха, Д. В. Шиман и другие ученые [2–8]. Ими выполнен анализ возрастной структуры сосновых лесов, распределений площадей по основным таксационным показателям, составлены таблицы их динамики.

Активное хозяйственное воздействие, природные и антропогенные катаклизмы приводят к существенным изменениям состояния лесов за сравнительно небольшие временные периоды, поэтому использование таблиц хода роста, таблиц динамики таксационных показателей модальных древостоев, разработанных 30 или 20 лет назад, может привести к принятию ошибочных решений.

Интенсивное и устойчивое ведение лесного хозяйства требует быстрого реагирования и принятия оптимальных решений, основанных на анализе фактического состояния лесного фонда отдельного предприятия или республики в целом [9]. Оптимальные решения могут приниматься только путем обобщения и анализа актуальной и своевременно-полученной информации.

Современным трендом развития в соответствии с «Программой социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы», утвержденной Указом Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292, Государственной программой «Белорусский лес» на 2021–2025 гг., перспективным направлением деятельности, определенным в «Стратегическом плане развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 годы» [10], является цифровизация отрасли лесного хозяйства, предназначенная для повышения эффективности управления лесами, лесными ресурсами и работы отрасли в целом.

В 2022 г. разработана «Концепция цифровизации лесного хозяйства Республики Беларусь», предусматривающая в том числе разработку информационной системы «Банк данных лесов», позволяющую в перспективе получать актуальную информацию о лесном фонде и лесных ресурсах на любом уровне агрегации. В настоящее время создан и работает геопортал земельно-информационной системы, включающий полную базу данных о лесах Беларуси (<https://gismap.by/next/>), что дает возможность использовать уже сегодня имеющиеся информационные ресурсы для автоматизированного формирования таблиц динамики таксационных показателей модальных древостоев с целью оценки фактического состояния лесов и показателей лесного фонда.

Основная часть. Сегодня известны различные методы составления таблиц, отражающих ход роста и возрастную динамику таксационных показателей древостоев. В их основе, как правило, лежит первичная группировка опытных данных по естественным рядам роста и развития.

В идеальном случае ход роста можно представить множественными наблюдениями и

измерениями одного или нескольких древостоев на протяжении всего жизненного цикла: от формирования до распада [11, 12]. Такой метод периодически повторяющихся наблюдений теоретически возможен, но его сложно реализовать на практике из-за длительности самого периода, что при современной интенсивности хозяйствования неприемлемо.

В этой связи большинство методов основываются на данных разовой таксации древостоев на временных площадях или повторяющихся через 5–10 лет данных таксации на стационарах.

Наиболее сложной задачей по-прежнему является объединение опытных объектов в естественные ряды роста. Оно может проводиться на основе данных анализа хода роста стволов модельных деревьев (аналитический метод), путем формирования одной линии роста из множества отрезков, построенных по результатам повторных обмеров на стационарах в течение 10–20-летнего периода (метод Гейера), за счет объединения по сходству условий произрастания (типологический метод), производительности (объединение по классам бонитета), на основе графиков и функций, отражающих взаимосвязи между таксационными показателями или типовые линии роста (методы ЦНИИЛХ, Бауэра, Корсуна, ВНИИЛМ) [11, 12]. Авторами предложены и другие методы группировки насаждений в естественные ряды роста и развития, однако практически во всех случаях для оценки таксационных показателей древостоев требуется закладка достаточно большого количества временных или постоянных пробных площадей [13–15].

Отдельно следует выделить метод составления таблиц динамики таксационных показателей модальных древостоев, предложенный академиком Ануциным Н. П., в основу которого положена статистическая обработка материалов таксации насаждений при проведении лесоустройства [11]. Несмотря на отсутствие этапа группировки древостоев в естественные ряды роста и развития, такие таблицы построены на большом количестве натурных данных и отражают фактическое состояние лесов, что дает возможность опосредованно судить в том числе о хозяйственном воздействии.

В качестве источника информации послужила повыделная база данных лесного фонда Беларуси. Исходные данные были сформированы SQL-запросом из реляционной СУБД PostgreSQL. Отобраны чистые (10С) сосновые древостои в возрасте 11–160 лет. Общее количество выделов составило 603 002 шт., занимаемая ими площадь – 1579,1 тыс. га.

Распределение количества выделов и площадей по типам леса и классам возраста отражено в табл. 1. Наиболее представлены сосняки мшистые, занимающие 47,7% площади, и сосняки орляковые – 21,2%.

Таблица 1

**Распределение количества выделов и площадей по типам леса и классам возраста
(числитель – количество выделов, шт.; знаменатель – площадь, га)**

Тип леса	Класс возраста								Итого
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
С. багульниковый	<u>97</u> 475	<u>690</u> 2475	<u>2341</u> 9618	<u>6107</u> 23 572	<u>7573</u> 28 027	<u>1816</u> 6276	<u>455</u> 1691	<u>97</u> 356	<u>19 176</u> 72 490
С. брусничный	<u>66</u> 104	<u>102</u> 210	<u>299</u> 730	<u>405</u> 1066	<u>549</u> 1294	<u>253</u> 482	<u>95</u> 241	<u>36</u> 64	<u>1805</u> 4191
С. вересковый	<u>1952</u> 2916	<u>6029</u> 10 370	<u>11 524</u> 23 755	<u>6634</u> 14 807	<u>2622</u> 5110	<u>851</u> 1869	<u>258</u> 636	<u>53</u> 132	<u>29 923</u> 59 595
С. долгомошный	<u>256</u> 404	<u>827</u> 1309	<u>2570</u> 4460	<u>9661</u> 20 009	<u>9492</u> 20 917	<u>1244</u> 2581	<u>191</u> 335	<u>19</u> 27	<u>24 260</u> 50 042
С. кисличный	<u>211</u> 261	<u>281</u> 300	<u>4039</u> 7269	<u>9954</u> 21 861	<u>3605</u> 7903	<u>337</u> 776	<u>68</u> 176	<u>5</u> 19	<u>18 500</u> 38 565
С. лишайниковый	<u>330</u> 406	<u>1841</u> 2988	<u>2676</u> 5066	<u>778</u> 1648	<u>181</u> 487	<u>46</u> 79	<u>23</u> 55	<u>2</u> 2	<u>5877</u> 10 731
С. мшистый	<u>11 985</u> 19 599	<u>20 757</u> 34 162	<u>92 396</u> 223 483	<u>117 551</u> 333 979	<u>42 488</u> 124 000	<u>5786</u> 15 904	<u>800</u> 1644	<u>66</u> 119	<u>291 829</u> 752 890
С. орляковый	<u>4065</u> 6341	<u>6825</u> 9770	<u>49 150</u> 110 372	<u>62 971</u> 159 549	<u>16 687</u> 44 967	<u>1341</u> 3575	<u>160</u> 390	<u>19</u> 69	<u>141 218</u> 335 033
С. осоково-сфагно- вый	<u>56</u> 403	<u>1023</u> 9212	<u>2485</u> 22 132	<u>3777</u> 31 257	<u>4006</u> 29 353	<u>920</u> 5722	<u>246</u> 1777	<u>44</u> 354	<u>12 557</u> 100 210
С. осоковый	<u>137</u> 707	<u>431</u> 1028	<u>629</u> 2284	<u>874</u> 3028	<u>878</u> 3301	<u>303</u> 1016	<u>53</u> 249	<u>5</u> 11	<u>3310</u> 11 624
С. приручейно-тра- вяной	<u>15</u> 14	<u>23</u> 20	<u>13</u> 37	<u>28</u> 44	<u>44</u> 85	<u>4</u> 13	<u>2</u> 11	<u>0</u> 0	<u>129</u> 224
С. сфагновый	<u>1</u> 1	<u>18</u> 99	<u>76</u> 970	<u>188</u> 1877	<u>160</u> 2039	<u>51</u> 443	<u>25</u> 495	<u>14</u> 48	<u>533</u> 5972
С. черничный	<u>1365</u> 2067	<u>1408</u> 2345	<u>8413</u> 18 937	<u>25 007</u> 61 565	<u>18 014</u> 45 954	<u>2362</u> 5922	<u>302</u> 698	<u>14</u> 33	<u>56 885</u> 137 521
Всего	<u>20 536</u> 33 698	<u>40 255</u> 74 288	<u>176 611</u> 429 113	<u>243 935</u> 674 262	<u>106 299</u> 313 437	<u>15 314</u> 44 658	<u>2678</u> 8398	<u>374</u> 1234	<u>606 002</u> 1 579 088

На долю сосняков черничных приходится 8,7, осоково-сфагновых – 6,3, багульниковых – 4,6, вересковых – 3,8, долгомошных – 3,2, кисличных 2,4% от общей площади. Площадь остальных типов леса незначительна и составляет чуть более 2%. Возрастная структура неравномерна, преобладают древостои IV – 42,7%, III – 27,2% и V – 19,8% классов возраста. Сосняки II класса возраста занимают 4,7%, VI – 2,8%, I – 2,1%, VII и VIII – 0,6%.

Динамика средних значений ($\bar{X}$) основных таксационных показателей древостоев и их статистик (S_x – ошибки среднего значения; σ – среднеквадратического отклонения) приводится в табл. 2.

Расчет средних значений диаметров, высот, запасов и относительных полнот, их ошибок, среднеквадратических отклонений, а также построение графиков выполнено с использованием языка программирования R в среде RStudio. Преимуществом такого подхода является возможность автоматизированного построения таблиц

динамики для других древесных видов. Все значения статистик рассчитывались как величины, средневзвешенные по площади. Визуальное отображение сглаженных кривых возрастной динамики показателей приводится на рисунке.

Анализ данных табл. 2 и рисунка показывает, что практически во всех типах леса с увеличением возраста увеличиваются средние диаметры и высоты. При этом увеличение значений средних диаметров происходит на протяжении всего анализируемого возрастного периода (11–160 лет). Исключение составляют сосняки лишайниковые, долгомошные и приручейно-травяные, в которых значения среднего диаметра после 100–120 лет снижаются, что объясняется малым количеством наблюдений (выделов) в VII и VIII классах возраста.

Увеличение значений средних высот до возраста 80–90 лет происходит достаточно интенсивно, а затем снижается и остается практически постоянным.

Таблица 2

**Динамика средних таксационных показателей чистых сосновых модальных древостоев
по классам возраста и типам леса**

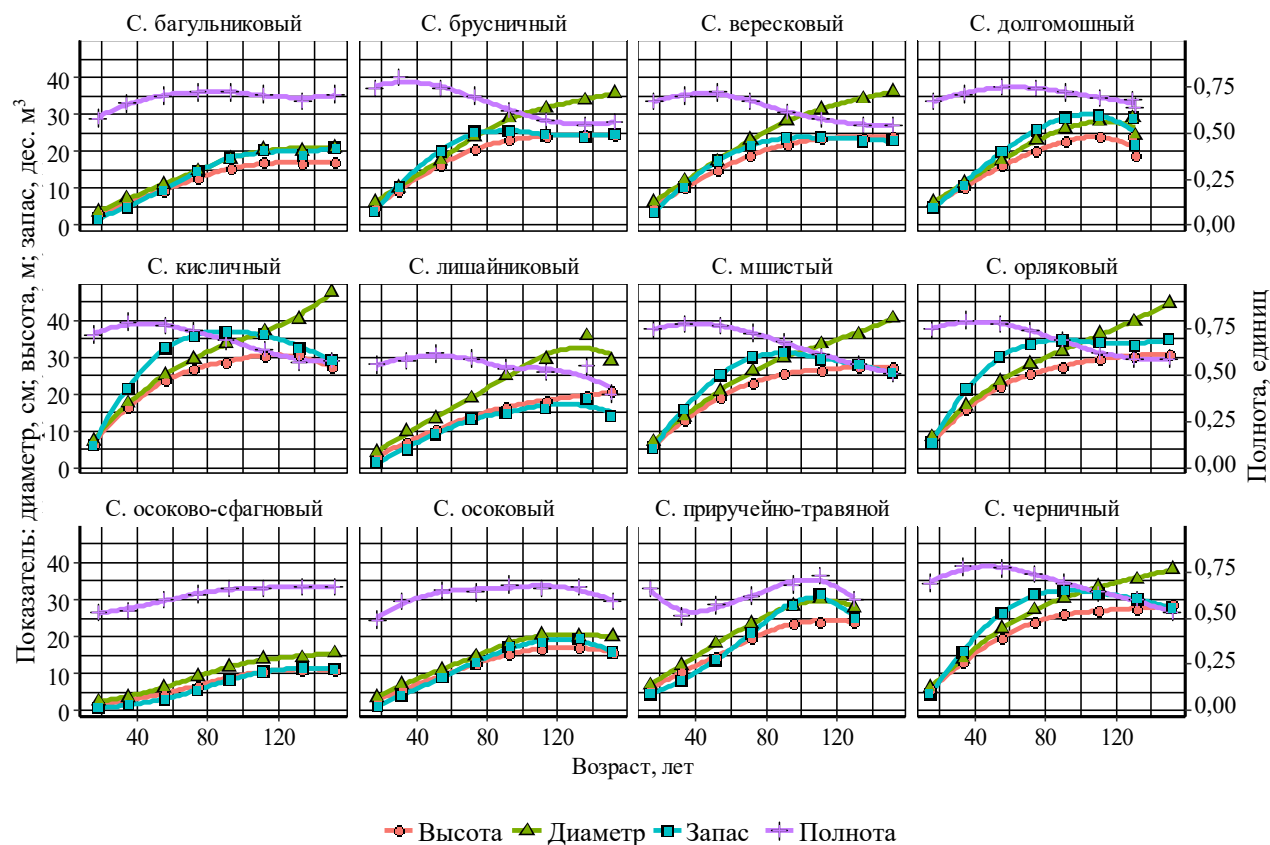
Класс возраста	Возраст, лет			Высота, м			Диаметр, см			Бонитет			Полнота			Запас, м³		
	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ
Сосняк багульниковый																		
I	17,6	0,21	4,5	3,0	0,09	1,9	3,5	0,08	1,7	4,3	0,02	0,5	5,8	0,04	0,8	18	0,8	17,9
II	34,1	0,13	6,3	6,0	0,04	1,9	7,3	0,07	3,3	4,5	0,01	0,5	6,6	0,03	1,2	49	0,5	25,2
III	54,7	0,06	5,7	9,3	0,02	2,0	10,9	0,03	3,0	4,6	0,01	0,5	7,0	0,01	1,1	95	0,3	32,5
IV	74,2	0,03	5,4	12,8	0,01	2,2	14,7	0,02	2,8	4,5	0,00	0,5	7,2	0,01	1,0	146	0,3	39,9
V	92,4	0,03	5,6	15,4	0,01	2,3	18,1	0,02	3,2	4,5	0,00	0,5	7,2	0,01	0,9	183	0,3	42,4
VI	111,6	0,08	6,1	16,9	0,03	2,3	20,6	0,04	3,5	4,5	0,01	0,5	7,1	0,01	1,0	202	0,6	46,0
VII	133,6	0,15	6,0	16,5	0,06	2,3	20,0	0,09	3,8	4,7	0,01	0,5	6,7	0,03	1,1	189	1,1	46,4
VIII	152,0	0,25	4,8	17,2	0,14	2,7	21,1	0,19	3,6	4,7	0,03	0,5	7,1	0,05	1,0	209	2,8	53,6
Сосняк брусничный																		
I	16,2	0,32	3,3	4,8	0,14	1,4	6,2	0,27	2,7	2,3	0,05	0,5	7,4	0,10	1,0	38	1,5	15,5
II	30,0	0,39	5,7	9,2	0,15	2,1	10,1	0,19	2,8	2,4	0,03	0,5	8,0	0,09	1,3	103	2,1	30,6
III	53,8	0,21	5,7	16,4	0,07	1,8	17,6	0,11	3,0	2,2	0,01	0,4	7,4	0,04	1,0	201	1,2	33,4
IV	72,8	0,18	5,7	20,7	0,05	1,6	24,0	0,09	2,9	2,1	0,01	0,4	7,0	0,03	1,0	253	1,3	43,0
V	92,5	0,15	5,5	23,1	0,04	1,5	29,0	0,09	3,4	2,4	0,01	0,5	6,2	0,03	0,9	255	1,3	45,2
VI	113,2	0,25	5,6	24,0	0,07	1,6	31,6	0,18	3,9	2,7	0,02	0,4	5,7	0,05	1,1	245	2,5	54,2
VII	135,3	0,36	5,6	24,6	0,09	1,4	33,8	0,24	3,8	2,8	0,02	0,4	5,4	0,06	0,9	239	2,8	43,5
VIII	152,2	0,52	4,1	24,5	0,16	1,2	35,6	0,33	2,7	3,0	0,02	0,2	5,6	0,14	1,1	247	6,5	51,9
Сосняк вересковый																		
I	16,3	0,06	3,1	4,8	0,03	1,5	6,2	0,04	2,4	2,4	0,01	0,5	6,7	0,02	1,3	36	0,3	18,2
II	33,5	0,06	5,8	10,1	0,02	2,2	12,1	0,03	3,0	2,6	0,00	0,5	7,0	0,01	1,2	104	0,4	36,5
III	52,4	0,04	5,6	15,0	0,01	1,9	17,3	0,02	2,9	2,5	0,00	0,5	7,2	0,01	1,1	175	0,3	39,6
IV	71,1	0,05	5,6	18,8	0,02	1,9	23,2	0,03	3,2	2,5	0,00	0,5	6,7	0,01	1,0	216	0,3	40,7
V	91,4	0,08	5,7	22,0	0,02	1,7	28,3	0,05	3,3	2,6	0,01	0,5	6,1	0,02	1,1	236	0,7	47,7
VI	110,9	0,12	5,3	23,4	0,03	1,3	31,4	0,09	3,8	2,8	0,01	0,4	5,8	0,03	1,2	239	1,2	53,1
VII	134,6	0,20	5,1	23,7	0,05	1,1	34,2	0,15	3,7	3,0	0,01	0,2	5,4	0,04	1,0	227	1,9	47,3
VIII	151,9	0,35	4,0	24,0	0,10	1,2	36,1	0,33	3,8	3,0	0,01	0,1	5,4	0,07	0,8	231	3,1	35,9
Сосняк долгомошный																		
I	16,5	0,14	2,9	5,6	0,13	2,7	6,3	0,13	2,7	2,5	0,02	0,5	6,7	0,07	1,5	48	2,0	40,8
II	33,7	0,17	6,2	10,1	0,06	2,3	11,5	0,08	3,0	2,6	0,01	0,5	7,1	0,04	1,3	106	1,0	37,7
III	55,2	0,08	5,1	16,0	0,03	2,0	17,6	0,05	3,0	2,4	0,01	0,5	7,5	0,02	1,1	200	0,6	42,1
IV	75,0	0,04	5,5	20,2	0,02	2,1	23,1	0,02	3,3	2,3	0,00	0,5	7,4	0,01	0,9	258	0,3	45,0
V	91,3	0,04	5,5	22,8	0,01	2,1	26,2	0,02	3,3	2,4	0,00	0,5	7,2	0,01	1,0	291	0,4	54,0
VI	110,4	0,14	6,9	23,9	0,05	2,3	28,1	0,08	4,0	2,6	0,01	0,5	6,9	0,02	1,2	297	1,3	63,5
VII	129,6	0,51	9,3	23,9	0,13	2,3	29,0	0,25	4,6	2,9	0,02	0,4	6,8	0,06	1,1	291	3,3	60,0
VIII	130,6	7,32	37,3	18,6	1,68	8,6	24,3	2,13	10,8	3,0	—	—	6,4	0,24	1,2	219	23,7	121,0
Сосняк кисличный																		
I	15,0	0,17	2,8	6,5	0,15	2,4	7,4	0,20	3,3	0,8	0,03	0,4	7,2	0,10	1,6	63	2,5	39,8
II	34,5	0,35	6,1	16,4	0,19	3,3	17,5	0,22	3,7	0,3	0,03	0,5	7,9	0,07	1,3	215	3,2	56,0
III	55,6	0,06	4,8	23,6	0,02	1,9	25,1	0,03	2,6	0,2	0,00	0,4	7,7	0,01	1,0	325	0,6	53,6
IV	72,1	0,04	5,6	26,7	0,01	1,8	29,5	0,02	2,9	0,3	0,00	0,5	7,4	0,01	0,9	358	0,4	51,7
V	90,3	0,06	5,4	28,7	0,02	1,7	33,6	0,04	3,5	0,6	0,01	0,5	6,9	0,01	1,0	368	0,7	65,0
VI	111,9	0,20	5,5	30,2	0,06	1,8	37,0	0,15	4,1	0,9	0,01	0,4	6,4	0,04	1,2	361	2,5	70,2
VII	131,4	0,29	3,9	30,7	0,08	1,0	40,4	0,35	4,6	1,0	—	—	5,7	0,09	1,2	323	5,3	69,7
VIII	150,0	—	—	27,1	0,11	0,5	47,5	0,37	1,5	1,0	—	—	5,8	0,09	0,4	293	4,7	20,1

Продолжение табл. 2

Класс возраста	Возраст, лет			Высота, м			Диаметр, см			Бонитет			Полнота			Запас, м ³		
	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ	X	S _x	σ
Сосняк лишайниковый																		
I	17,3	0,15	3,0	2,9	0,04	0,9	4,1	0,10	2,0	4,1	0,02	0,3	5,6	0,05	1,1	16	0,3	6,6
II	34,5	0,10	5,3	7,0	0,03	1,5	10,0	0,06	3,2	4,2	0,01	0,4	5,8	0,02	1,1	51	0,4	19,5
III	50,6	0,08	5,6	10,1	0,02	1,8	13,4	0,05	3,5	4,2	0,01	0,4	6,2	0,01	1,1	91	0,4	27,3
IV	71,0	0,14	5,7	13,9	0,04	1,8	18,8	0,11	4,4	4,1	0,01	0,3	5,9	0,02	1,0	133	0,8	30,9
V	90,7	0,27	6,0	16,5	0,06	1,3	24,9	0,18	4,0	4,1	0,01	0,3	5,4	0,05	1,1	149	1,4	31,1
VI	113,1	0,57	5,0	18,3	0,16	1,4	29,4	0,42	3,7	4,1	0,04	0,3	5,2	0,10	0,9	163	3,7	32,3
VII	136,5	0,68	5,0	19,4	0,16	1,2	35,7	0,59	4,3	4,0	0,01	0,1	5,5	0,10	0,8	188	4,7	34,6
VIII	150,0	–	–	20,5	0,49	0,5	28,9	0,98	1,0	4,0	–	–	4,0	–	–	140	–	–
Сосняк мшистый																		
I	15,8	0,02	2,9	5,9	0,01	1,7	7,1	0,02	2,6	1,5	0,00	0,5	7,5	0,01	1,5	54	0,2	27,2
II	33,4	0,03	6,1	12,7	0,02	2,8	13,8	0,02	3,2	1,4	0,00	0,5	7,8	0,01	1,2	156	0,3	48,7
III	53,9	0,01	5,4	19,1	0,00	2,1	20,8	0,01	2,9	1,3	0,00	0,5	7,7	0,00	1,0	251	0,1	46,0
IV	72,0	0,01	5,6	23,1	0,00	1,9	26,2	0,00	2,6	1,2	0,00	0,4	7,3	0,00	0,8	299	0,1	45,3
V	89,9	0,01	5,3	25,4	0,00	1,5	29,8	0,01	2,9	1,5	0,00	0,5	6,8	0,00	1,1	313	0,2	55,1
VI	110,8	0,04	4,9	26,5	0,01	1,3	33,5	0,03	3,9	1,9	0,00	0,3	6,1	0,01	1,3	294	0,6	69,7
VII	132,3	0,11	4,6	27,1	0,03	1,2	36,1	0,13	5,2	2,0	0,01	0,2	5,6	0,03	1,3	278	1,6	65,6
VIII	151,3	0,31	3,3	27,4	0,09	1,0	40,5	0,70	7,6	2,0	0,02	0,2	5,1	0,13	1,4	257	6,8	73,4
Сосняк орляковый																		
I	15,6	0,04	2,8	6,8	0,02	2,0	8,4	0,04	2,8	0,8	0,00	0,4	7,5	0,02	1,5	68	0,4	32,9
II	35,0	0,06	5,6	15,9	0,03	2,9	16,7	0,03	3,2	0,4	0,01	0,5	8,0	0,01	1,2	212	0,6	58,6
III	54,1	0,02	5,3	22,0	0,01	2,0	23,3	0,01	2,7	0,4	0,00	0,5	7,8	0,00	1,0	300	0,2	50,8
IV	71,5	0,01	5,5	25,3	0,00	1,7	28,0	0,01	2,3	0,7	0,00	0,5	7,4	0,00	0,8	335	0,1	46,0
V	89,4	0,02	5,2	27,4	0,01	1,5	31,6	0,01	3,0	0,9	0,00	0,3	6,9	0,00	1,0	346	0,3	56,8
VI	110,8	0,08	4,9	29,5	0,02	1,0	36,2	0,07	4,2	1,0	0,00	0,2	6,2	0,02	1,4	339	1,2	74,1
VII	130,5	0,13	2,5	30,3	0,06	1,2	39,6	0,26	5,2	1,0	0,01	0,3	5,9	0,05	1,1	330	2,9	57,4
VIII	150,0	–	–	30,7	0,27	2,3	44,7	0,45	3,7	1,0	–	–	5,9	0,15	1,3	349	11,3	93,0
Сосняк осоковый																		
I	17,8	0,09	2,5	2,7	0,03	0,8	3,6	0,05	1,5	4,1	0,01	0,3	4,9	0,03	0,8	13	0,2	4,6
II	31,4	0,18	5,6	5,7	0,05	1,6	7,1	0,08	2,7	4,3	0,01	0,5	5,9	0,04	1,4	41	0,7	23,3
III	54,4	0,12	5,5	9,3	0,05	2,2	11,0	0,07	3,2	4,7	0,01	0,5	6,5	0,02	1,1	89	0,6	30,7
IV	73,4	0,10	5,7	12,5	0,04	2,3	14,6	0,06	3,1	4,5	0,01	0,5	6,4	0,02	1,3	127	0,7	40,5
V	92,5	0,10	5,7	15,4	0,04	2,2	18,1	0,06	3,2	4,5	0,01	0,5	6,8	0,02	1,1	172	0,8	44,4
VI	111,1	0,16	5,0	16,7	0,07	2,2	20,6	0,11	3,5	4,5	0,02	0,5	6,6	0,04	1,1	184	1,3	40,5
VII	132,1	0,28	4,4	17,0	0,16	2,5	20,0	0,28	4,4	4,7	0,03	0,5	6,7	0,07	1,1	194	2,8	44,8
VIII	150,9	0,88	2,8	15,8	0,51	1,6	19,9	0,70	2,2	4,8	0,12	0,4	5,9	0,34	1,1	157	10,6	34,0
Сосняк осоково-сфагновый																		
I	18,0	0,30	6,0	1,4	0,05	1,1	2,5	0,07	1,3	6,0	0,00	0,1	5,3	0,06	1,1	8	0,5	10,4
II	34,9	0,05	5,2	2,8	0,01	0,9	3,7	0,02	1,5	6,1	0,00	0,3	5,4	0,01	0,9	15	0,1	7,7
III	55,3	0,04	5,6	4,6	0,01	1,4	6,3	0,01	2,0	6,3	0,00	0,5	6,0	0,01	1,2	30	0,1	15,5
IV	73,9	0,03	5,3	6,7	0,01	1,7	9,1	0,02	2,7	6,2	0,00	0,4	6,3	0,01	1,1	55	0,1	22,5
V	92,1	0,03	5,3	8,8	0,01	1,8	11,8	0,02	3,0	6,2	0,00	0,4	6,6	0,01	1,1	83	0,2	27,7
VI	111,1	0,08	6,3	10,6	0,02	1,7	13,9	0,04	2,9	6,2	0,01	0,4	6,6	0,01	1,1	105	0,4	31,0
VII	133,5	0,14	5,8	11,1	0,04	1,6	14,2	0,06	2,7	6,1	0,01	0,3	6,7	0,02	0,9	113	0,6	25,6
VIII	151,6	0,19	3,7	10,9	0,12	2,2	15,5	0,18	3,5	6,2	0,02	0,4	6,7	0,05	1,0	112	2,1	38,9
Сосняк приручейно-травяной																		
I	14,3	0,93	3,3	5,9	0,44	1,5	6,8	1,05	3,7	2,1	0,09	0,3	6,6	0,30	1,1	45	4,1	14,6
II	31,8	1,62	7,0	10,5	0,51	2,2	12,3	1,16	5,0	2,2	0,12	0,5	5,1	0,32	1,4	80	7,2	30,9
III	51,5	0,99	5,9	14,5	0,30	1,8	18,1	0,66	4,0	2,5	0,08	0,5	5,7	0,08	0,5	136	3,3	19,9

Окончание табл. 2

Класс возраста	Возраст, лет			Высота, м			Диаметр, см			Бонитет			Полнота			Запас, м ³		
	X	S_x	σ	X	S_x	σ	X	S_x	σ	X	S_x	σ	X	S_x	σ	X	S_x	σ
IV	71,4	0,75	4,9	19,4	0,31	2,1	23,4	0,71	4,7	2,3	0,07	0,5	6,2	0,17	1,1	209	5,8	38,4
V	95,1	0,62	5,6	23,6	0,19	1,8	28,2	0,43	3,9	2,2	0,05	0,5	6,8	0,12	1,1	284	4,9	44,4
VI	110,5	1,07	3,7	24,0	0,41	1,4	30,2	1,29	4,5	2,4	0,14	0,5	7,3	0,20	0,7	315	12,5	43,0
VII	130,0	—	—	24,0	—	—	28,0	—	—	3,0	—	—	6,0	—	—	250	—	—
Сосняк сфагновый																		
I	20,0	—	—	2,0	—	—	4,0	—	—	5,0	—	—	5,0	—	—	10	—	—
II	39,6	0,21	2,1	2,7	0,13	1,3	2,9	0,16	1,6	6,5	0,08	0,8	5,3	0,06	0,6	15	0,9	9,3
III	55,9	0,16	5,0	3,8	0,06	1,7	6,1	0,07	2,3	6,7	0,02	0,7	5,2	0,04	1,1	22	0,7	20,5
IV	74,6	0,15	6,4	5,2	0,07	2,9	7,5	0,08	3,7	6,7	0,01	0,6	6,0	0,03	1,1	38	0,9	38,8
V	92,2	0,12	5,4	6,1	0,03	1,5	7,9	0,05	2,3	6,9	0,01	0,3	6,7	0,03	1,1	48	0,5	21,3
VI	110,3	0,18	3,7	8,6	0,12	2,5	10,1	0,17	3,5	6,7	0,03	0,6	6,4	0,05	1,0	77	1,9	40,1
VII	136,4	0,22	4,9	8,5	0,05	1,1	9,9	0,08	1,8	7,0	0,01	0,1	6,0	0,04	0,8	69	0,9	19,0
VIII	155,1	0,73	5,0	7,8	0,46	3,1	12,1	0,65	4,4	6,7	0,08	0,6	6,3	0,18	1,2	70	7,0	48,0
Сосняк черничный																		
I	14,6	0,06	2,9	5,5	0,04	2,0	6,2	0,06	2,9	1,6	0,01	0,5	6,9	0,03	1,3	45	0,6	25,9
II	33,3	0,12	5,7	12,9	0,06	2,8	13,8	0,07	3,3	1,4	0,01	0,5	7,8	0,03	1,3	157	1,0	49,3
III	55,4	0,04	4,9	19,8	0,01	1,9	22,1	0,02	2,8	1,2	0,00	0,4	7,7	0,01	0,9	263	0,3	44,4
IV	73,5	0,02	5,6	23,9	0,01	1,8	27,2	0,01	2,6	1,2	0,00	0,4	7,4	0,00	0,8	314	0,2	46,2
V	90,6	0,02	5,2	26,0	0,01	1,7	30,4	0,01	3,1	1,3	0,00	0,5	6,9	0,01	1,1	325	0,3	58,5
VI	109,7	0,07	5,5	27,0	0,02	1,7	33,6	0,05	3,6	1,8	0,01	0,4	6,4	0,01	1,1	317	0,8	60,7
VII	131,9	0,18	4,6	27,3	0,05	1,3	35,5	0,16	4,2	1,9	0,01	0,3	6,0	0,05	1,2	301	2,4	64,2
VIII	151,8	0,68	3,9	28,5	0,16	0,9	38,2	0,56	3,2	1,9	0,04	0,2	5,3	0,23	1,3	278	13,9	79,3



Динамика средних диаметров, высот, запасов и относительных полнот чистых модальных сосняков по типам леса

В динамике средних полнот наблюдаются достаточно интересные закономерности, подтверждающие выводы В. Ф. Багинского [5]. Так, в сосняках багульниковых, сфагновых, осоково-сфагновых, осоковых, труднодоступных для хозяйственной деятельности (проведения рубок ухода) относительная полнота плавно увеличивается или остается практически неизменной. В сосняках брусничных, вересковых, кисличных, лишайниковых, мшистых, орляковых, черничных после 40–50 лет происходит постепенное снижение средней полноты на 1–2 единицы. Постепенное снижение полноты приводит к тому, что запас, несмотря на увеличение средних диаметров и высот в возрастах старше 70–90 лет, практически не увеличивается или увеличивается совсем незначительно, а в более старших возрастах снижается.

Можно предположить, что систематическое снижение средних полнот в возрасте старше 40 лет объясняется высокой интенсивностью проходных рубок, и древостой за период до проведения следующего лесоустройства не успевает восстановить полноту, которая была до рубки. Таким образом, доля древостоев с полнотой 0,8 и выше, при которой лесоустройством назначаются проходные рубки, постепенно снижается, а следовательно, снижается и средняя полнота.

Детального анализа распределения полнот для всех классов возраста и типов леса в рамках данной работы не проводилось. Чтобы удостовериться в данном предположении построены ряды распределения по полноте лишь для

сосняков III и IV классов возраста наиболее распространенного мшистого типа леса. Так, в сосняках III класса возраста доля древостоев с полнотой 0,8 и выше составляет 50,6%, а в IV классе возраста она уменьшается до 34,0%. Подобная закономерность будет наблюдаться и для других классов.

Заключение. Результаты данного исследования показывают, что в современных условиях для принятия оптимальных решений с целью обеспечения интенсивного и устойчивого ведения лесного хозяйства, оперативного выявления нежелательных изменений лесного фонда целесообразно и возможно использование цифровых технологий и средств автоматизации для формирования на основе повыведельного банка данных таблиц динамики средних таксационных показателей модальных древостоев. Детальный анализ таких таблиц позволяет оценить фактическое состояние лесов, выявить отрицательные изменения их показателей, установить факторы или виды хозяйственной деятельности, приводящие к ухудшению лесного фонда и принять меры по устранению отрицательного воздействия данных факторов.

Анализ таблиц динамики средних таксационных показателей чистых модальных сосновых древостоев позволяет заключить, что после 40–50 лет в древостоях большинства типов леса наблюдается постепенное снижение средней полноты на 1–2 единицы. В результате, несмотря на положительную динамику средних диаметров и высот, это приводит к снижению текущего изменения среднего запаса древостоев.

Список литературы

1. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2024 года. Минск: Белгослес, 2024. 87 с.
2. Рожков Л. Н., Ермаков Н. Е., Ловчий Н. Ф. Динамика и состояние сосновых лесов Беларуси // Труды БГТУ. Сер. I: Лесное хозяйство. 2005. Вып. XIII. С. 7–13.
3. Рожков Л. Н. Динамика структуры и продуктивности лесных формаций в Республике Беларусь // Труды БГТУ. Сер. I: Лесное хоз-во. 2007. Вып. XV. С. 98–102.
4. Ловчий Н. Ф. Экологический анализ структуры и продуктивности сосновых лесов Беларуси. Минск: Беларус. навука, 1999. 263 с.
5. Багинский В. Ф. Динамика и продуктивность модальных сосновых древостоев в белорусском Полесье // Эко-потенциал. 2015. № 3 (11). С. 14–23.
6. Багинский В. Ф. Особенности хода роста древостоев сосны в Белорусском Полесье // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2016. Вып. 76. С. 307–317.
7. Лабоха К. В., Шиман Д. В., Борко А. Ч. Современное состояние и динамика сосновых лесов Беларуси // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2012. Вып. 72. С. 86–100.
8. Нормативные материалы для таксации лесов Белорусской ССР / Госкомлес СССР, Центр. бюро науч.-техн. информ.; редкол.: В. Ф. Багинский [и др.]. М.: ЦБНТИ лесхоз, 1984. 308 с.
9. Атрощенко О. А., Демид Н. П., Сидельник Н. Я. Управление лесами и лесными ресурсами. Минск: БГТУ, 2014. 83 с.
10. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 год: утв. 23.12.2014 № 06/201-271. Минск, 2015. 20 с.

11. Ануцин Н. П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
12. Верхунов П. М. Таксация леса. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. 396 с.
13. Багинский В. Ф. Ход роста древостоев и его отражение в таблицах и математических моделях // Лесное хоз-во. 2011. № 2. С. 40–42.
14. Рогозин М. В., Разин Г. С. Модели динамики и моделирование развития древостоев // Сиб. лесной журн. 2015. № 2. С. 55–70.
15. Рогозин М. В., Разин Г. С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы: монография. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_24420793_86296975.pdf (дата обращения: 10.10.2024).

References

1. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2024* [The State Forest Cadastre of the Republic of Belarus as of 01.01.2024]. Minsk, Belgosles Publ., 2024. 87 p. (In Russian).
2. Rozhkov L. N., Ermakov N. E., Lovchiy N. F. Dynamics and condition of pine forests of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2005, issue XIII, pp. 7–13 (In Russian).
3. Rozhkov L. N. Dynamics of the structure and productivity of forest formations in the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2007, issue XV, pp. 98–102 (In Russian).
4. Lovchiy N. F. *Ekologicheskiy analiz struktury i produktivnosti sosnovykh lesov Belarusi* [Ecological analysis of the structure and productivity of pine forests of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1999. 263 p. (In Russian).
5. Baginskii V. F. Dynamics and productivity of modal pine stands in Belorussian Polesie. *Eko-potentsial* [Eco-potential], 2015, no. 3 (11), pp. 14–23 (In Russian).
6. Baginskiy V. F. Features of the course of growth of pine stands in the Belarusian Polesie. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: Collection of Scientific Papers of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel', 2016, issue 76, pp. 307–317 (In Russian).
7. Labokha K. V., Shiman D. V., Borko A. Ch. Current state and dynamics of the pine forests of Belarus. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: Collection of Scientific Papers of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel', 2012, issue 72, pp. 86–100 (In Russian).
8. *Normativnyye materialy dlya taksatsii lesov Belorusskoy SSR* [Normative materials for forest inventory of the Belorussian SSR]. Moscow, TsBNTI leskhoz Publ., 1984. 308 p. (In Russian).
9. Atroshchenko O. A., Demid N. P., Sidelnik N. Ya. *Upravleniye lesami i lesnymi resursami* [Management of forests and forest resources]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 83 p. (In Russian).
10. Strategic plan for the development of the forestry industry for the period from 2015 to 2030. Approved 23.12.2014 no. 06/201-271. Minsk, 2015. 20 p. (In Russian).
11. Anuchin N. P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest Taxation]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russian).
12. Verkhunov P. M. *Taksatsiya lesa* [Forest Taxation]. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2009. 396 p. (In Russian).
13. Baginskiy V. F. The course of growth of stands and its reflection in the tables and mathematical models. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 2011, no. 2, pp. 40–42 (In Russian).
14. Rogozin M. V., Razin G. S. Dynamics models and modeling of tree stands development. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2015, no. 2, pp. 55–70 (In Russian).
15. Rogozin M. V., Razin G. S. Tree stands development. Models, laws, hypotheses Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_24420793_86296975.pdf (accessed 10.10.2024) (In Russian).

Информация об авторах

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Таркан Андрей Владимирович – генеральный директор. Лесоустроительное республиканское унитарное предприятие «Белгослес». (ул. Железнодорожная, 27, 220089, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tarkan_andrei@mail.ru

Коцан Владимир Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: wolodia250@belstu.by

Пушкин Андрей Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pushkin@belstu.by

Цай Сергей Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tsai@belstu.by

Information about the authors

Tolkach Igor Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Tarkan Andrey Vladimirovich – General Director, Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27 Zheleznodorozhnaya str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tarkan_andrei@mail.ru

Kotsan Vladimir Vasil’evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wolodia250@belstu.by

Pushkin Andrey Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pushkin@belstu.by

Tsai Siarhey Siarheevich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsai@belstu.by

Поступила 15.10.2024

ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО

FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE

УДК 630*52:630*228.8(630*176.322.6):630*11

Д. К. Гарбарук¹, А. В. Углынец¹, А. В. Судник²

¹Полесский государственный радиационно-экологический заповедник

²Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси

СОСТОЯНИЕ ЧИСТЫХ ДРЕВОСТОЕВ СОСНЫ НА ЮГО-ВОСТОКЕ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В чистых сосновых насаждениях, произрастающих на территории зоны отчуждения Чернобыльской атомной электростанции и не подвергавшихся хозяйственному воздействию на протяжении 35 лет, за короткий промежуток времени (2014–2022 гг.) произошло резкое снижение устойчивости деревьев, поражение их вредителями и болезнями, что привело к образованию очагов усыхания древостоев. За 2016–2020 гг. погибло 4,6% насаждений сосновой формации, а очаги болезней и вредителей леса к 2020 г. охватили 6,3% ее площади. В 2022 г. индексы жизненного состояния чистых сосняков составляли 72,4–88,0%, средние баллы санитарного состояния насаждений – 1,40–2,58. Жизненное состояние древостоев сосны в очагах усыхания оценивалось индексами 5,8–75,0% (в среднем 38,8%), санитарного – 1,91–5,44 (в среднем 3,59). Лучшим состоянием характеризовались сосняки в изолированных лесных массивах с более богатыми почвами. Изменение показателей роста и продуктивности древостоев сосны, развитие в них очагов болезней и вредителей, а также гибель насаждений произошли под влиянием комплекса внешних факторов на фоне глобального потепления климата. В их основе лежало снижение влагообеспеченности территории, вызванное наложением локальной засухи 2014–2022 гг. на устойчиво пониженные уровни грунтовых вод еще до аварии на Чернобыльской АЭС. Развитию этих процессов способствовали широкое распространение чистых сосновых лесов искусственного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях и радиоактивное загрязнение местности, определяющее особенности режима территории зоны отчуждения и ведения в ней лесохозяйственной деятельности.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, зона отчуждения, сосновый древостой, продуктивность, санитарное состояние, фитопатогены, энтомовредители.

Для цитирования: Гарбарук Д. К., Углынец А. В., Судник А. В. Состояние чистых древостоев сосны на юго-востоке Беларуси в условиях отсутствия лесохозяйственной деятельности // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 24–36.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-3.

D. K. Garbaruk¹, A. V. Uglyanets¹, A. V. Sudnik²

¹Polesye State Radiation-Ecological Reserve

²V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus

THE STATE OF PURE PINE STANDS IN THE SOUTH-EAST OF BELARUS IN THE ABSENCE OF FORESTRY ACTIVITY

In pure pine stands growing in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant and not subjected to forestry impact for 35 years, in a short period of time (2014–2022) there was a sharp decrease in the stability of trees and their damage by pests and diseases, which led to the formation of pockets desiccation and the death of forest stands. In 2016–2020, 4.6% of the stands of the pine formation died, and forest disease and pest outbreaks covered 6.3% of its area by 2020. In 2022, vital state indices of pure pine forests were 72.4–88.0%, average scores of sanitary condition of stands were 1.40–2.58. The vital state of pine stands in pine forests in the centers of desiccation was estimated by 5.8–75.0% (38.8% on average) and sanitary indices – 1.91–5.44 (3.59 on average). The best by pine stands condition was characterized in isolated forest areas with richer soils. Changes in the growth and productivity indicators of pine stands, the development of disease and pest centers in them and the death of stands were caused by the influence of a complex of external factors against the background of global climate warming. They were based on a decrease in the moisture supply of the territory caused by the imposition of a local drought in 2014–2022 on steadily lowered groundwater levels even

before the Chernobyl accident. The development of these processes was facilitated by the wide spread of pure pine forests of artificial origin on former agricultural lands and radioactive contamination of the area, determining the peculiarities of the exclusion zone territory regime and forestry activities in it.

Keywords: Chernobyl Nuclear Power Plant, exclusion zone, pine forest, productivity, sanitary condition, phytopathogens, entomopests.

For citation: Garbaruk D. K., Uglyanets A. V., Sudnik A. V. The state of pure pine stands in the south-east of Belarus in the absence of forestry activity. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 24–36 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-3.

Введение. На юго-востоке Беларуси, включая зону отчуждения (ЗО) Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), последние десятилетия наблюдается увеличение среднегодовой температуры воздуха, физического испарения влаги, снижение увлажнения территории, рост частоты и глубины засушливых явлений [1–3]. Вследствие потепления и аридизации климата уменьшается количество осадков, понижаются уровни грунтовых вод, ухудшается влагообеспеченность почв весной, возникает острый дефицит почвенной влаги в летнее время. В лесах это ведет к ослаблению и снижению устойчивости деревьев, поражению их болезнями, вредителями, лесными пожарами, массовому усыханию и гибели древостоев, перераспределению лесопокрытой площади по породам и типам леса, снижению продуктивности и биоразнообразия лесных насаждений [4–6]. В перспективе в сосновых лесах ожидается изменение типологической структуры, класса бонитета и продуктивности насаждений в отдельных типах леса, прежде всего на автоморфных почвах [7–9].

В Беларуси для адаптации лесов к изменениям климата смоделирован комплекс хозяйственных мероприятий [6]. Под них не подпадает территория Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (далее заповедник), функционирующего в границах ЗО ЧАЭС. Из-за высоких доз радиации лесохозяйственная деятельность осуществляется только на его периферии – в экспериментально-хозяйственной зоне, занимающей 67,9 тыс. га, или 31,3%, площади заповедника, и в ограниченных объемах. В связи с особенностями ведения лесного хозяйства в заповеднике рубки главного пользования на его территории не осуществлялись. Рубки промежу-

точного пользования в среднем ежегодно проводились на 75,6 га (5,0% от запланированной площади). Средняя годовая площадь рубок ухода составляла 56,2 га (5,5% от запланированного объема), в том числе прореживаний – 4,3 га (1,7%), проходных рубок – 51,9 га (6,8%). Выборочные санитарные рубки в среднем за год выполнялись на 15,6 га (3,3%), рубки обновления и формирования – на 3,8 га (10,9%). Прочие рубки ежегодно осуществлялись на 187,9 га (74,1%) в обеих функциональных зонах заповедника способом прокладки квартальных просек и создания противопожарных разрывов (67,9% от всех прочих) [10].

В условиях современного изменения климата одними из наиболее уязвимых являются чистые сосновые леса [11]. В заповеднике они занимают 48,1% площади сосновой формации и большей частью приурочены к сухим и свежим песчаным почвам [10, 12], наиболее подверженным дефициту почвенной влаги.

Цель исследования – дать оценку современному состоянию чистых сосновых древостоев в условиях ограниченной лесохозяйственной деятельности в юго-восточной части Беларуси на примере территории ЗО ЧАЭС.

Основная часть. В качестве оценок состояния сосновых лесов использовали показатели текущих изменений параметров роста и продуктивности древостоев сосны, их жизненности и санитарного состояния.

Изучение текущих изменений таксационных показателей выполнены в чистых сосновых насаждениях разного происхождения на 8 постоянных пунктах наблюдения (ППН) радиационно-экологического мониторинга лесных экосистем ЗО ЧАЭС (табл. 1).

Таблица 1

Местонахождение ППН и даты таксации древостоев сосны

Шифр ППН	Лесничество	Квартал / выдел	Площадь ППН, га	Географические координаты		Дата таксации	
				широта (N)	долгота (E)	предыдущая	текущая
Вр-1	Воротецкое	29 / 19	0,25	51°45'31,5"	30°00'46,9"	20.06.2014	01.07.2021
Вс-1	Верхнеслободское	33 / 21	0,25	51°37'25,7"	30°12'23,3"	13.08.2014	28.07.2021
Гн-1	Оревичское	43 / 18	0,25	51°38'58,3"	29°48'25,5"	19.08.2016	01.07.2022
Кл-1	Крюковское	26 / 9	0,25	51°33'17,1"	30°13'34,9"	27.09.2017	30.07.2021
Кл-2	Крюковское	24 / 15	0,25	51°33'21,3"	30°13'11,7"	28.09.2017	08.06.2022
Кр-1	Крюковское	43 / 1	0,25	51°31'51,8"	30°10'41,7"	17.05.2018	23.06.2022
Мс-1	Радинское	132 / 6	0,25	51°30'27,4"	30°01'49,6"	20.07.2016	02.07.2021
Пг-1	Бабчинское	53 / 8	0,25	51°36'05,3"	29°54'33,5"	18.08.2016	24.06.2022

Закладку ППН осуществляли в 2014–2018 гг. в соответствии с *Техническим кодексом устоявшейся практики 498-2013 (02080) “Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения” (Беларусь)*. Первая таксация древостоев выполнена в год закладки ППН, повторная – в 2021–2022 гг.

Срок между наблюдениями в отдельных насаждениях составил от 4 до 7 лет. Отметим, что в данный промежуток времени в восточной части Полесья наблюдалось масштабное усыхание сосняков, вызванное вспышками массового размножения стволовых вредителей с доминированием вершинного короеда, пик которого пришелся на 2018 г., и распространением корневой губки [13].

Таксацию древостоев и определение таксационных показателей производили в соответствии с методами, описанными в источниках [14, 15]

с использованием справочника [16]. Результаты таксации и параметры изменений таксационных показателей древостоев сосны приведены в табл. 2.

Направления и темпы изменений сосновых древостоев оценивали по разнице показателей их роста и продуктивности на первую и вторую даты наблюдений.

Исследования жизненного и санитарного состояния древостоев выполняли в 2022 г. на 11 пунктах наблюдения (ПН) и 46 точках учета 7 мониторинговых маршрутов (ММ) общей протяженностью 25,8 км (рисунок), заложенных в рамках организации *комплексного мониторинга лесных экосистем на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения* (КМЛЭРЗ), а также по материалам лесоустройства [10] и литературным данным.

Таблица 2

Изменение таксационных показателей древостоев сосны

Шифр ППН	Год таксации	Тип леса / ТЛУ	Состав древостоя	Воз- раст, лет	Средние		Бони- тет	Густота, шт./га	Сумма пло- щадей сече- ний, м²/га	Полнота	Запас, м³/га
					высота, м	диаметр, см					
Вр-1	2014	Сосняк верес- ковый / А ₁₋₂	10С	73	21,3	28,5	II	596	37,9	1,09	389
	2021		10С	80	23,5	30,7		524	38,5	1,00	410
Изменение, ± %			–	+7	+2,2	+2,2	–	–72	+0,6	–0,09	+21
			–	–	+10,3	+7,7		–12,1	+1,6	–8,3	+5,4
Кл-2	2017	Сосняк мши- стый / А ₂	10С	75	26,5	33,6	I	564	49,9	1,2	581
	2022		10С	80	25,8	33,0		552	47,2	1,2	531
Изменения, ± %			–	+5	–0,7	–0,6	–	–12	–2,7	0	–50
			–	–	–2,6	–1,8		–2,1	–5,4	0	–8,6
Вс-1	2014	Сосняк чер- ничный / А _{3В₃}	9С1Б	61	25,6	32,5	I	469	38,9	1,20	439
	2021		10С+Б,Ос	68	26,9	35,5		432	38,1	1,00	436
Изменение, ± %			–	+7	+1,3	+3,0	–	–37	–0,8	–0,20	–3
			–	–	+5,1	+9,2		–7,9	–2,1	–16,7	–0,7
Мс-1	2016	Сосняк мши- стый / А ₂	10С	41	13,4	11,9	II	2912	32,3	1,07	221
	2021		10С	46	14,8	12,9		2572	33,8	0,99	285
Изменение, ± %			–	+5	+1,4	+1,0	–	–340	+1,5	–0,08	+64
			–	–	+10,4	+8,4		–11,7	+4,6	–7,5	+29,0
Гн-1	2016	Сосняк мши- стый / А ₂	10С	49	16,0	15,4	II	2316	46,4	1,46	356
	2022		10С	55	20,4	17,7	I	1852	45,8	1,22	427
Изменения, ± %			–	+6	+4,4	+2,3	+I	–464	–0,6	–0,24	+71
			–	–	+27,5	+14,9	–	–20,0	–1,3	–16,4	+19,9
Кл-1	2017	Сосняк мши- стый / А ₂	10С	49	14,8	15,0	II	2304	51,6	1,54	452
	2021		10С	53	15,5	15,4		2052	38,0	1,10	329
Изменение, ± %			–	+4	+0,7	+0,4	–	–252	–13,6	–0,44	–123
			–	–	+4,7	+2,7		–10,9	–26,4	–28,6	–27,2
Кр-1	2018	Сосняк мши- стый / А ₂	10С	45	15,9	17,5	II	1969	47,7	1,45	375
	2022		10С	49	17,1	17,9		1820	45,7	1,28	382
Изменения, ± %			–	+4	+1,2	+0,4	–	–149	–2,0	–0,17	+7
			–	–	+7,5	+2,3		–7,6	–4,2	–11,7	+1,9
Пг-1	2016	Сосняк мши- стый / А ₂	10С	54	18,2	16,9	II	2304	51,6	1,54	452
	2022		10С	60	17,8	16,8		256	5,7	0,2	51
Изменения, ± %			–	+6	–0,4	–0,1	–	2050	–45,9	–1,52	–401
			–	–	–2,2	–0,6		–89,0	–89,0	–99,7	–88,7

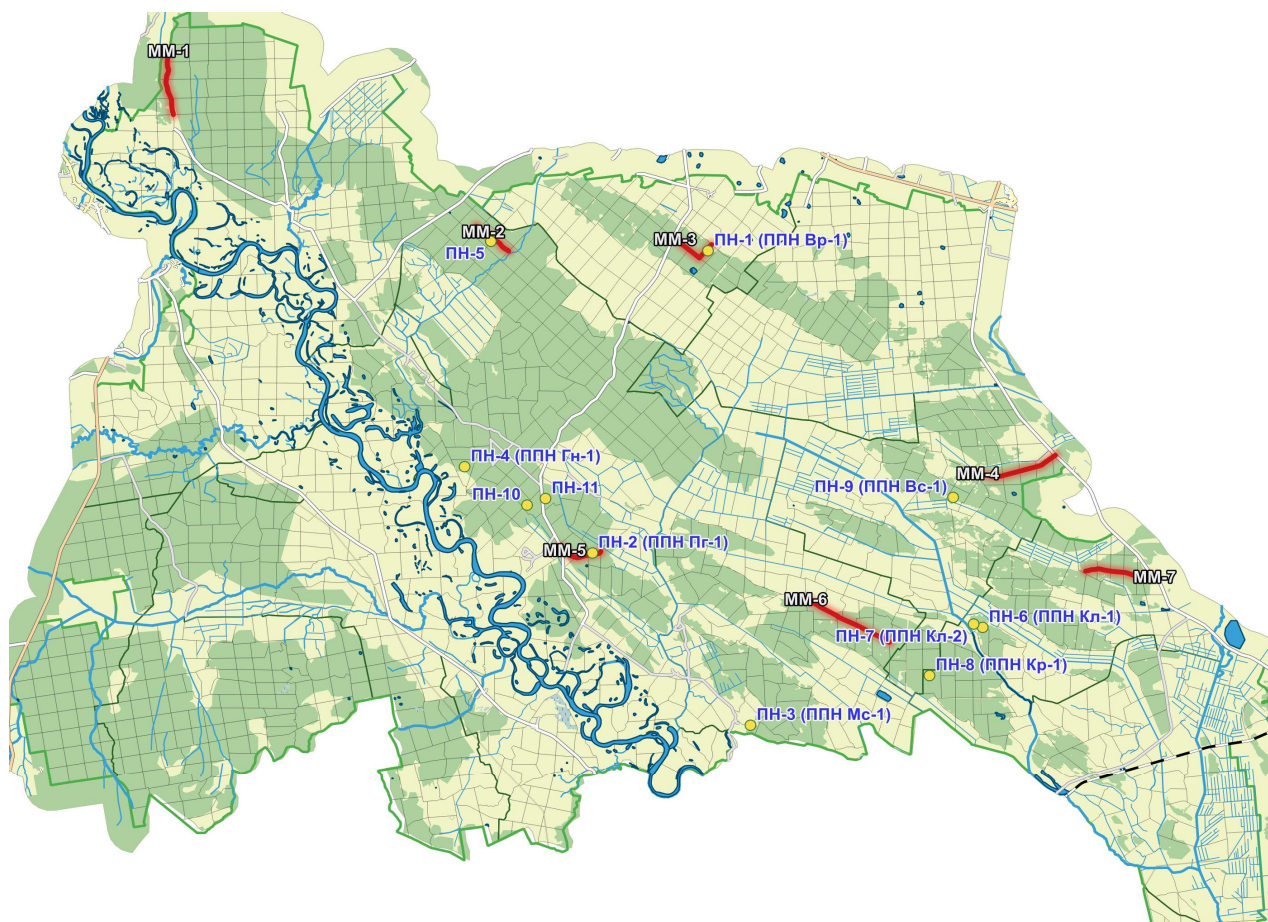


Схема расположения объектов исследования

В качестве ПН КМЛЭРЗ использовали 8 ППН радиационно-экологического мониторинга и 3 дополнительно заложенных ПН – один в сосняке вересковом, два в сосняках черничных. Точки учета для наблюдения за очагами усыхания насаждений на мониторинговых маршрутах расположены в разных лесных массивах.

Жизненное состояние древостоев на ПН и точках учета рассчитывали через индекс их состояния по формуле [17]

$$\text{ИС} = \frac{100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4}{N}, \quad (1)$$

где ИС – индекс жизненного состояния древостоя; n_1, n_2, n_3, n_4 – количество здоровых (без признаков ослабления), ослабленных, сильно ослабленных, усыхающих деревьев соответственно; N – общее количество деревьев (включая сухостой).

Отнесение насаждений к категориям жизненного состояния осуществляли на основе модифицированной шкалы В. А. Алексеева [17], в соответствии с которой древостои с индексом состояния 90–100% относятся к категории здоровых, 80–89% – здоровых с признаками ослабления, 70–79% – ослабленных, 50–69% – поврежденных, 20–49% – сильно поврежденных, менее 20% – разрушенных.

Санитарное состояние древостоев на ПН и в точках учета определяли по средневзвешенной категории состояния (средний балл состояния), рассчитываемой по формуле

$$L_n = \frac{\sum lkn}{N}, \quad (2)$$

где L_n – средневзвешенная категория состояния (средний балл состояния) насаждения; lk – балл деревьев для определения категории состояния (1 – без признаков ослабления; 2 – ослабленные; 3 – сильно ослабленные; 4 – усыхающие; 5 – свежий сухостой; 6 – старый сухостой); n – количество деревьев данной категории состояния; N – количество деревьев на ПН КМЛЭРЗ или в точке учета. Периодически повторяющаяся массовая гибель лесов в Беларуси во многом определена цикличностью погодно-климатических условий, главным образом засушливых явлений [11]. На фоне глобального потепления климата последнее усыхание сосновых лесов в Полесье вызвано комплексом факторов, включающих широкомасштабные гидротехнические мелиорации земель в прошлом, снижение уровней грунтовых вод, нарушение гидрологического режима почв, увеличение притока прямой солнечной радиации, обеспечивших дефицит почвенной влаги и обусловивших

ослабление насаждений и поражение их корневыми гнилями и энтомофитными вредителями, прежде всего стволовыми [7, 18]. Установлено, что наиболее восприимчивы к стволовым вредителям чистые сосняки мшистые Ia и I классов бонитета старше 40 лет независимо от происхождения [13]. Пик массовой гибели сосновых лесов пришелся на 2018 г. как в регионе [13], так и в ЗО ЧАЭС [10].

Усыхание и отпад деревьев в чистых сосняках ЗО ЧАЭС происходили по-разному.

Сосняки естественного происхождения вересковый (ППН Вр-1) и мшистый (ППН Кл-2) на дату закладки ППН были чистыми по составу, в сосняке черничном (ППН Вс-1) присутствовала примесь березы (10%). Их древостои в 61–75-летнем возрасте были высокополнотными (1,09–1,2) густотой 469–596 шт./га со стволовыми запасами 390–580 м³/га. В каждом из этих насаждений в той или иной мере проявились процессы усыхания. За 5–7 лет в них погибло от 2,1 до 12,1% деревьев, что повлекло за собой определенные изменения в таксационных характеристиках древостоев (табл. 2).

В чистом 80-летнем сосняке вересковом (ППН Вр-1) за 7 лет произошло усыхание 12,1% деревьев преимущественно на западной границе ППН, находящейся на окраине очага усыхания смежного древостоя, в основном по причине ослабления и потери резистентности в связи с многолетней засухой, дефицитом почвенной влаги и последующим заселением стволовыми вредителями. Вследствие изреживания относительная полнота древостоев снизилась до нормальной. При этом увеличились средние показатели роста деревьев в высоту (на 10,3%) и по диаметру (на 7,7%), а также абсолютная полнота древостоев (на 0,6%). В результате этих изменений был обеспечен несущественный (+5,4%) прирост стволового запаса.

В 80-летнем сосняке мшистом (ППН Кл-2) за 5 лет выпало всего 2,1% деревьев на северо-восточной окраине ППН (граница очага). При этом понизились все таксационные показатели древостоев, кроме полноты, сохранившейся на том же уровне за счет синхронного снижения высоты и суммы площадей сечений. Стволовый запас сократился на 50 м³/га, или на 8,6%.

В 68-летнем сосняке черничном (ассоциация орляково-черничная) (ППН Вс-1) за 7 лет ощутимо снизилось количество деревьев (на 7,9%), а относительная полнота древостоев уменьшилась до полноты нормального насаждения. В его составе сократилась доля березы вследствие ветровала деревьев и появилась осина за счет выхода отдельных ее растений в основной ярус. В целом общая доля примеси мелколиственных пород незначительно уменьшилась. Диаметр деревьев сосны увеличился – на 9,2%, высота – на 5,1%.

Прирост высоты соответствовал развитию нормального насаждения. Но так как прирост по диаметру не компенсировал потерю площади поперечного сечения стволов отмерших деревьев, то сумма площадей сечений живых стволов незначительно сократилась, что не позволило древостою нарастить стволовый запас.

В 2014–2018 гг. 41–54-летние **сосняки мшистые искусственного происхождения** были большей частью перегущенными (1969–2912 шт./га), высокополнотными (1,07–1,54), со стволовыми запасами древесины 221–452 м³/га. За 4–6 лет их древостои значительно изредились как за счет естественного отпада деревьев (ППН Мс-1, Гн-1), так и в результате очагового их усыхания (ППН Кл-1, Кр-1), в которых отпало 149–464 (7,6–20,0%) деревьев. На ППН Пг-1 древостой деградировал до состояния редины с полнотой 0,2. Сохранившиеся от прежнего насаждения 11,0% деревьев характеризуются несколько пониженными показателями средней высоты и диаметра, а их запас уменьшился на 88,7%.

Изреживание древостоев и сопутствующее ослабление внутривидовой конкуренции привело к стимулированию роста оставшихся деревьев, прежде всего по диаметру. В древостоях ППН Мс-1 и Гн-1 их средняя высота за 5 и 6 лет увеличилась на 10,4 и 27,5%, диаметр – на 8,4 и 14,9 соответственно. Самый высокий прирост деревьев в высоту и по диаметру оказался в наиболее сильно изредившемся насаждении (ППН Гн-1). Отклонения абсолютной полноты древостоев были небольшими (+4,6% и –1,3%). Значимое уменьшение их относительной полноты (на 7,5 и 16,4%) не являлось критическим – она не опустилась ниже уровней нормальных насаждений. В итоге за счет существенного прироста деревьев запасы стволовой древесины выросли на 29 и 20%.

В насаждениях, подверженных усыханию деревьев из-за внешних воздействий, густота древостоев за 4 года снизилась на 7,6 и 10,9%, средние высоты выросли на 7,5 и 4,7%, средние диаметры увеличились на 2,3 и 2,7%. Сумма площадей сечений деревьев сократилась на 4,2 и 26,4%. Относительная полнота уменьшилась на 11,7 и 28,6%, но продолжала оставаться высокой – 1,28 и 1,10. Стволовый запас или не изменился (+1,9%) или резко снизился (–27,2%). Тем не менее древостои остаются перегущенными и достаточно продуктивными.

Более информативно изреживание древостоев оценивают темпы (скорость) усыхания деревьев. В исследованных насаждениях они составляли 2–77 шт./год (0,4–3,3%/год), в более редких средневозрастных и припевающих насаждениях естественного происхождения – 2–10 деревьев (0,4–1,7%) в год, в том числе в сосняке мшистом – 0,4% в год, в черничном –

1,1% и в вересковом – 1,7%. В перегушенных сосняках мшистых III класса возраста искусственного происхождения скорость усыхания деревьев варьировала в пределах 30–77 шт./год (1,3–3,3%). Выявлена слабая корреляция Пирсона ($R = 0,49$) между темпами изреживания древостоев и их густотой на начало наблюдений. Изреживание древостоев и увеличение их средних диаметров и высот происходило разными темпами, что по-разному отразилось на изменении сумм площадей сечений древостоев. Последние снижались при опережении темпов отпада деревьев над скоростью их прироста по диаметру. Относительные полноты древостоев уменьшились во всех насаждениях, но не опустились ниже 1.

Приспевающие сосняки вересковый и черничный естественного происхождения и 49–55-летние сосняки мшистые искусственного происхождения после 35-летнего отсутствия лесохозяйственной деятельности по величинам стволовых запасов были близки к данным таблиц хода роста нормальных сосновых насаждений, а 80-летнее естественное насаждение и 60-летние культуры сосняка мшистого существенно превышали значения запасов этих таблиц (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение запасов древостоев на ППН с запасами нормальных сосновых древостоев

ППН	Тип леса	Происхождение	Возраст, лет	Стволовой запас, м ³ /га			
				на ППН	по таблицам хода роста		
					[16]	[19]	[15]
Вр-1	С. вер.	Естественное	80	410	395	422	433
Вс-1	С. чер.	Естественное	68	436	438	464	466
Кл-2	С. мш.	Естественное	80	531	395	391	432
Мс-1	С. мш.	Искусственное	46	285	250	247	326*
Кр-1	С. мш.	Искусственное	49	382	265	272	395*
Кл-1	С. мш.	Искусственное	53	329	284	290	346*
Гн-1	С. мш.	Искусственное	55	427	293	299	425*
Пг-1а	С. мш.	Искусственное	60	530	316	321	447*

* Запас древостоев искусственного происхождения.

Очевидно, что естественное развитие чистых сосновых насаждений при отсутствии внешних

воздействий ведет к формированию нормальных древостоев независимо от их происхождения.

Массовое региональное усыхание сосновых лесов в 2015–2018 гг. [13] в значительной мере затронуло и территорию ЗО ЧАЭС. За 4–7 лет из 8 исследуемых древостоев сосны один полностью распался, в пяти наблюдались очаговые усыхания деревьев и только в двух протекали процессы естественного отпада деревьев.

Рассмотрим масштабы повреждений и гибели лесов сосновой формации в заповеднике (ЗО ЧАЭС), в котором она занимает 39,3% лесопокрытой площади [10]. В ее составе доминирует экологическая группа (субформация) суходольных сосняков (99,8% площади формации), представленная большей частью вересковым, мшистым и черничным типами леса (86,6%) [12]. В возрастном аспекте преобладают средневозрастные насаждения при значительном участии молодняков и приспевающих древостоев (табл. 4).

В связи с неблагоприятными погодными условиями биологическая устойчивость лесов в восточной части Полесья в 2017–2019 гг. резко снизилась. В ряде лесхозов этого региона удельный вес древостоев сосны I класса биологической устойчивости находился на уровне 47,4–68,8%, в то же время площадь насаждений III класса биологической устойчивости уменьшилась на 4,3% [13].

В сосновой формации наиболее высокой устойчивостью обладают сосняки естественного и искусственного происхождения на бывших лесных землях. Далее она последовательно понижается в насаждениях сосны естественного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях и в насаждениях искусственного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях, а также со снижением доли примеси в составе древостоев независимо от перечисленных выше категорий [11]. В ЗО ЧАЭС более половины сосновых лесов, произрастающих преимущественно на бывших сельскохозяйственных землях, имеет искусственное происхождение (табл. 4). Эти насаждения находятся в «группе риска» по отношению к воздействию неблагоприятных экологических факторов.

Таблица 4

Возрастная структура суходольных сосняков (по [12])

Класс возраста	I	II	III	IV	V	VI	VII и выше	Итого
Группа возраста	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые	Перестойные			
Всего, га	6011,9	10 374,9	21 986,7	10 220,0	3275,7	401,9	60,4	52 331,9
%	11,5	19,8	42,0	19,5	6,3	0,8	0,1	100,0
В том числе искусственного происхождения, %	5,5	15,0	26,3	5,6	0,5	–	–	52,9

Согласно материалам лесоустройства заповедника [10] насаждения сосны I класса биологической устойчивости на 2020 г. занимали 86,8% площади формации, II класса – 10,1%, III класса – 3,1%. Опираясь на критерии удовлетворительного состояния лесных формаций (доля древостоев I класса биологической устойчивости должна превышать 85%, II и III классов составлять менее 15 и 0,5% соответственно [20]), можно говорить о повышении устойчивости сосновых древостоев в ЗО ЧАЭС. На стабилизацию лесопатологических процессов к 2020 г. на смежных с ней территориях указывается в работе [13].

Жизненное состояние насаждений. Индексы жизненного состояния древостоев сосны на 11 ПН КМЛЭРЗ варьировали в пределах от 72,4 (ослабленные) до 88,0% (здоровые с признаками ослабления), составляя в среднем 82,7% (табл. 5). К категории ослабленных были отнесены по одному насаждению сосняков верескового и мшистого, остальные 9 (81,8%) древостоев – к категории здоровых с признаками ослабления.

Индексы жизненного состояния древостоев сосны в очагах усыхания изменяются в широком диапазоне значений (5,8–75,0%) и относятся к категориям ослабленных (2,2%), поврежденных (8,7%), сильно поврежденных (84,8%) и разрушенных (4,3%), в среднем составляя 39% (табл. 5) и соответствуя в целом категории сильно поврежденных древостоев.

Анализ жизненного состояния древостоев сосны в очагах усыхания по отдельным лесным массивам (лесничествам) на мониторинговых маршрутах, указывает на некоторые различия ин-

дексов их состояния в зависимости от территориальной локализации (рисунок (см. с. 27), табл. 6). Наиболее низкий средний индекс жизненного состояния древостоев в очагах усыхания выявлен на крайнем северо-западе заповедника (Тулговичское лесничество) – 31,7%. Юго-восточнее, в центре и на юге заповедника (Новопокровское, Бабчинское и Радинское лесничества) он повышается до 34,8–37,3%. На севере (Воротецкое лесничество) и востоке (Верхнеслободское и Крюковское лесничества) заповедника индексы жизненного состояния древостоев возрастают до 42,7–47,1%. Вероятно, ослабление деревьев сосны началось с юго-востока и шло в направлении северо-запада заповедника. В данный момент его очаги на юго-востоке стабилизировались, а на северо-западе этот процесс продолжается. Что касается соснового массива Воротецкого лесничества, то он, с одной стороны, характеризуется более богатыми почвами [21], с другой – является обособленным, окруженным лиственными лесами, кустарниками, луговыми и болотными сообществами.

Санитарное состояние насаждений. До аварии на ЧАЭС примыкающие к ней леса характеризовались высоким уровнем санитарно-оздоровительных и лесозащитных мероприятий, а сосновые древостои в современных границах заповедника обладали высокой биологической устойчивостью, выраженной средними баллами их состояния 1,2–1,7 [22]. После прекращения лесохозяйственной деятельности в связи с аварией на ЧАЭС произошло значительное ухудшение состояния насаждений данной породы.

Таблица 5

Статистические показатели состояния сосновых древостоев

Состояние древостоя	Место учета	<i>n</i>	min–max	$M \pm m$	Ci	σ	Cv	p	Me
Жизненное	Пункты наблюдения	11	72,4–88,0	$82,7 \pm 1,4$	79,6–85,9	4,7	5,7	1,7	82,7
	Очаги усыхания	46	5,8–75,0	$38,8 \pm 1,7$	35,4–42,3	11,5	29,5	4,4	39,5
Санитарное	Пункты наблюдения	11	1,40–2,58	$1,72 \pm 0,11$	1,48–1,97	0,36	20,8	6,3	1,59
	Очаги усыхания	46	1,91–5,44	$3,59 \pm 0,09$	3,41–3,76	0,58	16,2	2,4	3,55

Примечание. *n* – количество наблюдений; min и max – минимальное и максимальное значения; *M* – среднее арифметическое значение; $\pm m$ – стандартная ошибка среднего значения; *Ci* – доверительный интервал на 95%-ном уровне значимости; σ – среднее квадратическое отклонение; *Cv* – коэффициент вариации, %; *p* – точность определения средней арифметической, %; *Me* – среднее срединное значение, медиана.

Таблица 6

Показатели состояния древостоев сосны в очагах усыхания

Номер мониторингового маршрута	Лесничество	Количество точек учета	Индекс жизненного состояния, %		Балл санитарного состояния	
			пределы	средний	пределы	средний
1	Тулговичское	8	5,8–54,1	31,7	2,90–5,44	4,01
2	Новопокровское	8	20,8–41,6	34,8	3,33–4,33	3,68
6	Радинское	5	31,6–45,2	36,9	3,26–3,68	3,71
5	Бабчинское	5	27,7–44,0	37,0	3,33–4,17	3,68
3	Воротецкое	9	27,3–58,2	43,7	2,49–4,18	3,32
7	Крюковское	6	35,2–48,3	42,7	3,18–3,79	3,43
4	Верхнеслободское	5	42,5–75,0	47,1	1,91–3,69	3,23
Все	–	46	5,8–75,0	39,1	1,91–5,44	3,58

В 2017 г. средний индекс санитарного состояния сосновых древостоев в 30-километровой зоне ЧАЭС снизился на 43,7% и варьировал в зависимости от типа леса, рельефа местности, изменения уровней грунтовых вод. Наиболее устойчивыми оказались сосняки мшистые, произрастающие в средней части склона холма (индекс санитарного состояния 2,15), и сосняки лишайниковые, находящиеся на его вершине (2,46). Наименьшей устойчивостью характеризовались сосняки мшистые на ровных участках, подвергшиеся нападению короеда (3,41–3,93), и сосняки осоковые, произрастающие в понижениях и испытывавшие резкое понижение уровня грунтовых вод (3,52). Средний балл санитарного состояния сосняка черничного, локализованного в нижней части склона, составлял 2,64 [23, 24].

Современные средние баллы санитарного состояния древостоев сосны на ПН КМЛЭРЗ находятся в диапазоне 1,40–2,58 (в среднем 1,72) (см. табл. 5), в том числе в двух сосняках вересковых – 1,67–2,58 (2,12), в шести сосняках мшистых – 1,40–2,13 (1,60), в трех сосняках черничных – 1,51–1,94 (1,71).

Средние баллы санитарного состояния древостоев сосны в очагах усыхания варьируют от 1,91 в ослабленных и находящихся на начальной стадии усыхания древостоях до 5,44 – в разрушенных. Достаточно надежно (с точностью 2,4%) их характеризует среднеарифметический балл санитарного состояния насаждений (3,59), совпадающий с медианным – 3,55 (табл. 5).

В очагах усыхания сосновых древостоев на 6 маршрутах из 7 зарегистрированы относительно близкие средние баллы санитарного состояния насаждений (3,23–3,71), а распределение массивов по данному индексу в пространственном аспекте повторяет их территориальную локализацию по индексу жизненного состояния (табл. 6).

По данным лесоустойчивости [10] площадь сосновых лесов с нарушенной и утраченной устойчивостью в заповеднике в 2020 г. составляла 10 919,7 га. Вызавшими их причинами названы вредители (7693,5 га, или 70,5% площади формации) и болезни (1141,0 га, или 10,4%) леса, лесные пожары (154,8 га, или 1,4%) и прочие повреждения (ветровалы, буреломы, снеголомы и др.), обусловленные изменением погодноклиматических условий (1930,4 га, или 17,7%).

В основе нарушения биологической устойчивости насаждений сосны и ее утраты лежит физиологическое ослабление деревьев и снижение резистентности к неблагоприятному воздействию внешних факторов в результате ухудшения влагообеспеченности территории. По данным научно-исследовательской станции Масаны, расположенной на территории ЗО ЧАЭС, за 9 лет локальной засухи (2014–2022 гг.) в сравнении с

предыдущим периодом (1997–2012 гг.) произошло повышение среднегодовой температуры воздуха на 1°C, что при уменьшении среднегодового количества осадков на 3,8% привело к снижению коэффициента увлажнения территории в среднем на 20% (табл. 7).

Таблица 7

Показатели тепло- и влагообеспеченности территории зоны отчуждения ЧАЭС

Год, период	Метеорологический показатель		
	средняя температура воздуха, °C	количество осадков, мм	коэффициент увлажнения территории по Иванову
1997–2012 (по [25])	7,8	609	1,05
2013	8,2	782	1,47
2014	8,4	450	0,65
2015	8,7	454	0,54
2016	8,7	722	1,08
2017	8,4	652	1,04
2018	8,7	557	0,70
2019	9,3	377	0,55
2020	10,0	622	0,91
2021	8,2	519	0,75
2022*	8,4	698	0,87
2014–2022	8,8	586	0,79

*По данным метеостанции Брагин.

Накопленный дефицит почвенной влаги на автоморфных почвах обусловил сильное ослабление деревьев сосны, что привело к интенсивному размножению болезней и вредителей леса, образованию и расширению их очагов. В сосновых лесах ЗО ЧАЭС их площадь возрастала с 2016 г., достигнув в 2020 г. 3283 га. Особенно быстро увеличивались очаги вредителей леса, на которые к концу периода приходилось 65,4% площади, в то время как площадь очагов болезней леса (34,6%), включая преобладающую среди них корневую губку (96,6% от площади очагов болезней), оставалась относительно стабильной (табл. 8).

Таблица 8

Площадь очагов вредителей и болезней за 2016–2020 гг., га (по [10])

Показатель	Год				
	2016	2017	2018	2019	2020
Всего вредителей и болезней лесов	1290	2062	2798	2887	3283
В том числе:					
вредителей лесов	21	885	1655	1741	2146
болезней лесов	1269	1177	1143	1146	1137
из них корневой губки	1212	1120	1086	1108	1099

В 2017–2019 гг. сосняки поражали в основном стволовые вредители, среди которых доминировал вершинный короед. К 2019 г. темпы их распространения существенно снизились. Распространение большого соснового лубоеда было мало-значимым и стабильным, его очаги не прогрессировали. Сосняки, пораженные хвоегрызущими вредителями, были выявлены на несущественных площадях. Среди болезней леса доминировала корневая губка, смоляной рак сосны встречался на небольших участках (табл. 9).

Таблица 9
Площадь очагов вредителей и болезней
по видам за 2017–2019 гг., га (по [10])

Показатель	Год		
	2017	2018	2019
Общая площадь очагов вредителей леса	865,6	1637,5	1723,2
В том числе:			
вершинного короеда	865,1	1637,0	1722,7
большого соснового лубоеда	0,5	0,5	0,5
Общая площадь очагов болезней леса	1127,7	1093,2	1110,1
В том числе:			
корневой губки	1120,5	1086,0	1108,2
смоляного рака	7,2	7,2	1,9

В 2016–2020 гг. в ЗО ЧАЭС погибло более 3,5 тыс. га сосновых насаждений, в том числе от болезней лесов – 31% этой площади, от вредителей – 69% (табл. 10).

Таблица 10
Динамика площадей погибших сосновых
насаждений за 2016–2020 гг., га (по [10])

Показатель	Год					
	2016	2017	2018	2019	2020	2016–2020
Всего погибло лесных насаждений	2	992	1133	519	886	3532
В том числе:						
от болезней лесов	2	102	253	329	408	1094
от вредителей лесов	0	890	880	190	478	2438

Размножению и расселению энтомовредителей и распространению болезней способствовали высокая доля чистых одновозрастных древостоев сосны искусственного происхождения, большей частью произрастающих на бывших сельскохозяйственных землях [12], невозможность утилизации порубочных остатков огнем способом из-за высокого загрязнения территории радионуклидами, высокая захламенность сосновых насаждений и низкие объемы санитарно-оздоровительных мероприятий [10].

Обработка таксационных материалов показала, что средняя захламенность сосновых лесов

заповедника на автоморфных почвах в 2020 г. составляла 1,6 м³/га, в том числе непосредственно захлавленных – 6,4 м³/га, количество сухостоя – 2,6 и 8,2 м³/га соответственно. В сосняке черничном эти показатели составляли 0,8 и 7,2 м³/га, 1,7 и 12,0 м³/га соответственно. За ревизионный период объем выборочных санитарных рубок в заповеднике выполнен на 3,3% по площади и на 8,4% – по ликвидному запасу от запланированного. Очистка леса от захламенности при за-проектированном ежегодном объеме 44,0 га и объеме заготовки древесины 700 м³ составила всего 7,9 га (18,0% от запланированного) с заготовкой 300 м³ древесины (2,8%), или 38 м³/га. В период массового усыхания древостоев (2017–2019 гг.) биологические меры защиты лесов применены на 192 га, выборочные санитарные рубки – на 41,3 га, уборка захламенности – на 2,5 га, сплошные санитарные рубки – на 340,2 га, химическая обработка заготовленной древесины в лесу – на 4580 м³ [10].

Заключение. За время локальной засухи 2014–2022 гг. в чистых сосняках ЗО ЧАЭС в условиях почти полного отсутствия лесохозяйственной деятельности на протяжении 35 лет произошло сильное ослабление и снижение устойчивости деревьев, поражение их вредителями и болезнями, что привело к образованию очагов поражения древостоев, ухудшению их жизненного и санитарного состояния и массовой гибели.

За короткий период древостои сосны резко изредились. Интенсивность этого процесса зависела от силы влияния внешних факторов. Направления и величины изменений показателей роста и продуктивности древостоев определялись соотношением скорости отпада деревьев с темпами прироста сохранившихся растений. Большинство древостоев продолжает оставаться густыми и высокополнотными. По полнотам и стволовым запасам они соответствуют или приближаются к «нормальным» насаждениям сосны.

Древостои сосны в 2022 г. по жизненному состоянию в среднем оценивались как здоровые с признаками ослабления, в очагах усыхания – от ослабленных до разрушенных. Санитарное состояние их характеризовалось средними баллами 1,40–2,58, в очагах усыхания – 1,91–5,44.

Показатели жизненного и санитарного состояния древостоев сосны в очагах усыхания большинства лесных массивов были близкими и незначительно улучшались с юго-востока на северо-запад. Положительное влияние на их состояние оказывали изолированность массивов и более высокое плодородие почв.

За 2016–2020 гг. погибло 4,6% сосновых насаждений от площади сосновой формации, а очаги болезней и вредителей к 2020 г. распространились на 6,3% ее площади.

Ослабление деревьев сосны, ухудшение состояния и гибель ее древостоев в ЗО ЧАЭС произошло в результате воздействия комплекса факторов: снижения влагообеспеченности территории, обусловленного понижением уровня грунтовых вод, вызванного широкомасштабной гидротехнической мелиорацией болот и заболоченных земель в дочернобыльское время и воздействием локальной засухи; поражения насаждений стволовыми вредителями и болезнями; преобладания чистых древостоев сосны искусственного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях; оставления на перегнивание загрязненных радионуклидами порубочных остатков;

отсутствия санитарно-оздоровительных и защитных мероприятий в заповедной зоне и крайне низких их объемов в экспериментально-хозяйственной.

Для поддержания жизненного и санитарного состояния сосняков в ЗО ЧАЭС на должном уровне необходимо обеспечивать выполнение всего запроектованного комплекса санитарно-оздоровительных мероприятий в лесах заповедника и в последующем внедрять и осуществлять комплексный мониторинг лесных экосистем на территории с сильным уровнем радиоактивного загрязнения с использованием дистанционных методов лесопатологического надзора.

Список литературы

1. Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Мельник В. И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. Минск: Энциклопедикс, 2020. 264 с.
2. Бровка Ю. А., Буяков И. В. Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата // Природопользование. 2020. № 2. С. 5–18. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
3. Данилович И. С., Мельник В. И., Гейер Б. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причины, следствия, прогнозы // Журнал Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2020. № 1. С. 3–13. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-1-3-13.
4. Багинский В. Ф., Лапицкая О. В. Некоторые проблемы адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата // Навуковий вісник НЛТУ України. 2009. Вип. 19.14. С. 7–17.
5. Стратегия адаптации лесного хозяйства Республики Беларусь к изменению климата на период до 2050 года. Минск, 2011. 119 с.
6. Экологоориентированное развитие лесного хозяйства Беларуси в условиях климатических изменений / И. В. Войтов [и др.]. Минск: БГТУ, 2019. 201 с.
7. Продукционный потенциал сосны на полугидроморфном эдафотопе Белорусского Полесья в изменяющихся климатических условиях / Е. В. Матюшевская [и др.] // Журнал Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2020. № 1. С. 36–44. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-1-36-44.
8. Багинский В. Ф. Особенности хода роста древостоев сосны в Белорусском Полесье // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2016. Вып. 76. С. 307–317.
9. Лазарева М. С. Климатически детерминированная динамика типологической структуры сосняков Беларуси в практику лесоустройства // Лесная таксация и лесоустройство. 2008. № 1. С. 115–122.
10. Лесоустроительный проект государственного природоохранного научно-исследовательского учреждения «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» Министерства по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь на 2021–2030 гг. Минск, 2020. 292 с.
11. Ермохин М. В., Сазонов А. А., Игнатьев Я. К. Биологическая устойчивость лесов различного происхождения // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 49–60. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-06.
12. Гарбарук Д. К., Углянец А. В. Структура, продуктивность и прогноз изменения запасов стволовой древесины сосняков Полесского государственного радиационно-экологического заповедника // Ботаника (исследования): сб. науч. тр. Ин-та эксперимент. ботаники Нац. акад. наук Беларуси. Минск, 2019. Вып. 48. С. 126–140.
13. Состояние основных насаждений и анализ встречаемости короедного усыхания в отдельных лесхозах Гомельского Полесья в 2017–2020 гг. / Д. А. Бабуль [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 112–120. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-246-14-112-120.
14. Анучин Н. П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 561 с.
15. Справочник таксатора / В. С. Мирошников [и др.]. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.
16. Таксационно-лесоустроительный справочник / М. В. Кузьменков [и др.]. Минск: Лесное и охотничье хоз-во, 2019. 335 с.
17. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / В. А. Алексеев [и др.]. Ленинград: Наука, 1990. 197 с.

18. Сазонов А. А., Звягинцев В. Б. Массовое усыхание сосновых лесов Беларуси: особенности, причины, последствия // Х Чтения памяти О. А. Катаева. Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах: материалы междунар. конф., Санкт-Петербург, 22–25 окт. 2018 г. СПб., 2018. Т. 2: Фитопатогенные грибы, вопросы патологии и защиты леса. С. 28–29. DOI: 10.21266/SPBFTU.2018.КАТАЕВ.2.
19. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / В. Ф. Багинский [и др.]. М.: ЦБНТИ, 1984. 308 с.
20. Защита леса: учеб.-метод. пособие / В. Б. Звягинцев [и др.]. Минск: БГТУ, 2019. 164 с.
21. Почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника = Soils of Polesye state radiation-ecological reserve / В. В. Лапа [и др.]. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 97 с.
22. Степанчик В. В. Устойчивость сосновых фитоценозов в условиях комплексного техногенно-радиационного загрязнения // Десять лет Чернобыльской аварии: уроки и перспективы: тез. докл. республ. конф., Москва, 26–27 марта 1996 г. М., 1996. С. 66–70.
23. Булко Н. И., Потапенко А. М., Козлов А. К. К вопросу о состоянии сосновых древостоев в ближней зоне чернобыльских выпадений спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2018. Вып. 78. С. 213–218.
24. Retrospective assessment on scots pine stands situated far and near chernobyl fallout areas / А. Потепенко [et al.] // *Forestry Ideas*. 2019. Vol. 25, no. 2 (58). P. 301–313.
25. Марченко Ю. Д. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС // Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития: сб. науч. тр., посвящ. 25-летию Полес. радиац.-экол. заповедника. Минск, 2013. С. 32–45.

References

1. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmeneniye klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities]. Minsk, Entsiklopediks Publ., 2020. 264 p. (In Russian).
2. Brovka Yu. A., Buyakov I. V. Changes in the hydrothermal coefficient and in the frequency of extreme humidification conditions on the territory of Belarus during climate warming. *Prirodopol'zovaniye* [Nature Management], 2020, no. 2, pp. 5–18. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18 (In Russian).
3. Danilovich I. S., Mel'nik V. I., Geyer B. The current climate changes in Belarusian Polesie region: factors, consequences, projections. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* [Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology], 2020, no. 1, pp. 3–13. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-1-3-13 (In Russian).
4. Baginskiy V. F., Lapitskaya O. V. Some issues of adaptation of forestry of Belarus to climatic changes. *Navukovyy visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of UNFU], 2009, issue 19.14, pp. 7–17 (In Russian).
5. *Strategiya adaptatsii lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' k izmeneniyu klimata na period do 2050 goda* [Strategy of adaptation of forestry of the Republic of Belarus to climate change for the period up to 2050]. Minsk, 2011. 119 p. (In Russian).
6. Voytov I. V., Shatravko V. G., Yurevich N. N., Lednitskiy A. V., Neverov A. V., Nosnikov V. V., Rozhkov L. N. *Ekologooriyentirovannoye razvitiye lesnogo khozyaystva Belarusi v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy* [Ecologically oriented development of forestry in Belarus in the context of climate change]. Minsk, BGTU Publ., 2019. 201 p. (In Russian).
7. Matyushevskaya E. V., Kiselev V. N., Yarotov A. E., Khvinevich V. A. Pine production potential on semihydromorphic edafotop of Belarusian Polesje under changing climatic conditions. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* [Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology], 2020, no. 1, pp. 36–44. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-1-36-44 (In Russian).
8. Baginskiy V. F. Features of the course of growth of pine stands in the Belarusian Polesie. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: collections of scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel', 2016, issue 76, pp. 307–317 (In Russian).
9. Lazareva M. S. Climatically deterministic dynamics of typological structure of pine forests of Republic of Belarus to forest planning. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest inventory and forest planning], 2008, no. 1, pp. 115–122 (In Russian).
10. *Lesoustroitel'nyy proyekt gosudarstvennogo prirodookhrannogo nauchno-issledovatel'skogo uchrezhdeniya "Poleskiy gosudarstvennyy radiatsionno-ekologicheskiy zapovednik" Ministerstva po chrezvychaynym situatsiyam Respubliki Belarus' na 2021–2030 gody* [Forest management project of the State Nature Protective Scientific-Research Establishment "Polesye State Radiation-Ecological Reserve" of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus for 2021–2030]. Minsk, 2020. 292 p. (In Russian).

11. Ermokhin M. V., Sazonov A. A., Ignat'ev Ya. K. Biological stability of forests of different origin. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 1 (264), pp. 49–60. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-06 (In Russian).
12. Garbaruk D. K., Uglyanets A. V. Structure, productivity and forecast changes in stem wood volume of pine forests of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov Instituta eksperimental'noy botaniki Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Botany (research): collection of scientific transactions of the Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2019, issue 48, pp. 126–140 (In Russian).
13. Babul' D. A., Sazonov A. A., Kukhta V. N., Ukolova E. A. State of pine stands and analysis of the incidence of pine drying in separate forestry enterprises of the Gomel Polesia in 2017–2020. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 112–120. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-246-14-112-120 (In Russian).
14. Anuchin N. P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest inventory]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1982. 561 p. (In Russian).
15. Miroshnikov V. S., Trull' O. A., Ermakov V. E., Dol'skiy L. V., Kostenko A. G. *Spravochnik taksatora* [A guide for forest taxator]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p. (In Russian).
16. Kuz'menkov M. V., Kulagin A. P., Tarkan A. V., Buzunovskiy R. S. *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest inventory guide]. Minsk, Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo Publ., 2019. 335 p. (In Russian).
17. Alekseev V. A., Chertov O. G., Sergeychik S. A., Druzina V. D., Men'shikova G. P., Lyanguzova I. V., Lovelius N. V., Yarmishko V. T., Stavrova N. I., Goroshkov V. V., Andreeva E. N. *Lesnyye ekosistemy i atmosfernoye zagryazneniye* [Forest ecosystems and atmospheric pollution]. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 197 p. (In Russian).
18. Sazonov A. A., Zvyagintsev V. B. Mass destruction of pine forests in Belarus: peculiarities, causes, consequences. *X Chteniya pamyati O. A. Kataeva. Dendrobiontnyye bespozvonochnyye zhivotnyye i griby i ikh rol' v lesnykh ekosistemakh: materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [The Kataev memorial readings – X. Dendrobiontic invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems: materials of the international conference]. Saint Petersburg, 2018, vol. 2: Phytopathogenic Fungi, Problems of Forest Pathology and Forest Protection, pp. 28–29. DOI: 10.21266/SPBFTU.2018.KATAEV.2 (In Russian).
19. Baginskiy V. F., Kislyakov V. N., Shvets V. F., Dol'skiy L. V., Kostenko A. G. *Normativnyye materialy dlya taksatsii lesa Belorusskoy SSR* [Normative materials for forest inventory in the Byelorussian SSR]. Moscow, TsBNTI Publ., 1984. 308 p. (In Russian).
20. Zvyagintsev V. B., Blintsov A. I., Kozel A. V., Kukhta V. N., Sazonov A. A., Seredich M. O., Khvasko A. V. *Zashchita lesa* [Forest protection]. Minsk, BGTU Publ., 2019. 164 p. (In Russian).
21. Lapa V. V., Tsybul'ko N. N., Tsyribko V. B., Ustinova A. M., Chervan' A. N., Logachev I. A., Kudin M. V., Antipenko O. N. *Pochvy Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Soils of Polesye State Radiation-Ecological Reserve]. Minsk, IVTs Minfina Publ., 2019. 97 p. (In Russian).
22. Stepanchik V. V. Stability of pine phytocenoses under conditions of complex technogenic-radiation pollution. *Desyat' let Chernobyl'skoy avarii: uroki i perspektivy: tezisy dokladov respublikanskoy konferentsii* [Ten years of the Chernobyl accident: lessons and prospects: proceedings of the republican conference]. Moscow, 1996, pp. 66–70 (In Russian).
23. Bulko N. I., Potapenko A. M., Kozlov A. K. To the question of the condition of pine forests stands in the near zone of the chernobyl fallout 30 years later after the accident at the CnPP. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: collections of scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel', 2018, issue 78, pp. 213–218 (In Russian).
24. Potapenko A., Bulko N., Kozlov A., Mohnachev P., Kuzmina N., Zavyalov K., Ayan Sezgin. Retrospective assessment on Scots pine stands situated far and near chernobyl fallout areas. *Forestry Ideas*, 2019, issue 25, no. 2 (58), pp. 301–313.
25. Marchenko Yu. D. Weather-climate conditions in the near zone of Chernobyl NPP. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Ecosystems and radiation: aspects of existence and development: collections of scientific papers dedicated to the 25th anniversary of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve]. Minsk, 2013, pp. 32–45 (In Russian).

Информация об авторах

Гарбарук Дмитрий Константинович – заведующий отделом экологии растительных комплексов. Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Республика Беларусь). E-mail: dima.garbaruk.77@mail.ru

Углынец Анатолий Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов. Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Республика Беларусь). E-mail: uhlianets@mail.ru

Судник Александр Владимирович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией оптимизации и мониторинга экосистем. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: asudnik@tut.by

Information about the authors

Garbaruk Dmitriy Konstantinovich – Head of the Department of Ecology of Vegetative Complexes. Polesye State Radiation-Ecological Reserve (7 Tereshkovoy str., 247618, Khoyniki, Republic of Belarus). E-mail: dima.garbaruk.77@mail.ru

Uglyanets Anatoliy Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher, the Department of Ecology of Vegetative Complexes. Polesye State Radiation-Ecological Reserve (7 Tereshkovoy str., 247618, Khoyniki, Republic of Belarus). E-mail: uhlianets@mail.ru

Sudnik Alexander Vladimirovich – PhD (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory of Optimization and Monitoring of Ecosystems. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27 Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asudnik@tut.by

Поступила 05.11.2024

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ

FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING

УДК 630*232.315.3

Е. В. Татун, В. В. Носников

Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA*) НА ВСХОЖЕСТЬ И БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Искусственное разведение березы повислой сопряжено с определенными трудностями. Отчасти это связано со значительной изменчивостью качеств получаемого семенного материала, на которые оказывают влияние разнообразные факторы. В целях улучшения посевных качеств семян разработаны различные способы подготовки их к посеву. Данное исследование показало, что стимуляторы роста Силиплант, Байкал, Циркон увеличили всхожесть на 14–18% при выращивании сеянцев березы повислой в условиях открытого грунта. Однако не установлено их влияние на сохранность всходов и биометрические показатели сеянцев березы повислой при летнем посеве. В условиях защищенного грунта существенное влияние на всхожесть оказал стимулятор Силиплант. Так, всхожесть превышала контрольный опыт на 29%, а сохранность всходов на 11%. Снегование предварительно замоченных семян хотя и привело к увеличению средней высоты стволика на 14%, но отрицательно сказалось на показателе всхожести по отношению к контролю. Замоченные на протяжении 7 сут семена незначительно уступали семенам, подвергшимся снегованию в темпах роста, при этом не отличались по показателю всхожести и сохранности сеянцев от контрольного опыта.

Результаты опытов показали, что на всхожесть и сохранность всходов, а также параметры сеянцев березы повислой большее влияние оказывали условия произрастания, чем способы подготовки семян к посеву. Так, отличались не только биометрические параметры сеянцев, но и соотношение частей растения. Сеянцы, выращенные в открытом грунте, обладали значительно меньшей высотой стволика (на 37%) по отношению к сеянцам, выращенным в условиях защищенного грунта. При этом сеянцы открытого грунта обладали более длинным корнем и толщиной стволика у корневой шейки относительно его высоты. Например, соотношение корень/стволик у сеянцев, полученных в условиях открытого грунта, составило 0,9–1,1, а у сеянцев, полученных в условиях защищенного грунта, – 0,4–0,5.

Ключевые слова: береза повислая, семена, подготовка семян к посеву, стимуляторы роста, сеянцы, защищенный грунт, открытый грунт, биометрические показатели.

Для цитирования: Татун Е. В., Носников В. В. Влияние предпосевной обработки семян березы повислой (*Betula pendula*) на всхожесть и биометрические показатели посадочного материала // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 37–47.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-4.

Ya. U. Tatun, V. V. Nosnikov

Belarusian State Technological University

EFFECT OF PREPARATION OF SILVER BIRCH (*BETULA PENDULA*) SEEDS FOR SOWING ON SOWING QUALITIES AND BIOMETRIC PARAMETERS OF SEEDLINGS

The cultivation of birch is difficult. This is partly due to considerable variability in the quality of the resulting seed material, which is influenced by a variety of factors. In order to improve the sowing qualities of seeds, various methods of their preparation for sowing have been developed. Our study showed that

growth stimulants Siliplant, Baikal, Zirkon increased germination by 14–18% when growing birch seedlings in open ground conditions. However, no effect of growth stimulants on seedling survival and biometric parameters of birch seedlings at summer sowing was detected. Under greenhouse conditions, the stimulant Siliplant had a significant effect on germination. Thus, germination exceeded the control experiment by 29%, and seedling survival by 11%. Snowing of pre-moistened seeds, although led to an increase in growth rate and average stem height by 14%, but had a negative effect on the germination rate in relation to the control. Seeds soaked for 7 days were insignificantly inferior to the seeds subjected to snowing in growth rate, but did not differ in germination rate and seedling survival from the control experiment.

The results of our experiments showed that the germination and survival of seedlings and the parameters of birch seedlings were more influenced by growing conditions than by the methods of seed preparation for sowing. Thus, not only biometric parameters of seedlings, but also the ratio of plant parts differed. Seedlings grown in the open ground had a significantly lower stem height (by 37%) in relation to seedlings grown in the greenhouse. At the same time, open ground seedlings possessed longer root and more thickness of root-collar diameter relative to stem height. Thus, the root-to-stem ratio thickness in seedlings obtained in open ground conditions was 0.9–1.1, in seedlings obtained in greenhouse conditions 0.4–0.5.

Keywords: birch, seeds, seed preparation for sowing, growth stimulants, seedlings, greenhouse, open ground conditions, biometric parameters.

For citation: Tatun Ya. U., Nosnikov V. V. Effect of preparation of silver birch (*Betula pendula*) seeds for sowing on sowing qualities and biometric parameters of seedlings. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 37–47 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-4.

Введение. Искусственное разведение березы повислой сопряжено с определенными трудностями. Отчасти это связано со значительной изменчивостью качественных характеристик получаемого семенного материала, что обуславливает необходимость применения специальных приемов для получения достаточного количества всходов и их сохранения к концу вегетационного периода [1].

Факторы, влияющие на качество семенного материала березы повислой, разнообразны: способность к партенокарпии (в неблагоприятные для опыления годы до 50–100% плодов оказываются без семян) [2, с. 90; 3]; временная изменчивость (годы с обильным семеношением сопровождаются не только обилием урожая, но и лучшим качеством семян) [4]; экологические условия произрастания [5–8]; возраст и размеры растения, которое используют для получения семян [9]; формовое разнообразие, где преимущество имеет грубокорая и ромбовидно-трещиноватая формы березы повислой по сравнению с гладкокорой [10]; сроки и условия хранения семян [11; 12, с. 117; 13].

В целях улучшения посевных качеств семян и прекращения действия ингибиторов, которые обуславливают состояние вынужденного покоя, разработаны различные способы подготовки их к посеву. К первой группе способов подготовки можно отнести те, которые имитируют процессы, происходящие с семенами березы в естественных условиях. Это, например, замачивание в воде до

состояния наклеивания при летнем посеве [14, с. 280]. При весеннем посеве: замачивание до состояния частичного наклеивания (2–3 сут) или замачивание на протяжении 7 сут [12, с. 127; 14, с. 280]; воздействие солнечных лучей [12, с. 127]; предпосевное охлаждение (prechilling) набухших семян при температуре 0–10°C в течение 30–60 дней [4, с. 127; 15–18]; снегование на протяжении 30–60 дней [14, с. 280; 19, с. 311; 20, с. 76].

Ко второй группе способов подготовки можно отнести предпосевную обработку химическими веществами органической или неорганической природы: обработка семян в течение 6 ч 0,005%-ным раствором кобальта (CoSO_4) или 0,001%-ным раствором молибдена $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$; протравливание в 0,5%-ном растворе марганцовокислого калия (KMnO_4) на протяжении 2 ч [14, с. 280–281, 20, с. 311]. А также использование стимуляторов роста различного состава [18; 21–23].

Существуют комбинированные способы, такие как стратификация в ящиках с песком в помещениях с низкой температурой (около 0°C) или снегование в течение 30 дней предварительно обработанных фунгицидами семян [14, с. 280–281; 19, с. 318; 20, с. 76].

Для улучшения качества семенного материала возможно разделение семян гравитационным сепаратором или ацетоном на фракции. В дальнейшем для хранения и высева используют только отборные семена, отделенные от пустых, поврежденных и недоразвитых семян [11; 12, с. 127–128]. Высев в

условиях защищенного грунта также положительно сказывается на всхожести [20, с. 310, 24].

Особый интерес вызывают химические способы, в частности обработка семян стимуляторами роста, которые значительно сокращают время подготовки семян к посеву, могут оказывать влияние на скорость прорастания, способность всходов противостоять факторам внешней среды, что проявляется в увеличении количества всходов и ускорении ростовых процессов [18; 21–23].

Цель исследования – установить наличие и выявить степень влияния различных способов подготовки семян к посеву на скорость появления всходов и на биометрические показатели полученных сеянцев березы повислой.

Исследование проводилось на базе лесного питомника Друйского лесничества (Браславский район, Витебская область, GPS 55.744314, 27.261671). Для достижения цели исследование было разбито на два этапа.

Первый этап (2022 г.) включал в себя предпосевную обработку свежесобранных семян березы повислой стимуляторами роста. Семена III класса качества обрабатывались с целью увеличения количества всходов при летнем посеве (табл. 1). Выбор стимуляторов роста и схемы обработки семян осуществлялся согласно рекомендациям [18; 21–23]. После обработки семена просушивались в тени до состояния сыпучести. Высев производился 28 июля 2022 г. в условиях открытого грунта, вразброс на подготовленных грядах шириной 1 м с нормой высева 15 г/м², после чего посевы мульчировались опилками слоем до 0,5 см и были укрыты нетканым материалом – спанбондом. Уход за сеянцами включал в себя подкормку 0,5–1%-ным раствором комплексного удобрения Kristalon различных видов: особым – 3-кратная подкормка в начале вегетации, желтым – 1-кратная подкормка в середине, коричневым – 1-кратная подкормка в конце вегетации, полив 2–3 раза в день, ручное пропалывание посевов.

Второй этап (2023 г.) включал в себя использование различных способов предпосевной подготовки. Использовались семена березы повислой III класса качества, подвергшиеся хранению в холодильнике (при $t = 4^{\circ}\text{C}$), с целью изучения влияния этих способов на всхожесть и сохранность сеянцев и их биометрические показатели (табл. 1). Выбор стимуляторов роста и схемы обработки семян, продолжительность снегования и замачивания определялись согласно ранее полученным в 2022 г. данным и рекомендациям [12, с. 127; 14, с. 280–281; 19, с. 318; 20, с. 76].

После обработки семена просушивались в тени до состояния сыпучести. Высев производился 29 апреля 2023 г. в условиях закрытого грунта вразброс на подготовленных грядах ши-

риной 1,5 м с нормой высева 15 г/м². При этом учитывалось изменение в массовых характеристиках, вызванное продолжительным замачиванием [25]. В качестве субстрата использовался торф с агроперлитом с внесением 1 кг/м³ суперфосфата амонизированного марки 9-30. Уход за сеянцами включал в себя подкормки 0,5–1%-ным раствором комплексного удобрения Kristalon различных видов 1 раз в 15 дней (Kristalon голубой и особый – в начале вегетации, Kristalon желтый – в середине, Kristalon коричневый – в конце вегетации), а также мелкокапельный полив 1–2 раза в день, ручное пропалывание посевов.

Таблица 1

**Способы подготовки семян
березы повислой к посеву**

Способы предпосевной подготовки	Время замачивания	Доза внесения
Июль 2022 г.		
Обработка стимулятором:		
Байкал	1,5 ч	2 мл/л
Гумат +7	6 ч	0,5 г/л
Циркон	2 ч	0,25 мл/л
Силиплант	30 мин	3 мл/л
Гиберелон	2 ч	0,2 г/л
Экогель	6 ч	20 мл/л
Контроль	6 ч	–
Апрель 2023 г.		
Обработка стимулятором:		
Циркон	2 ч	0,25 мл/л
Байкал	1,5 ч	2 мл/л
Силиплант	30 мин	3 мл/л
Замачивание в проточной воде	3 сут	–
	7 сут	–
Снегование (49 сут)	3 сут	–
Контроль	6 ч	–

Каждый опыт по определению всхожести проводился в восьмикратной повторности протяженностью 2 п. м для открытого грунта, 0,7 п. м для защищенного грунта. Степень развития структурно-функциональных органов сеянцев изучалась посредством измерения высоты надземной части раз в 7–10 дней линейкой вдоль оси стволика от корневой шейки до основания почки центрального побега после появления настоящих листьев и до прекращения вегетации, измерения длины корня, а также измерения толщины стволика у корневой шейки электронным штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Для измерения биометрических параметров в каждом варианте опыта использовалось не менее 30 сеянцев.

Обработка полученных данных проводилась в программе STATISTICA 12. Для каждого параметра вычислялись: среднее арифметическое ($\bar{X}$), стандартное квадратическое отклонение (σ), ошибка среднего ($\pm m$), коэффициент вариации (V), значение вероятности (p). Варьирование признака

считалось слабым при коэффициенте вариации 0–10%, средним – при 10–20%, высоким – при 20% и более [26, с. 41–42]. Высокая степень варьирования признака указывает на низкую предсказуемость соответствующего среднего арифметического [27, с. 17].

Основная часть. По результатам исследования, проведенного в 2022 г., было установлено, что среди выбранных для анализа стимуляторов роста значимое влияние на всхожесть сеянцев березы повислой оказали 3 из них – Силиплант (возрастание количества всходов на 18% по отношению к контролю), Циркон (возрастание на 16%) и Байкал (возрастание на 14%) (рис. 1). При этом возрастание всхожести регистрировалось с самого начала наблюдений и отразилось на конечном значении. Результаты соответствуют ранее полученным данным [22; 23]. Количество сеянцев на 1 м² находилось в диапазоне 704,1–854,4 шт. (табл. 2).

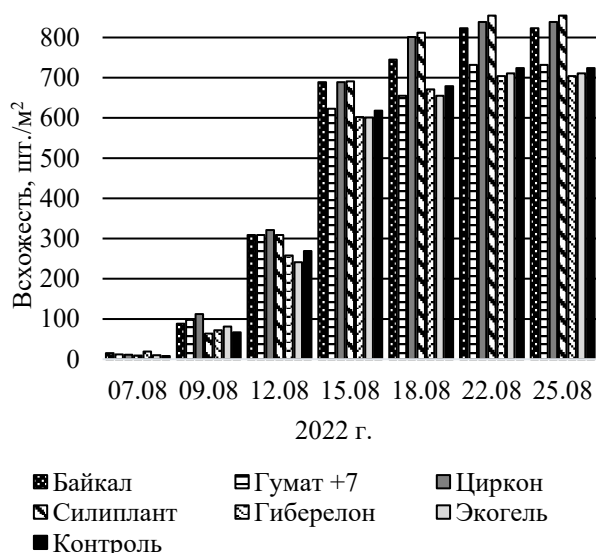


Рис. 1. Появление всходов березы повислой при летнем посеве (28.07.2022) в открытый грунт в зависимости от способа подготовки семян

Проведенное исследование показало, что на скорость появления всходов при летнем посеве в условиях открытого грунта оказывают воздействие применяемые стимуляторы роста. Однако это влияние неоднозначно. Так, в первые дни наблюдений преимущество в темпах появления всходов имели стимуляторы Циркон, Байкал и Гумат +7, но сравнялись по этому показателю с контрольным опытом на 8-й день после появления первых всходов (рис. 1).

Первые всходы во всех вариантах опыта регистрировались на 10-й день после посева, появление новых всходов прекратилось на 25-й день (рис. 1). От появления первых всходов до прекращения появления новых прошло около 15 дней. Влияния предпосевной подготовки на продолжительность этого периода не обнаружено. Пик появления всходов пришелся на 15–18-й день после посева. В этот период появилось от 45 до 51% всходов (рис. 2).

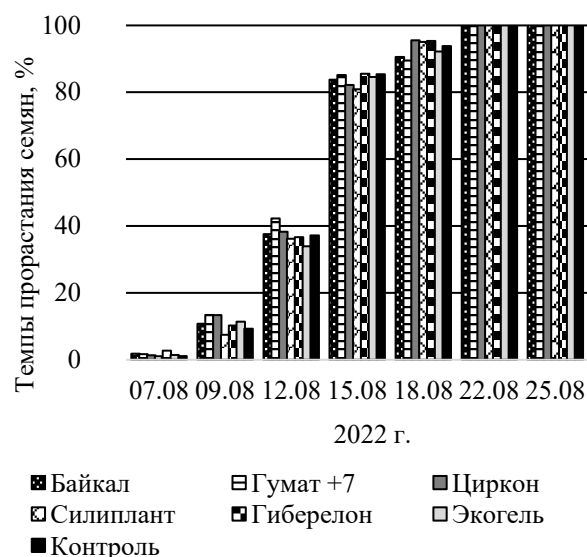


Рис. 2. Прорастание семян березы повислой при летнем посеве (28.07.2022) в открытый грунт в зависимости от способа их подготовки

Таблица 2

Результаты определения всхожести и сохранности сеянцев после обработки стимуляторами роста семян березы повислой при летнем посеве в условиях открытого грунта

Способы предпосевной подготовки	Всхожесть, шт./м ² , летом 2022 г.				Сохранность сеянцев, шт./м ² , осенью 2023 г.				Отпад, %
	$\bar{X} \pm m$	σ	$V, \%$	p	$\bar{X} \pm m$	σ	$V, \%$	p	
Обработка стимулятором: Байкал	823,1 ± 11,0	90,4	11,0	0,03	166,4 ± 17,5	49,5	29,7	0,26	80
Гумат +7	731,9 ± 8,3	60,6	8,3	0,73	181,8 ± 15,6	42,4	23,3	0,75	75
Циркон	838,6 ± 9,1	76,5	9,1	0,02	164,8 ± 10,2	28,9	17,6	0,48	80
Силиплант	854,4 ± 8,3	70,9	8,3	0,01	183,0 ± 11,3	32,0	17,5	0,40	79
Гиберелон	704,1 ± 7,5	53,0	7,5	0,17	161,1 ± 11,1	31,3	19,4	0,58	77
Экогель	710,9 ± 10,1	71,8	10,1	0,12	174,7 ± 11,1	31,4	18,0	0,78	76
Контроль	724,1 ± 9,1	65,9	9,1	–	162,5 ± 12,9	33,9	20,8	–	78

Примечание. Различия в средних значения существенны при $p < 0,05$ (критерий знаковых рангов Уилкоксона).

Данные по сохранности семян на конец вегетации 2023 г. не показали достоверных отличий в количестве семян на 1 м² между способами подготовки семян. Количество семян на 1 м² находилось в диапазоне 161,1–181,8 шт. (см. табл. 2).

Исследование биометрических показателей семян после завершения вегетации не выявило достоверных отличий от контрольного опыта в средней высоте надземной части, диаметре стволика у корневой шейки и средней длине корня у семян, полученных из семян, подвергшихся предпосевной подготовке (табл. 3). Так, средняя высота надземной части составила 236,1–298,5 мм, диаметр стволика у корневой шейки – 4,5–4,8 мм, средняя длина корня – 255,7–288,9 мм (рис. 3). Соотношение длины корня к стволику находилось в диапазоне 0,9–1,2.

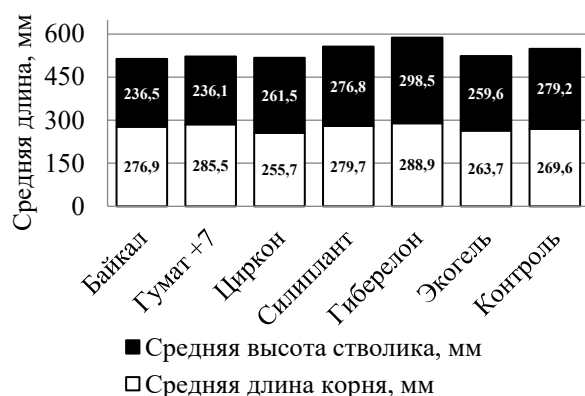


Рис. 3. Средние значения высоты надземной части и длина корня семян березы повислой при летнем посеве (28.07.2022) в открытый грунт в зависимости от способа подготовки семян

Отпад семян был высоким и составил 75–80%, что было обусловлено засушливым летом 2022 и 2023 гг. (см. табл. 2). Уровень увлажнения является критически важным фактором для березы повислой на ранних этапах развития [28].

Коэффициент вариации для высоты надземной части семян, выращенных в открытом грунте, составил 31,6–53,1% для диаметра стволика у корневой шейки 27,7–35,2%, что говорит о высоком варьировании этих признаков. Коэффициент вариации для длины корня находился на среднем уровне (14,1–18,7%), что указывает на достаточно высокий уровень варьирования данного признака (табл. 3).

При наблюдении за темпами роста семян березы повислой при выращивании в открытом грунте (летний посев) не было выявлено значительной зависимости от применяемого регулятора роста на ростовые процессы в период вегетации. Интенсивный рост во всех вариантах опыта начинался в первой декаде июля, а заканчивался в третьей декаде августа. Окончательной высоты стволика семена во всех вариантах опыта достигли в первой декаде сентября (рис. 4).

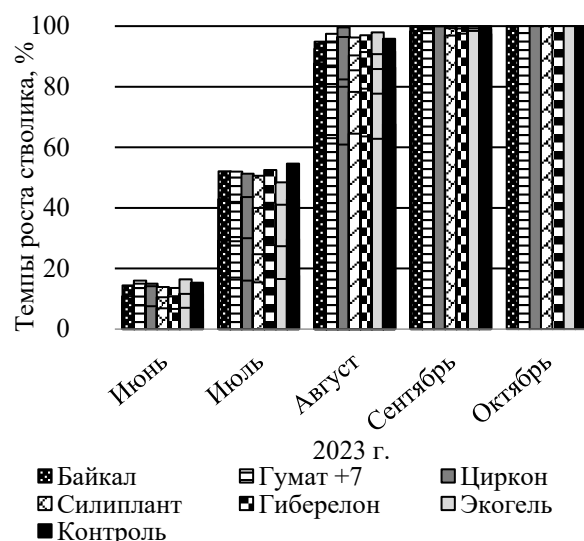


Рис. 4. Темпы роста стволика березы повислой при летнем посеве (28.07.2022) в открытый грунт в зависимости от способа подготовки семян

Таблица 3

Результаты определения биометрических показателей семян после обработки стимуляторами роста семян березы повислой при летнем посеве в условиях открытого грунта

Способы предпосевной подготовки	Средние значения высоты надземной части, мм				Средние значения диаметра стволика у корневой шейки, мм				Средние значения длины корня, мм				Соотношение корень/стволик	
	$\bar{X} \pm m$	σ	$V, \%$	p	$\bar{X} \pm m$	σ	$V, \%$	p	$\bar{X} \pm m$	σ	$V, \%$	p	X_k/X_c	$V, \%$
Обработка стимулятором: Байкал	236,5 ± 24,6	103,1	53,1	0,23	4,7 ± 0,3	1,6	34,0	0,22	276,9 ± 8,7	39,0	14,1	0,55	1,1	22,2
Гумат +7	236,1 ± 22,1	125,6	47,7	0,10	4,8 ± 0,3	1,7	34,9	0,14	285,5 ± 11,2	50,3	17,6	0,06	1,2	17,4
Циркон	261,5 ± 16,2	112,5	31,6	0,42	4,7 ± 0,2	1,3	26,9	0,10	255,7 ± 8,9	39,6	15,5	0,85	1,0	19,1
Силиплант	276,8 ± 17,8	82,7	32,7	0,81	4,6 ± 0,3	1,6	34,0	0,83	279,7 ± 9,6	42,8	15,3	0,31	1,0	18,0
Гибберелон	298,5 ± 18,4	90,5	31,5	0,35	4,5 ± 0,2	1,3	27,7	0,84	288,9 ± 12,1	53,9	18,7	0,42	1,0	19,6
Экогель	259,6 ± 21,0	93,9	41,2	0,53	4,4 ± 0,3	1,6	35,2	0,84	263,7 ± 8,8	39,3	14,9	0,90	0,9	23,7
Контроль	279,2 ± 20,2	106,9	36,9	–	4,5 ± 0,2	1,5	33,6	–	269,6 ± 11,3	50,4	18,7	–	1,1	17,1

Примечание. Различия в средних значениях существенны при $p < 0,05$ (критерий знаковых рангов Уилкоксона).

На втором этапе исследования были использованы разные способы подготовки семян березы повислой к посеву в условиях защищенного грунта. Выбор способов был основан на результатах всхожести на первом этапе и в соответствии с рекомендациями по вымачиванию семян в проточной воде со снегованием или без него с последующим высевом.

Полученные данные показывают, что предпосевная обработка стимулятором роста Силиплант способствовала увеличению всхожести семян на 29% по сравнению с контролем. Снегование на протяжении 49 сут с предварительным замачиванием семян уменьшило количество семян на 13% по сравнению с контролем (рис. 5). При исследовании было обнаружено, что около 10% семян, прошедших снегование и высушенных в тени до состояния сыпучести, имели проросший зародышевый корешок. Это могло сказаться на всхожести семян, так как корешки можно легко повредить в процессе посева. Замоченные на протяжении 7 сут семена имели запах брожения, однако процессы, которыми оно было вызвано, не повлияли на количество полученных всходов относительно контрольного опыта (табл. 4).

Появление всходов при весеннем посеве в условиях защищенного грунта также зависит от способа подготовки семян к посеву. Наиболее высокими темпами появления всходов обладали семена, подвергшиеся снегованию и предварительно замоченные на протяжении 3 и 7 сут. Было установлено, что семена, прошедшие снегование, начали всходить на 6-й день после посева, а более 90% всхожести достигли на 17-й день после посева. Семена, замоченные в воде на 3 и 7 сут, начали всходить на 9-й день после посева, а 90%-ной всхожести достигли на 19-й и 17-й день соответственно. Наше исследование не выявило влияния стимуляторов роста на темпы появления всходов березы повислой при выращивании семян в условиях защищенного грунта. В контрольном опыте первые всходы появились на 13-й день, а прекратили появляться на 27-й день после посева (рис. 6).

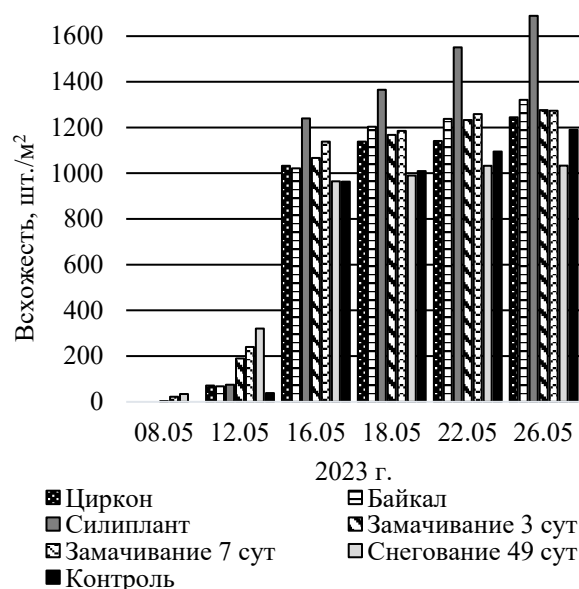


Рис. 5. Появление всходов березы повислой при весеннем посеве (29.04.2023) в защищенный грунт в зависимости от способа подготовки семян

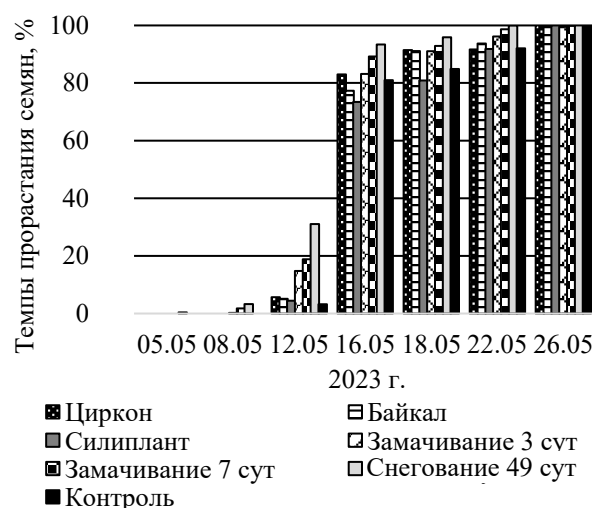


Рис. 6. Прорастание семян березы повислой при весеннем посеве (29.04.2023) в защищенный грунт в зависимости от способа их подготовки

Таблица 4

Результаты определения всхожести и сохранности семян березы повислой при весеннем посеве в условиях защищенного грунта в зависимости от способов подготовки семян

Способы предпосевной подготовки	Всхожесть шт./м², осенью 2023 года				Сохранность шт./м², осенью 2023 года				Отпад, %
	$X \pm m$	σ	$V, \%$	p	$X \pm m$	σ	$V, \%$	p	
Обработка стимулятором: Циркон	1245,2 ± 54,7	154,8	12,4	0,98	220,5 ± 13,2	37,4	17,6	0,26	83
Байкал	1321,0 ± 10,3	29,2	2,3	0,16	242,8 ± 12,4	35,0	14,4	0,48	86
Силиплант	1688,8 ± 70,1	198,4	11,7	0,01	261,8 ± 11,4	32,4	12,4	0,04	87
Замачивание 3 сут	1283,2 ± 49,5	140,1	10,9	0,40	221,5 ± 14,2	40,3	18,2	1,00	83
Замачивание 7 сут	1276,2 ± 54,7	154,8	12,1	0,89	219,5 ± 8,8	25	11,6	0,21	81
Снегование 49 сут	1033,1 ± 47,9	135,4	13,1	0,02	212,8 ± 10,9	30,8	13,6	0,58	78
Контроль	1190,5 ± 26,9	76,3	6,1	—	232,3 ± 7,2	20,4	8,8	—	81

Примечание. Различия в средних значениях существенны при $p < 0,05$ (критерий знаковых рангов Уилкоксона).

Период, за который в условиях защищенного грунта все семена достигли конечного значения всхожести, составил около 14 дней после появления первых всходов. Не было обнаружено влияние предпосевной подготовки семян на продолжительность этого периода, кроме случая, когда семена подвергались снегованию. Пик появления всходов пришелся на 13–17-й день после посева. В этот период отмечено от 68 до 78% всходов. Однако при снеговании всхожесть меньше – 62%, что обусловлено более ранними обильными всходами (рис. 6).

На конец вегетации было обнаружено влияние способа подготовки семян к посеву на сохранность всходов при предпосевной обработке стимулятором Силиплант. Количество сеянцев по отношению к контрольному опыту возросло на 8% и составило 261,8 сеянцев на 1 м². Сохранность сеянцев березы повислой на 1 м² для других вариантов была ниже и находилась в диапазоне 212,5–242,8 шт. (табл. 4).

Из-за высокой плотности размещения сеянцев наблюдались их заболеваемость и активный отпад (78–87%). Для предотвращения гибели посевов были проведены прореживания всходов, где согласно рекомендациям в первую очередь удалялись слабые, больные и поврежденные сеянцы [29].

Исследование биометрических показателей сеянцев после завершения вегетации показало достоверные отличия от контрольного опыта в высоте надземной части у сеянцев, полученных из семян после 49-суточного снегования, что связано с более ранними сроками появления всходов и удлинением вегетативного периода. Их высота возросла на 14%.

У сеянцев, семена которых подвергались предпосевной подготовке, средняя высота надземной части составляла 420,9–517,2 мм, средний диаметр стволика у корневой шейки – 4,9–5,4 мм, средняя длина корня – 225,7–275,3 мм и не превышала

толщину слоя субстрата 250–300 мм (табл. 5). Соотношение длины корня к стволу находилось в диапазоне 0,5–0,6 (рис. 8).



Рис. 7. Сеянцы березы повислой в условиях защищенного грунта (август 2023 г.)

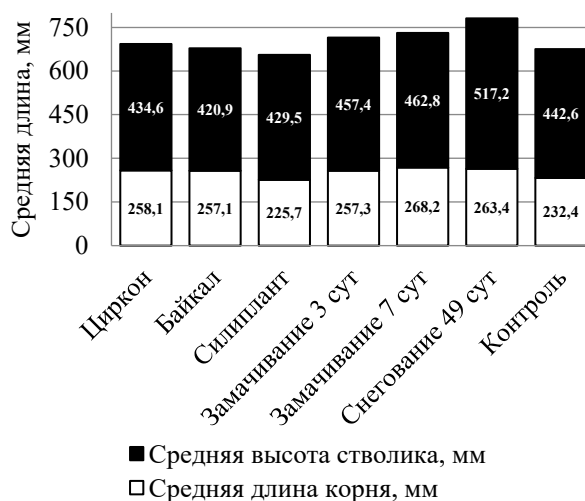


Рис. 8. Средние высота надземной части и длина корня сеянцев березы повислой при весеннем посеве (29.04.2023г.) в защищенный грунт в зависимости от способа подготовки семян

Таблица 5

Результаты определения биометрических показателей сеянцев после березы повислой при весеннем посеве в условиях защищенного грунта в зависимости от способа подготовки семян

Способы предпосевной подготовки	Средние значения высоты надземной части, мм				Средние значения диаметра стволика у корневой шейки, мм				Средние значения длины корня, мм				Соотношение корень/стволик	
	$X \pm m$	σ	$V, \%$	p	$X \pm m$	σ	$V, \%$	p	$X \pm m$	σ	$V, \%$	p	X_k/X_c	$V, \%$
Обработка стимулятором: Циркон	434,6 ± 29,1	200,9	46,2	0,91	5,2 ± 0,2	1,6	31,8	0,78	258,1 ± 13,2	19,8	22,3	0,85	0,6	20,9
Байкал	420,9 ± 30,9	211,6	50,3	0,80	5,2 ± 0,3	1,8	34,8	0,33	257,1 ± 17,0	28,8	28,9	0,17	0,6	17,7
Силиплант	429,5 ± 29,5	204,2	47,5	0,42	5,0 ± 0,2	1,6	31,2	0,23	225,7 ± 13,2	16,4	25,5	0,48	0,5	17,6
Замачивание 3 сут	457,4 ± 28,9	200,2	43,8	0,87	5,1 ± 0,2	1,7	30,8	0,89	275,3 ± 13,8	21,8	21,9	0,59	0,6	17,6
Замачивание 7 сут	462,8 ± 31,9	221,2	47,8	0,74	4,9 ± 0,2	1,6	32,4	0,68	268,2 ± 12,9	20,0	21,0	0,21	0,6	18,7
Снегование 49 сут	517,2 ± 35,9	248,6	48,1	0,03	5,4 ± 0,3	2,1	38,5	0,43	263,4 ± 11,3	18,7	18,7	0,65	0,5	20,6
Контроль	442,6 ± 33,1	229,0	51,7	—	5,0 ± 0,3	1,9	37,5	—	232,4 ± 10,4	33,2	19,5	—	0,5	18,7

Примечание. Различия в средних значениях существенны при $p < 0,05$ (критерий знаковых рангов Уилкоксона).

При выращивании сеянцев березы повислой в закрытом грунте не наблюдалось значительного влияния применяемого регулятора роста на ростовые процессы в период вегетации. Сеянцы, из семян, подвергшихся снегованию и замоченных на протяжении 7 сут, имели более высокие темпы роста в начале вегетации и закончили рост раньше, чем сеянцы в контрольном опыте. Интенсивный рост во всех вариантах опыта начинался во второй декаде июня, а заканчивался в третьей декаде августа. При этом высота надземной части отличалась более равномерными темпами роста на всем протяжении вегетации по сравнению с ростом сеянцев в открытом грунте. Окончательной высоты стволика сеянцы во всех вариантах опыта достигли в первой декаде сентября (рис. 9).

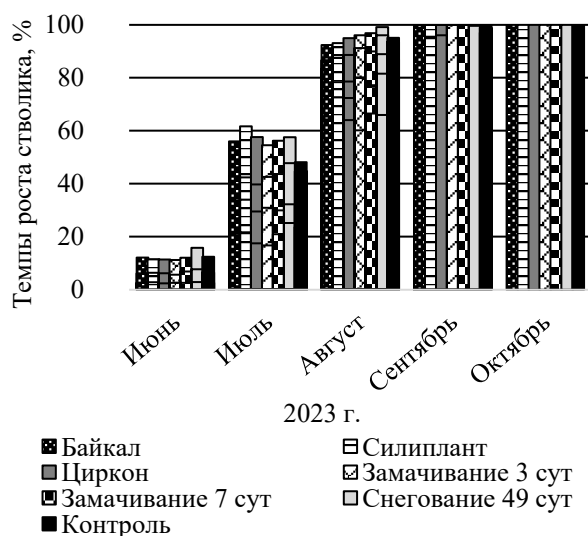


Рис. 9. Темпы роста стволика березы повислой при весеннем посеве (29.04.2023г.) в защищенный грунт в зависимости от способа подготовки семян

Полученные различия по всхожести, сохранности сеянцев и сравниваемым биометрическим показателям сеянцев при разных способах подготовки семян березы повислой к посеву в условиях открытого и защищенного грунта являются достоверными и подтверждаются статистическими значениями теста Уилкоксона (табл. 2–5).

Закключение. Использование стимуляторов роста для предпосевной обработки семян при выращивании сеянцев березы повислой в условиях открытого грунта влияет на показатели всхожести. Так, наблюдалось достоверное увеличение всхожести при использовании стимуляторов Силиплант, Байкал, Циркон на 14–18%. Однако не было выявлено влияние стимуляторов роста на сохранность всходов и биометрические показатели се-

янцев березы повислой при летнем посеве в условиях открытого грунта.

В условиях защищенного грунта на всхожесть значимое влияние оказал стимулятор Силиплант. Показатель всхожести превышал контрольный опыт на 29%, а сохранность всходов была больше на 11%. Снегование предварительно замоченных семян хотя и привело к возрастанию темпов появления всходов, но отрицательно сказалось на всхожести по отношению к контролю и составило 8%. В то же время данный способ обработки семян положительно сказался на средней высоте надземной части (превышение контрольного опыта на 14%). Замоченные на протяжении 7 дней семена незначительно уступали семенам, подвергшимся снегованию, в темпах появления всходов, при этом не отличались по показателям всхожести и сохранности всходов от контрольного опыта.

Результаты опытов показали, что на всхожесть и сохранность всходов, а также на биометрические параметры сеянцев березы повислой большее влияние оказывали условия произрастания, чем способы подготовки семян к посеву. Так, отличались не только биометрические параметры сеянцев, но и соотношение частей растения. Сеянцы, выращенные в открытом грунте, обладали значительно меньшей высотой стволика по отношению к сеянцам, выращенным в условиях защищенного грунта. Это различие в контрольных опытах составляло более 37%. При этом сеянцы открытого грунта обладали более длинным корнем и толщиной стволика у корневой шейки относительно высоты стволика, так соотношение корень/стволик у сеянцев, полученных в условиях открытого грунта, составило 0,9–1,1, у сеянцев, полученных в условиях защищенного грунта, 0,5–0,6.

Высев семян в условиях защищенного грунта необходимо проводить пониженной нормой, так как высокая густота получаемых всходов (в контрольном опыте более 1100 шт./м²) вызывает заболевания и требует дополнительных усилий по борьбе с болезнями и прореживании всходов.

По результатам исследований для увеличения количества всходов можно рекомендовать следующий способ – предпосевную обработку стимулятором Силиплант (замачивание на протяжении 30 мин, доза внесения препарата 3 мл/л); для увеличения темпов прорастания семян – вымачивание в водопроводной воде на протяжении 7 сут; для увеличения количества всходов и получения более крупномерного посадочного материала – выращивание сеянцев в условиях защищенного грунта в теплицах или использование коробов [30].

Список литературы

1. Чижов Б. Е., Агафонов Е. Ю., Козинец В. А. Особенности семенного возобновления берез лесостепи Западной Сибири // Леса и лесное хозяйство Западной Сибири. 2008. Вып. 8. С. 104–111.

2. Родионова А. С. Лесная ботаника (Морфология и систематика растений). М.: Лесная промышленность, 1980. 243 с.
3. Каледа В. М. Биология плодоношения березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в лесостепных районах Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03. Кулунда, 1984. 21 с.
4. К. В. Краснобаева [и др.] Динамика плодоношения березы повислой // Лесное хоз-во. 2007. № 1. С. 33–34.
5. Бажина Е. В., Скрипальщикова Л. Н., Барченков А. П. Особенности плодоношения березы повислой в красноярской лесостепи // Сибирский лесной журнал. 2018. №6. С. 112–120.
6. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Влияние ионов кадмия на прорастание семян карельской березы и березы повислой // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 3. С. 130–137. DOI: 10.17076/eb1195.
7. Chengjun Y., Guiying L. Effect of NaCl stress on germination of birch seeds // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014. No. 6 (6). P. 1980–1986.
8. Brown M. T., Wilkins D. A. The effects of zinc on germination, survival and growth of *Betula* seed // Environmental Pollution. Ser. A, Ecological and Biological. 1986. Vol. 41. P. 53–61. DOI: 10.1016/0143-1471(86)90106-6.
9. Reyes O., Casal M., Trabaud L. The influence of population, fire and time of dissemination on the germination of *Betula pendula* seeds // Plant Ecology. 1997. No. 133. P. 201–208. DOI: 10.1023/A:1009751513547.
10. Наквасина Е. Н., Некрасова А. В., Прожерина Н. А. Сравнение березы повислой (*Betula pendula* Roth.) с разными типами коры по вегетативным и генеративным признакам // Лесной вестник. 2019. № 1. С. 28–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-28-36.
11. Tylkowski T. *Betula pendula* seed storage and sowing pre-treatment: effect on germination and seedling emergence in container cultivation // Dendrobiology. 2012. Vol. 67. P. 49–58.
12. Szabla K., Pabian R. Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i technik w szkółkarstwie leśnym / wyd. II. Warszawa: CILP, 2009. 251 s.
13. Chmielarczyk P. Cryopreservation of conditionally dormant orthodox seeds of *Betula pendula* // Acta Physiol Plant. 2010. No. 32. P. 591–596. DOI: 10.1007/s11738-009-0437-6.
14. Кречетова Н. В. Справочник по лесосеменному делу. М.: Лесная промышленность, 1978. 334 с.
15. Ahola V., Leinonen K. Responses of *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Pinus sylvestris* seeds to red/far-red ratios as affected by moist chilling and germination temperature // Canadian Journal of Forest Research. 1999. Vol. 29. P. 1709–1717. DOI: 10.1139/x99-128.
16. De Atrip N., O'reilly C. Effect of seed moisture content during prechilling on the germination response of alder and birch seeds // Seed Science and Technology. 2005. Vol. 33. P. 363–373. DOI: 10.15258/sst.2005.33.2.09.
17. V. Vanhatalo [et al.] Effect of prechilling on the dormancy of *Betula pendula* seeds // Canadian Journal of Forest Research. 1996. Vol. 26. P. 1203–1208. DOI: 10.1139/x26-134.
18. De Atrip N., O'Reilly C. Germination response of alder and birch seeds to applied gibberellic acid and priming treatments in combination with chilling // Annals of Forest Science. 2007. No. 64 (4). P. 385–394. DOI: 10.1051/forest:2007015.
19. Новосельцева А. И. Справочник по лесным питомникам. М.: Лесная промышленность, 1983. 280 с.
20. Коновалов В. Ф. Береза повислая на Южном Урале: структура популяций, селекция и воспроизводство: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.01. Йошкар-Ола, 2003. 503 л.
21. Кабанова С. А., Борцов В. А., Данченко М. А. Результаты опыта по предпосевной обработке семян и выращиванию сеянцев березы повислой в закрытом грунте // Лесотехнический журнал. 2019. № 3. С. 16–24. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/2.
22. Кабанова С. А., Данченко М. А. Результаты опыта по применению стимуляторов и укрывного материала для выращивания сеянцев березы повислой // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. С. 67–71.
23. Пентелькина Н. В., Иванюшева Г. И. Выращивание сеянцев березы повислой с использованием регуляторов роста // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 31. С. 193–197.
24. Кречин Д. П. Выращивание сеянцев березы повислой под полиэтиленовой пленкой // Современные проблемы агропромышленного комплекса: сб. науч. тр. РИЦ СГСХА. Кинель, 2016. С. 237–239.
25. Крючин Н. П., Артамонова О. А., Артамонов Е. И. Результаты исследований размерно-массовых характеристик сухих и замоченных семян сосны обыкновенной и березы бородавчатой // Актуальные проблемы аграрной науки и пути их решения. 2016. С. 24–28.
26. Зайцев Г. Н. Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1973. 256 с.
27. Gomez K. A., Gomez A. Statistical procedures for agricultural research. 2nd edit. New York: John Wiley and Sons, 1984. 680 p.
28. Hari P., Luukkanen O. Field studies of photosynthesis as affected by water stress, temperature, and light in birch // Physiologia Plantarum. 1974. Vol. 32, issue 2. P. 97–102. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1974.tb03734.x.

29. Якимов Н. И., Крук Н. К., Юренин А. В. Особенности агротехники выращивания сеянцев березы повислой в лесных питомниках // Труды БГТУ. 2013. № 1: Лесное хоз-во. С. 196–199.
30. Несекрыты выращивания березы // Лесное и охотничье хозяйство. 2023. № 5. С. 2–11.

References

1. Chizhov B. E., Agafonov E. Yu., Kozinets V. A. Peculiarities of seed renewal of birch trees in the forest-steppe of Western Siberia. *Lesnaya i lesnyye khozyaystvo Zapadnoy Sibiri* [Forests and forestry of Western Siberia], 2008, vol. 8, pp. 104–111 (In Russian).
2. Rodionova A. S. *Lesnaya botanika (Morfologiya i sistematika rasteniy)* [Forest botany (Morphology and systematics of plants)]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1980. 243 p. (In Russian).
3. Kaleda V. M. *Biologiya plodonosheniya berezy povisloy (Betula pendula Roth.) v lesostepnykh rayonakh Zapadnoy Sibiri. Avtoreferat dissertatsii kandidata sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Biology of fruiting of silver birch (*Betula pendula* Roth.) in forest-steppe areas of Western Siberia. Abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Kulunda, 1984. 21 p. (In Russian).
4. Krasnobaeva K. V., Mityashina S. Y., Lukin I. F., Singatullin I. K. Dynamics of fruiting of silver birch ash. *Lesnoye Khozyaystvo [Forestry]*, 2007, no. 1, pp. 33–34 (In Russian).
5. Bazhina E. V., Skripalshchikova L. N., Barchenkov A. P. Features of fruiting of silver birch in the Krasnoyarsk forest-steppe. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2018, no. 6, pp. 112–120 (In Russian).
6. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Influence of cadmium ions on germination of seeds of Karelian birch and silver birch. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, no. 3, pp. 130–137. DOI: 10.17076/eb1195 (In Russian).
7. Chengjun Y., Guiying L. Effect of NaCl stress on germination of birch seeds. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014, no. 6 (6), pp. 1980–1986.
8. Brown M. T., Wilkins D. A. The effects of zinc on germination, survival and growth of *Betula* seed. *Environmental Pollution* ser. A, Ecological and Biological, 1986, vol. 41, pp. 53–61. DOI: 10.1016/0143-1471(86)90106-6.
9. Reyes O., Casal M., Trabaud L. The influence of population, fire and time of dissemination on the germination of *Betula pendula* seeds. *Plant Ecology*, 1997, no. 133, pp. 201–208. DOI: 10.1023/A:1009751513547.
10. Nakvasina E. N., Nekrasova A. V., Prozherina N. A. Comparison of birch (*Betula pendula* Roth.) with different types of bark on vegetative and generative traits. *Lesnoy vestnik* [Forest Bulletin], 2019, no. 1, pp. 28–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-28-36 (In Russian).
11. Tylkowski T. *Betula pendula* seed storage and sowing pre-treatment: effect on germination and seedling emergence in container cultivation. *Dendrobiology*, 2012, vol. 67, pp. 49–58.
12. Szabla K., Pabian R. Szkółkarstwo kontenerowe. *Nowe technologie i technik w szkółkarstwie leśnym*. Warsaw, CLIP Publ., 2009. 251 p. (In Polish).
13. Chmielarczyk P. Cryopreservation of conditionally dormant orthodox seeds of *Betula pendula*. *Acta Physiol Plant*, 2010, no. 32, pp. 591–596. DOI: 10.1007/s11738-009-0437-6.
14. Krechetova N. V. *Spravochnik po lesosennomu delu* [Handbook of forest seed production]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 334 p. (In Russian).
15. Ahola V., Leinonen K. Responses of *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Pinus sylvestris* seeds to red/far:red ratios as affected by moist chilling and germination temperature. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, pp. 1709–1717. DOI: 10.1139/x99-128.
16. De Atrip N., O'reilly C. Effect of seed moisture content during prechilling on the germination response of alder and birch seeds. *Seed Science and Technology*, 2005, vol. 33, pp. 363–373. DOI: 10.15258/sst.2005.33.2.09.
17. Vanhatalo V., Leinonen K., Rita H., Nygren M. Effect of prechilling on the dormancy of *Betula pendula* seeds. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, vol. 26, pp. 1203–1208. DOI: 10.1139/x26-134.
18. De Atrip N., O'Reilly C. Germination response of alder and birch seeds to applied gibberellic acid and priming treatments in combination with chilling. *Annals of Forest Science*, 2007, no. 64 (4), pp. 385–394. DOI: 10.1051/forest:2007015.
19. Novoseltseva A. I. *Spravochnik po lesnym pitomnikam* [Handbook on forest nurseries]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 280 p. (In Russian).
20. Kononov V. F. *Bereza povislaja na Juzhnom Urale: struktura populyatsiy, selektsiya i vosproizvodstvo. Dissertatsiya doktora sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Birch ash in the Southern Urals: structure of populations, selection and reproduction. Dissertation DSc (Agriculture)]. Yoshkar-Ola, 2003. 503 p. (In Russian).
21. Kabanova S. A., Bortsov V. A., Danchenko M. A. Results of the experiment on pre-sowing seed treatment and cultivation of silver birch seedlings in the closed ground. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2019, no. 3, pp. 16–24. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/2 (In Russian).
22. Kabanova S. A., Danchenko M. A. Results of the experiment on the use of stimulants and sheltering material for growing seedlings of silver birch. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2018, no. 4, pp. 67–71 (In Russian).

23. Pentelkina N. V., Ivanyusheva G. I. Growing silver birch seedlings with the use of growth regulators. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of forest complex], 2012, no. 31, pp. 193–197 (In Russian).
24. Krechin D. P. Cultivation of silver birch seedlings in the greenhouse. *Sovremennyye problemy agropromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov: RIS SGSKHA* [Modern problems of agroindustrial complex: collection of scientific papers of: RIC SGSKHA]. Kinel, 2016, pp. 237–239 (In Russian).
25. Kryuchin N. P., Artamonova O. A., Artamonov E. I. Results of studies of size-mass characteristics of dry and soaked seeds of common pine and silver birch. *Aktual'nye problemy agrarnoy nauki i puti ikh resheniya* [Actual problems of agrarian science and ways of their solution], 2016, pp. 24–28 (In Russian).
26. Zaitsev G. N. *Metodika biometricheskih raschetov. Matematicheskaya statistika v eksperimental'noy botanike* [Methodology of biometric calculations. Mathematical statistics in experimental botany]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 256 p. (In Russian).
27. Gomez K. A., Gomez A. A. Statistical procedures for agricultural research. 2nd edit. New York, John Wiley and Sons Publ., 1984. 680 p.
28. Hari P., Luukkanen O. Field studies of photosynthesis as affected by water stress, temperature, and light in birch. *Physiologia Plantarum*, 1974, vol. 32, issue 2, pp. 97–102. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1974.tb03734.x.
29. Yakimov N. I., Kruk N. K., Yurenaya A. V. Features of agrotechnics of growing silver birch seedlings in forest nurseries. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 1: Forestry, pp. 196–199 (In Russian).
30. Not the secrets of growing birch. *Lesnoe i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2023, no 5, pp. 2–11 (In Russian).

Информация об авторах

Татун Евгений Владимирович – аспирант кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: evgeniy.tatun@mail.ru

Носников Вадим Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nosnikov@belstu.by

Information about the authors

Tatun Yauheni Uladzimiravich – PhD student, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evgeniy.tatun@mail.ru

Nosnikov Vadim Valer'evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nosnikov@belstu.by

Поступила 05.11.2024

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING

УДК 630*443.3

А. А. Сазонов¹, А. М. Нестюк², Д. А. Бабуль¹, П. А. Богаченко³, С. А. Жданович³,
А. С. Зур³, П. В. Пацукевич¹

¹РУП «Белгослес»

²Белорусский государственный технологический университет

³ГУ по защите и мониторингу леса «Беллесозащита»

ДИАГНОСТИКА ГНИЛЕВЫХ БОЛЕЗНЕЙ В ЕЛЬНИКАХ БЕЛАРУСИ

На основании литературных данных, производственного опыта, исследований пораженности еловых насаждений гнилевыми болезнями на пробных площадях с использованием различных методов, а также диагностической рубки еловых древостоев предложены доступные в производственных условиях методы диагностики гнилевых болезней в ельниках. Проанализированы внешние признаки поражения деревьев гнилями и выявлены те из них, которые с высокой вероятностью указывают на наличие гнили в стволе – сухобочины с гнилью, морозные трещины ствола и плодовые тела грибов. Остальные признаки не являются надежными, и их не следует использовать для диагностики гнилевых болезней в ельниках. Из инструментальных методов наиболее точные результаты дает применение возрастного бурава, а для массового применения в производственных условиях эффективнее использовать сверла в сочетании с электрической или аккумуляторной дрелью. В древостоях 20–60 лет наиболее точные данные о пораженности гнилями можно получить при сверлении горизонтальных корней, а в более старшем возрасте – при сверлении ствола на высоте 0,3–0,4 м. Для получения достоверной оценки степени поражения древостоя гнилью достаточно исследовать 30–50 стволов, при этом чем выше степень поражения, тем меньшее количество деревьев может быть в выборке.

Ключевые слова: *Heterobasidion parviporum*, *Picea abies*, диагностика, корневые гнили.

Для цитирования: Сазонов А. А., Нестюк А. М., Бабуль Д. А., Богаченко П. А., Жданович С. А., Зур А. С., Пацукевич П. В. Диагностика гнилевых болезней в ельниках Беларуси // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 48–58.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-5.

А. А. Sazonov¹, А. М. Nestyuk², D. A. Babul¹, P. A. Bogachenko³, S. A. Zhdanovich³,
A. S. Zur³, P. V. Patsukevich¹

¹Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles”

²Belarusian State Technological University

³State Institution for Forest Protection and Monitoring “Bellesozashchita”

DIAGNOSTICS OF ROT DISEASES IN SPRUCE FORESTS OF BELARUS

Based on literature data, production experience, research on the infestation of spruce plantations by rot diseases on trial plots using various methods, as well as diagnostic felling of spruce stands, methods for diagnosing rot diseases in spruce forests, available under production conditions, have been proposed. External signs of tree rot damage were analyzed and those that most likely indicate the presence of rot in the trunk were identified – dry bogs with rot, frosty cracks in the trunk and fruiting bodies of mushrooms. The remaining signs are not reliable and should not be used to diagnose rot diseases in spruce forests. Of the instrumental methods, the most accurate results are obtained by using an age drill,

and for mass use in production conditions it is better to use drills in combination with an electric or cordless drill. In tree stands 20–60 years old, the most accurate data on rot infestation can be obtained by drilling horizontal roots, and in older trees by drilling the trunk at a height of 0.3–0.4 m. To obtain a reliable assessment of the degree of damage to a tree stand by rot, it is sufficient to examine 30–50 trunks, and the higher the degree of damage, the fewer trees can be in the sample.

Keywords: *Heterobasidion parviporum*, *Picea abies*, diagnostics, root rot.

For citation: Sazonov A. A., Nestyuk A. M., Babul' D. A., Bogachenko P. A., Zhdanovich S. A., Zur A. S., Patsukevich P. V. Diagnostics of rot diseases in spruce forests of Belarus. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 48–58 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-5.

Введение. Поражение лесов дереворазрушающими грибами является одним из естественных факторов нарушений в лесных экосистемах [1]. Но в условиях интенсивного ведения лесного хозяйства на территории Беларуси уровень грибного поражения во многих насаждениях повышается вплоть до формирования очагов корневых и стволовых гнилей, сопровождающихся снижением продуктивности с последующим разрушением древостоя.

Еловые леса особенно подвержены гнилевому поражению. Специальными лесопатологическими обследованиями, проведенными в 1980-х гг., было установлено, что встречаемость пораженных корневой губкой ельников составляет в среднем по республике 47,4%, пораженных опенком – 23,9% [2, 3]. В настоящий момент лесная статистика показывает значительно меньшую встречаемость этих патогенов. Так, на начало 2023 г. в ельниках было выявлено 1026,3 га очагов корневой губки, что составляет 0,13% площади еловых лесов Беларуси [4]. К началу 2024 г. площадь выявленных очагов корневой губки возросла до 2771,0 га (0,37%) [5]. Очаги опенка не зафиксированы вовсе.

Подобное положение следует объяснять не столько сокращением площади очагов данной группы вредных организмов, сколько трудностями в диагностике гнилевых болезней в ельниках. Определенное влияние оказало и продолжающееся с 1993 г. массовое короедное усыхание еловых древостоев, вынудившее лесоводов сосредоточиться на решении этой более острой проблемы [6].

Последние исследования в области разработки методов диагностики корневых и стволовых гнилей в ельниках Беларуси проводились в 1970-х и 1990-х годах соответственно [7, 8]. За истекшее время накоплен определенный производственный опыт, появились новые приборы и инструменты, которые можно использовать для диагностики поражения ельников гниевыми болезнями. Поэтому целесообразно испытать имеющееся оборудование, обобщить литературные сведения и на основании доступной информации предложить пути решения этой проблемы.

Основная часть. Патогены, вызывающие гнили у ели европейской, можно условно разделить на три группы по способу проникновения в дерево.

Возбудители гнилей, проникающие в ствол из корней. Корневая губка (род *Heterobasidion*) – в мире насчитывается 19 видов, из них в Европе 3 вида, 2 из которых встречаются в Беларуси: сосновая корневая губка (*H. annosum* (Fr.) Bref.) и еловая корневая губка (*H. parviporum* Niemelä & Korhonen). Оба этих вида поражают ель европейскую и имеют сходные симптомы. При этом вызываемые ими гнили на ели внешне не различаются, но плодовые тела имеют определенные отличия – у еловой корневой губки более сильное опушение верхней стороны плодовых тел и более мелкие поры гименофора [9]. В целом для опытного специалиста плодовые тела визуально различимы, но сильная вариабельность их морфологических показателей для диагностики до вида создает необходимость применения молекулярно-генетических методов идентификации.

Опенк (род *Armillaria*) – крупный родовой таксон преимущественно ксилотрофных грибов, который включает 114 видов, из них в Европе встречается только 8 видов, 4 из которых обнаружены в Беларуси: опенок северный (*A. borealis* Marxm. & Korhonen), опенок еловый (темный) (*A. ostoyae* (Romagn.) Herink), опенок луковичноногий (*A. cepistipes* Velen.), опенок толстоногий (*A. gallica* Marxm. & Romagn.). В условиях нашей республики на ели развивается преимущественно опенок еловый [10]. Как и в случае с корневой губкой, гнили от различных видов опенка визуально не различаются, но существуют определители, основанные на морфологических признаках плодовых тел и ризоморф. Однако из-за высокой вариабельности внешних признаков диагностика вида опенка может быть уточнена молекулярно-генетическими методами.

Возбудители гнилей, проникающие в ствол через механические повреждения. По данным проведенных исследований [8], в условиях Беларуси основными дереворазрушающими грибами, проникающими в ствол ели подобным образом, являются амилостереум ареолированный (*Amylostereum areolatum* (Chaillat ex Fr.) Boidin),

стереум кроваво-красный (*Stereum sanguinolentum* (Alb. & Schwein.) Fr.) и постия вяжущая (*Tyromyces stipiticus* (Pers.) Kotl. & Pouzar). Последний колонизирует преимущественно старые раны в приспевающих и спелых насаждениях.

Возбудители гнилей, развивающиеся преимущественно на мертвой древесине, но способные колонизировать и живые деревья. В данную группу входит большое количество видов деструктивных грибов, которые в обычных условиях колонизируют мертвые деревья, но способны (через отмершие сучья, сухобочины) переходить и на живые части стволов. Наиболее часто встречается в ельниках окаймленный трутовик (*Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst.) и северный трутовик (*Climacocystis borealis* (Fr.) Kotl. & Pouzar).

Плодовые тела грибов, которые являются возбудителями корневых и стволовых гнилей ели, появляются на пораженных деревьях относительно редко. Чаще заболевание можно выявить по наличию самой гнили в стволе и корнях. Поэтому необходимо иметь представление о типах гнилей и стадиях гниения, чтобы осуществлять диагностику поражения лесов гниевыми болезнями.

Различают два основных типа гниения древесины: коррозионный, при котором разлагается преимущественно лигнин, высвобождая при этом волокна целлюлозы в виде белой гнили, и деструктивный, когда быстрее разлагается целлюлоза с формированием бурой гнили [11]. У хвойных пород из-за особенностей строения древесины при коррозионном типе гниения типичные белые гнили встречаются редко. Чаще формируются пестрые ситовые гнили, характеризующиеся ячеистой структурой и неравномерным окрашиванием пораженной древесины. На конечной стадии гниения древесина приобретает мочалистую структуру и ее можно расщеплять руками на отдельные волокна. Бурые деструктивные гнили встречаются на всех древесных породах, в том числе на ели европейской. Пораженная древесина при этом типе гниения приобретает бурую окраску и распадается на призматические кусочки, легко растираемые пальцами в порошок.

Процесс биохимического разложения древесины подразделяется на несколько этапов. Различные исследователи выделяют от 2 до 4 стадий развития гнилей [12]. Для диагностики поражения ели гниевыми болезнями целесообразно выделять 4 стадии гниения:

- 1) изменение окраски древесины без существенного нарушения ее плотности и механических качеств;
- 2) изменение окраски и плотности древесины, заметное снижение прочности;
- 3) достижение стадии типичной гнили, сильное снижение плотности и механических свойств;

4) разрушение самой гнили с образованием дупла.

Корневая губка на ели вызывает типичную ядровую пеструю ситовую гниль, которая не проникает в заболонь, а лишь иногда, при наличии сухобочин, выходит на поверхность ствола. Она вызывает хроническое заболевание и способна развиваться на ели десятилетиями, провоцируя медленное ослабление деревьев и поднимаясь по ядровой части ствола на высоту до 8–12 м, что сильно снижает технические качества древесины (рис. 1).



Гниль I стадии



Гниль II стадии



Гниль III стадии



Гниль IV стадии

Рис. 1. Гниль от корневой губки на еловых пнях

Опенки на ели также вызывают пеструю ситовую гниль, которая в отличие от корневой губки не является ядровой, а может быть либо заболонной, как армиллариозная гниль на сосне или дубе, либо может располагаться в любом месте поперечного сечения ствола (рис. 2). От корневой губки ее отличают более сильное окрашивание древесины по периметру гнили; высокая скорость гниения и, как следствие, более сильное разложение древесины; мочалистая структура гнили на конечной стадии с пленками мицелия (рис. 3); проникновение в ствол на небольшую высоту – обычно не выше 2 м. В целом поражение опенком является более острым заболеванием и способно быстрее приводить деревья к гибели.

В природных условиях нередко можно встретить совместное поражение дерева несколькими возбудителями гнилей. В этом случае участки, пораженные армиллариозом, отделяются от занятых другими грибными патогенами зон темными линиями – ксилостромами, которые представляют собой видоизменения мицелия, предназначенные для создания механического барьера,

предотвращающего распространение конкурирующих штаммов грибов [3]. Наличие ксилостром и ризоморф является надежным диагностическим признаком поражения дерева опенком.



Рис. 2. Гниль от опенка III стадии на еловом пне



Рис. 3. Белые пленки мицелия в пестрой ситовой гнили – характерный признак армилляриозной гнили ели

Грибы, вызывающие бурые деструктивные гнили (окаймленный и северный трутовики, стереум кроваво-красный, постия вязущая), считаются менее опасными паразитами, развитие которых связано с отмершими сучьями, сухобочинами и механическими повреждениями ствола. При наличии ворот для проникновения инфекции они вызывают гнили, захватывающие ядро и часть заболони в местах повреждения или поврежденный сектор ствола (рис. 4). Считается, что их экологическая роль заключается в ускорении отмирания перестойных древостоев [13].

Методы диагностики корневых и стволовых гнилей. Все имеющиеся методы диагностики корневых и стволовых гнилей можно разделить на визуальные и инструментальные. Визуальные методы основаны на наблюдении внешних признаков и симптомов заболевания без использования

приборов и инструментов. Инструментальные основаны на применении различного вспомогательного оборудования.



Рис. 4. Бурая деструктивная гниль на еловом пне, возбудитель которой проник в ствол через сухобочину

Еловые древостои могут быть очень сильно поражены корневыми гнилями, и применение различных методов диагностики на одном и том же участке может дать существенно отличающиеся между собой результаты. В литературе описан эксперимент, проведенный в середине 1970-х гг. в 30-летнем ельнике мшистом, составом 10Е, I бонитета с полнотой 0,7, произрастающем в Дзержинском лесничестве Минского лесхоза [2, 7]. При вырубке деревьев и раскопке корневых систем с дальнейшим анализом на предмет наличия гнили выяснилось, что у 41 дерева на исследуемом участке ельника пораженность корневыми гнилями составила 95,1%. Причем с гнилью только в корнях было 53,6% деревьев ели, а с гнилью в корнях и стволе – 41,5%. При визуальном способе диагностики больные деревья составили 29%. Количество пораженных деревьев, определенных с помощью бурава по кернам древесины, взятым у шейки корня, составило 39%. Наиболее точным оказался способ, заключающийся в высверливании древесины из горизонтальных корневых лап каждого дерева: количество больных деревьев на участке, выявленных таким способом, составило 80,5%.

Как видно из приведенного примера, поражение ельников корневыми гнилями в Беларуси может достигать очень высоких значений. Поэтому с практической точки зрения, если гниль локализована только в корнях и не проникла в ствол, она может вызвать сокращение прироста и ослабление защитных функций дерева, но не снижение технических качеств заготавливаемой древесины. Вред от нее в этом случае ограничен, поэтому вырубать такие деревья в еловых

древостоях экономически нецелесообразно. В случае проникновения гнили в ствол дерева и ее существенного развития (до II–IV стадии гниения) наступает экономический ущерб от снижения технических качеств древесины. Это нежелательное явление следует регулировать путем выявления пораженных стволовыми гнилями деревьев и их удаления из древостоя.

Диагностика гнилевых болезней в ельниках сводится к решению 3 задач.

1. Выявление пораженных древостоев.
2. Определение степени их поражения.
3. Установление пораженных деревьев в древостое.

Для решения каждой из этих задач могут использоваться различные методы. При этом степень поражения древостоя возбудителями гнилей устанавливается по доле пораженных деревьев в процентах от их общего количества (исключая старый сухостой) в соответствии со следующей шкалой (табл. 1).

Таблица 1

Параметры степени поражения еловых древостоев гниевыми болезнями, %

Степень поражения и доля пораженных деревьев		
слабая	средняя	сильная
11–20	21–40	41 и более

Очагами гнилевых болезней в ельниках считаются древостои с долей пораженных деревьев более 10%.

Визуальная диагностика. Наиболее простым и доступным методом выявления гнилевых болезней является использование внешних признаков их развития в древостоях. Из литературных источников известно [7, 14], что в отличие от сосняков, в еловых лесах поражение корневыми и стволовыми гнилями не носит ярко выраженного очагового характера. Пораженные деревья ели в большинстве своем не усыхают, а долгое время сохраняются в древостое. При этом почти все внешние признаки заболевания при диагностике дают большие ошибки. В связи с этим в 2023 г. на базе 6 пробных площадей, заложенных в Новогрудском, Дисненском и Могилевском лесхозах, в насаждениях, представленных наиболее распространенным типом леса – ельником кисличным, в возрасте от 70 до 95 лет, предпринята попытка оценки различных методов и внешних диагностических признаков гнилевых болезней ели европейской. Проверке подлежали следующие 10 признаков:

- снижение прироста вершинного и боковых побегов;
- угнетение соседними деревьями (т. е. отставание в росте в течение длительного времени);

- ажурная крона (дефолиация);
- вздутие ствола в комлевой части;
- наличие опухолево-язвенного рака;
- сухобочины без гнили;
- сухобочины с гнилью (вплоть до образования дупла);
- обильное смолотечение;
- морозные трещины на стволе;
- нахождение дерева рядом с очагом корневой губки, если образовавшееся «окно» четко просматривается в древостое.

В результате было установлено, что из перечисленных выше признаков ни один не является абсолютно надежным, т. е. таким, наличие которого однозначно указывало бы на поражение дерева гнилью, а неимение – на отсутствие гнили. Но существуют отдельные признаки, которые с высокой вероятностью указывают на поражение дерева гнилью. К таковым можно отнести сухобочины с гнилью и морозные трещины (в том числе заросшие). В нашем исследовании у 91,5% деревьев с сухобочинами и 85,7% деревьев с морозными трещинами была обнаружена напечная гниль. Сюда же можно отнести деревья с плодовыми телами дереворазрушающих грибов, хотя на живых елях плодовые тела встречаются редко. Остальные признаки не являются надежными, и их не следует использовать для диагностики гнилевых болезней в ельниках.

С практической точки зрения это означает, что при наличии на дереве сухобочин с гнилью, плодовых тел дереворазрушающих грибов и морозных трещин такие деревья не требуют дополнительной проверки присутствия гнили инструментальными методами.

Кроме симптомов, характерных для отдельных деревьев, существует ряд признаков, указывающих на наличие очага корневых гнилей в насаждении. В первую очередь это «окна» и прогалины, образующиеся в древостоях, хотя в ельниках они выражены значительно слабее, чем в сосняках. Наличие буреломных деревьев с гнилью или ветровальных с гнилыми корнями и плодовыми телами корневой губки на корнях также является надежным диагностическим признаком поражения древостоев корневыми гнилями.

Еще одним хорошим способом выявления очагов корневых гнилей является обследование пней. Лучше всего признаки гнилей наблюдать на пнях свежесрубленных деревьев, но при сильном развитии гнили они обнаруживаются и на старых пнях. Необходимо также обращать внимание на наличие плодовых тел корневой губки, которые могут там формироваться.

Свежие вырубki, которые часто можно наблюдать в ельниках, поврежденных стволовыми вредителями, являются лучшим местом для диагностики поражения древостоев корневыми

гнилями. Если древостой вырублен только на части таксационного выдела то, обследовав вырубку, можно посредством простого перечета пней определить степень поражения этого выдела корневыми гнилями и экстраполировать полученные результаты на оставшуюся часть выдела.

Таким образом, возможности визуального метода диагностики сводятся к выявлению насаждений, пораженных гнилевыми болезнями, при наличии определенных признаков: «окон» и прогалов в древостое; ветровальных и буреломных деревьев с признаками гнилей; пней с гнилью на вырубках или внутри древостоя; деревьев с сухобочинами, морозными трещинами и плодовыми телами грибов. Установить степень поражения насаждения гнилевыми болезнями при помощи этого метода можно только на свежих вырубках. Выявить же с достаточной точностью пораженные деревья внутри древостоя при помощи визуального осмотра не представляется возможным.

Инструментальная диагностика. В литературе упоминается 12 методов диагностики поражения деревьев гнилевыми болезнями при помощи различных приборов и инструментов, которые позволяют уточнить визуальный диагноз [15]. К ним относятся: топор или молоток, металлические стержни (зонды), сверла по дереву, возрастной бурав, измерители электрического сопротивления, портативный измеритель компрессии (механического сопротивления), бур для обнаружения гниения, резистограф, импульсный томограф, импульсный молоток, фрактометр и компьютерный томограф. Из перечисленных методов в 2023 г. на 6 пробных площадях были испытаны следующие инструменты и оборудование, доступные в наших условиях: топор (выстукивание гнили), сверло по дереву, возрастной бурав, резистограф и импульсный томограф. В ходе их применения получены следующие результаты.

1. Топор. В еловых древостоях выстукивание гнили дает неудовлетворительные результаты, так как гниль на IV стадии встречается относительно редко, поэтому от этого метода пришлось сразу отказаться.

2. Сверло по дереву. Для диагностики применялись сверла диаметром 6 мм и длиной не менее 30 см в сочетании с электрической дрелью мощностью 650 Вт и портативным бензиновым генератором такой же мощности (рис. 5, 6). Диагностика поражения дерева гнилью проводилась путем высверливания отверстия до центра ствола или глубже (на всю длину сверла) на высоте 0,3–0,4 м от поверхности почвы. До начала диагностики была проведена тренировка специалистов на модельном дереве, пораженном гнилью от корневой губки, ствол которого после валки был разрезан бензопилой вдоль на всю длину

гнили. Образовавшиеся половины ствола высверливались дрелью (и буравом) в разных местах, чтобы по цвету и консистенции опилок (или внешнему виду керна) научиться определять наличие гнили и стадию гниения древесины. Как показала практика, при помощи сверла тренированный персонал может уверенно выявлять гниль II–IV стадии, если оно при бурении попадает в зону гниения. Гниль I стадии этим методом выявляется редко.



Рис. 5. Применение электрической дрели для диагностики гнили



Здоровая древесина
(светлая стружка)



Гнилая древесина
(бурая стружка)

Рис. 6. Определение наличия гнили по виду стружки

3. Возрастной бурав. Использовались импортные бурава длиной 30 и 40 см. После соответствующей тренировки (см. выше) при помощи этого метода по получаемым кернам можно уверенно выявлять гниль II–IV стадии, а в отдельных случаях даже I стадии (рис. 7, 8).

4. Резистограф. Использовался прибор IML-RESI B400 фирмы IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH (рис. 9). Принцип его действия основан на сверлении древесины сверлом диаметром 2 мм

на глубину до 40 см, с фиксацией крутящего момента, необходимого для преодоления сопротивления древесины вдоль входного отверстия.



Рис. 7. Обследование дерева при помощи возрастного бурава

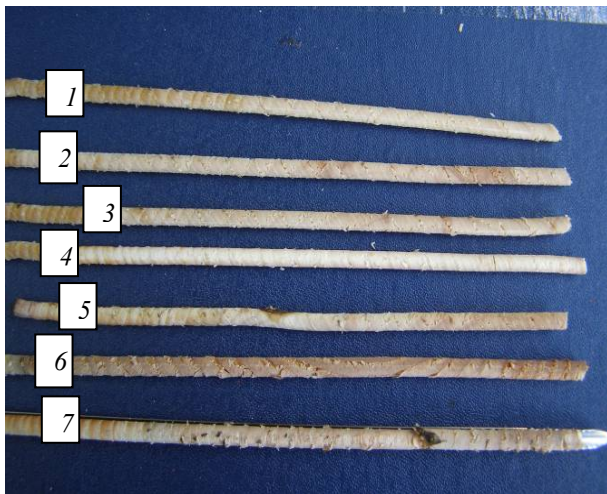


Рис. 8. Керны здоровой (1–4) и гнилой (5–7) древесины

Информация при этом выводится на печать в виде резистогаммы – графика величины крутящего момента на различной глубине ствола. Как показали проведенные испытания, гниль III и IV стадий отображается на резистогамме в виде аномалии графика – его прогиба вниз в местах гниения (рис. 10).



Рис. 9. Обследование дерева при помощи резистографа



Рис. 10. Резистогамма гнили на III стадии гниения

Но уже при гнили II стадии резистогамма может не иметь аномалий, хотя на поперечном срезе визуально гниль четко читается. Таким образом, при помощи резистографа можно выявлять гнили у ели только на III и IV стадиях гниения, а уже на II стадии получаются трудно интерпретируемые результаты, которые требуют уточнения другими методами.

5. Импульсный томограф. Использовался прибор ARBOTOM фирмы RINNTECH (Германия) (рис. 11). Результатом обследования деревьев прибором ARBOTOM было изображение (томограмма) поперечного сечения ствола на уровне размещения датчиков (0,3–0,4 м от поверхности почвы), выводимое на экран ноутбука и отображающее изменение плотности древесины на основании измерения скорости прохождения звуковых волн между датчиками (рис. 12). Красный цвет на томограмме свидетельствует о наличии аномалий в древесине, мешающих быстрому прохождению звуковых волн.



Рис. 11. Обследование дерева при помощи импульсного томографа

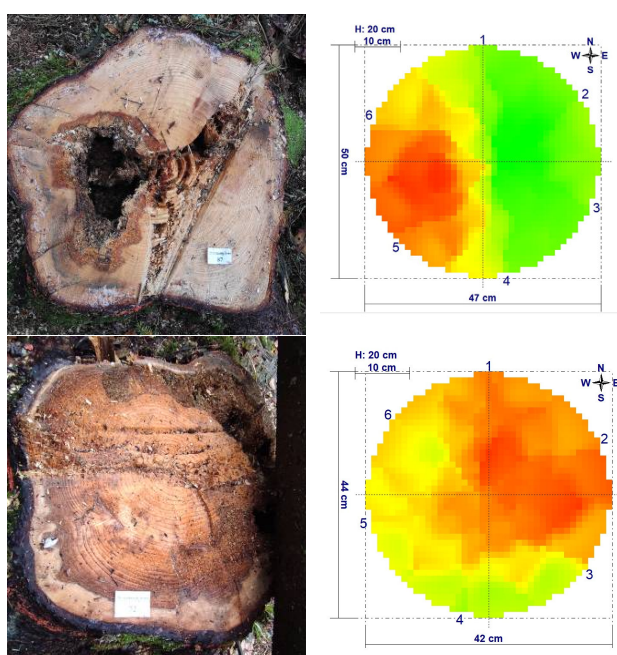


Рис. 12. Напенные гнили III–IV стадии и их томограммы

Как и в случае с резистографом, импульсный томограф позволяет выявлять гниль на III и IV стадиях гниения, когда древесина подверглась сильной деградации. Но на I и II стадиях прибор дает трудно интерпретируемые данные, которые не позволяют сделать однозначных выводов.

Заключение. На основании проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- метод выстукивания гнили при помощи топора или молотка непригоден для использования в еловых древостоях;

- испытанное высокотехнологичное оборудование (резистограф, импульсный томограф) позволяет выявлять гнили только на III и IV стадиях гниения. В связи с низкой производительностью (затраты времени на анализ одного дерева составляют от 10 до 30 мин) эти приборы следует признать непригодными для проведения массовых обследований еловых древостоев;

- наиболее перспективно для обследований в производственных условиях применение сверла по дереву в сочетании с электрической или аккумуляторной дрелью. Этот метод позволяет выявлять деревья с гнилью на II–IV стадиях, затрачивая при этом на диагностику одного дерева не больше 1–2 мин. Сама диагностика проста: появление в процессе сверления бурых опилок означает наличие гнили II стадии, а «проваливание» сверла внутрь ствола – гнили III–IV стадии. После небольшого обучения в полевых условиях бригада из 2 человек с электрической дрелью и портативным бензиновым генератором способна осуществлять диагностику поражения елового древостоя комлевыми гнилями за 0,5–1 ч, проверяя при этом на наличие гнили 30–50 деревьев. При использовании аккумуляторных инструментов эту работу может выполнять один человек. Для высокопроизводительной работы инструменты должны обладать следующими параметрами: сверло диаметром 5–7 мм и длиной не менее 30 см, запас сверл не менее 5 шт.; электрическая дрель мощностью не менее 650 Вт с бензиновым генератором не меньшей мощности; аккумуляторная дрель с крутящим моментом не менее 50 Нм и бесщеточным двигателем, с запасом аккумуляторов 10–12 шт.;

- наиболее точным методом инструментальной диагностики является использование возрастного бурава, который по керну древесины позволяет выявлять гниль даже на I стадии. Рекомендуется использовать буров длиной не менее 40 см. Применение этого метода связано с затратами ручного труда (массовое бурение требует больших физических усилий). Кроме того, буров изначально предназначен для определения возраста здорового дерева, а бурение гнилых стволов часто приводит к сминанию подгнившей древесины, которая забивает внутренний канал инструмента. Его прочистка занимает много времени и снижает производительность работы. Тем не менее этот метод может быть рекомендован для точной диагностики отдельных деревьев и насаждений, а также для применения на труднодоступных или удаленных участках леса, доставка другого оборудования на которые является проблематичной.

Рекомендованные выше методы диагностики гнилевых болезней имеют определенную погрешность, которую нужно учитывать при принятии решений. Для установления этой погрешности на пробных площадях, где проводилось тестирование выявления гнили при помощи сверла и бурава (от 30 до 50 деревьев на пробной площади), впоследствии выполнена диагностическая рубка всех деревьев с определением пораженности древостоев гнилью по свежим пням. Сравнение уровня гнилевого поражения, полученного различными методами, представлено в табл. 2.

Таблица 2

Оценка уровня гнилевого поражения различными методами, % от числа деревьев ели

Метод оценки	Характеристика древостоя на пробной площади (состав, возраст)					
	9Е1Ос, 80 лет	10Е, 80 лет	9Е1Д, 70 лет	7ЕЗД, 95 лет	7ЕЗБ, 70 лет	9Е1С, 70 лет
Сверлом	60,6	80,4	Нет данных	42,9	40,0	46,9
Буравом	69,7	90,0	21,4	42,9	37,5	37,5
По пням	68,9	84,9	50,5	45,5	70,7	51,5

Оценка показывает, что в еловых древостоях возрастом 80 лет и старше гнилевое поражение может достигать высокого уровня (45,5–84,9%), а развитие гнилей внутри ствола на высоте пня происходит на большей части поперечного сечения. Поэтому оба метода (сверло и бурав) при их применении на высоте 0,3–0,4 м дают близкие результаты, мало отличающиеся от данных, полученных путем пересчета пней. Но уже в 70-летних древостоях могут возникать существенные различия в оценке пораженности разными методами. Это вызвано неравномерным расположением гнили на поперечном сечении ствола (в виде отдельных пятен или секторов), а зачастую и начальной стадией ее развития. Поэтому для повышения точности диагностики в насаждениях до 70-летнего возраста включительно рекомендуется проводить бурение отдельных деревьев с двух сторон. Наиболее точную оценку уровня гнилевого поражения в насаждениях II и III классов возраста можно получить путем бурения всех горизонтальных корневых лап исследуемых деревьев [7]. Для получения достоверной оценки степени поражения древостоя гнилью достаточно исследовать 30–50 стволов, при этом чем выше степень поражения, тем меньшее количество деревьев может быть в выборке.

Для улучшения защиты еловых насаждений от гнилевых болезней необходима дальнейшая работа по следующим направлениям:

- 1) разработка методики определения экономического порога вредоносности гнилевых болезней в ельниках и, как следствие, корректировка возрастов рубки пораженных гнилями древостоев;
- 2) создание биопрепарата для профилактической обработки еловых пней;
- 3) проведение испытаний и внесение в список средств защиты растений, разрешенных к применению в лесном хозяйстве, антисептических препаратов для обработки механических повреждений ствола;
- 4) разработка шкалы категорий состояния деревьев ели европейской по аналогии с соответствующими шкалами для дуба и ясеня, которая бы учитывала признаки в кроне, на стволе и внутренние признаки ослабления деревьев с последующим внесением соответствующих изменений в Санитарные правила в лесах Республики Беларусь [16].

По результатам проведенных исследований разработан и утвержден методический документ Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь – рекомендации по диагностике корневых и стволовых гнилей в еловых насаждениях [17].

Список литературы

1. Научные основы устойчивости лесов к дереворазрушающим грибам / В. Г. Стороженко [и др.]. М.: Наука, 1992. 221 с.
2. Полещук Ю. М. Распространение, вредоносность корневой губки и обоснование мероприятий по защите хвойных насаждений БССР от патогена: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.11. Минск, 1987. 378 л.
3. Арнольбик В. М. Корневая гниль от опенка осеннего в еловых фитоценозах, обоснование и разработка защитных мероприятий в условиях БССР: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.11. Минск, 1986. 241 л.
4. Обзор лесопатологического и санитарного состояния лесного фонда Республики Беларусь за 2022 год и прогноз развития патологических процессов в 2023 году. Ждановичи: Беллесозащита, 2023. 108 с.
5. Обзор лесопатологического и санитарного состояния лесного фонда Республики Беларусь за 2023 год и прогноз развития патологических процессов в 2024 году. Ждановичи: Беллесозащита, 2024. 110 с.
6. Федоров Н. И., Сарнацкий В. В. Особенности формирования еловых лесов Беларуси в связи с их периодическим массовым усыханием. Минск: Технология, 2001. 180 с.
7. Федоров Н. И., Полещук Ю. М. О возможностях ранней диагностики поражения ельников корневой губкой // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1978. № 3. С. 5–6.
8. Ковбаса Н. П. Распространение и развитие раневой гнили в еловых насаждениях Беларуси и меры ограничения вредоносности болезни: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11. Прилуки, Минская обл., 1996. 18 с.
9. Морфологические особенности базидиом *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. и *H. parviporum* Niemela & Korhonen на ели европейской в условиях Беларуси / А. М. Нестюк [и др.] // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 фев. 2023 г. Минск, 2023. С. 242–245.

10. Звягинцев В. Б. Распространенность, вредоносность грибов комплекса *Armillaria* в лесах Беларуси и обоснование лесозащитных мероприятий: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.11. Минск, 2003. 154 л.
11. Федоров Н. И. Лесная фитопатология. Минск: БГТУ, 2004. 462 с.
12. Федоров Н. И. Корневые гнили хвойных пород. М.: Лесная пром-сть, 1984. 160 с.
13. Стороженко В. Г. Гнилевые фауны коренных лесов Русской равнины. М.: ВНИИЛМ, 2002. 154 с.
14. Лебедев А. В. Корневая губка в рекреационных ельниках и диагностика поражения деревьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1998. № 4. С. 29–35.
15. *Heterobasidion annosum*. Biology, Ecology, Impact and Control / Ed. by S. Woodward [et al.]. Cambridge: CAB International Publ., 1998. 589 p.
16. Об утверждении Санитарных правил в лесах Республики Беларусь: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19 дек. 2016 г., № 79 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2016. 8/31603.
17. Рекомендации по диагностике корневых и стволовых гнилей в еловых насаждениях: утв. приказом М-ва лесного хоз-ва 30.04.2024 г. № 95. Минск, 2024. 20 с.

References

1. Storozhenko V. G., Bondartseva M. A., Solov'yev V. A., Krutov V. I. *Nauchnyye osnovy ustoychivosti lesov k derevorazrushayushchim gribam* [Scientific foundations of forest resistance to wood-destroying fungi]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 221 p. (In Russian).
2. Poleshchuk Yu. M. *Rasprostraneniye, vredonosnost' kornevoy gubki i obosnovaniye meropriyatiy po zashchite khvoynyykh nasazhdeniy BSSR ot patogena*. Dissertatsiya doktora sel'skokhozyaystvennykh nauk [Distribution, harmfulness of the root sponge and justification of measures to protect coniferous plantations of the BSSR from the pathogen. Dissertation Doctor (Agriculture)]. Minsk, 1987. 378 p. (In Russian).
3. Arnol'bik V. M. *Kornevaya gnil' ot openka osennego v yelovykh fitotsenozakh, obosnovaniye i razrabotka zashchitnykh meropriyatiy v usloviyakh BSSR*. Dissertatsiya kandidata sel'skokhozyaystvennykh nauk [Root rot from honey fungus in spruce phytocenoses, justification and development of protective measures in the conditions of the BSSR. Dissertation PhD (Agriculture)]. Minsk, 1986. 241 p. (In Russian).
4. *Obzor lesopatologicheskogo i sanitarnogo sostoyaniya lesnogo fonda Respubliki Belarus' za 2022 god i prognoz razvitiya patologicheskikh protsessov v 2023 godu* [Review of forest pathology and sanitary condition of the forest fund of the Republic of Belarus for 2022 and forecast of development of pathological processes in 2023]. Zhdanovich, Bellesozashchita Publ., 2023. 108 p. (In Russian).
5. *Obzor lesopatologicheskogo i sanitarnogo sostoyaniya lesnogo fonda Respubliki Belarus' za 2023 god i prognoz razvitiya patologicheskikh protsessov v 2024 godu* [Review of forest pathology and sanitary condition of the forest fund of the Republic of Belarus for 2023 and forecast of development of pathological processes in 2024]. Zhdanovich, Bellesozashchita Publ., 2024. 110 p. (In Russian).
6. Fedorov N. I., Samatskiy V. V. *Osobennosti formirovaniya yelovykh lesov Belarusi v svyazi s ikh periodicheskim massovym usykhaniyem* [Features of the formation of spruce forests of Belarus in connection with their periodic mass drying out]. Minsk, Tekhnologiya Publ., 2001. 180 p. (In Russian).
7. Fedorov N. I., Poleshchuk Yu. M. On the possibilities of early diagnosis of damage to spruce forests by root rot. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forestry Journal], 1978, no. 3, pp. 5–6 (In Russian).
8. Kovbasa N. P. *Rasprostraneniye i razvitiye ranevoy gnili v yelovykh nasazhdeniyakh Belarusi i mery ogranicheniya vredonosnosti bolezni. Avtoreferat dissertatsii kandidata biologicheskikh nauk* [Spread and development of wound rot in spruce plantations of Belarus and measures to limit the harmfulness of the disease. Abstract of thesis PhD (Biology)]. Priluki, Minsk region, 1996. 18 p. (In Russian).
9. Nestyuk A. M., Romanenko M. O., Yarmolovich V. A., Baranov O. Yu. Morphological features of basidiomes of *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. and *H. parviporum* Niemela & Korhonen on Norway spruce in Belarus. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: materials of the 87th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduate students]. Minsk, 2023, pp. 242–245 (In Russian).
10. Zvyagintsev V. B. *Rasprostranennost', vredonosnost' gribov kompleksa Armillaria v lesakh Belarusi i obosnovaniye lesozashchitnykh meropriyatiy*. Dissertatsiya kandidata biologicheskikh nauk [Prevalence, harmfulness of fungi of the *Armillaria* complex in the forests of Belarus and justification of forest protection measures. Dissertation PhD (Biology)]. Minsk, 2003. 154 p. (In Russian).
11. Fedorov N. I. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Minsk, BSTU Publ., 2004. 462 p. (In Russian).
12. Fedorov N. I. *Kornevyye gnili khvoynyykh porod* [Root rot of coniferous trees]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 160 p. (In Russian).
13. Storozhenko V. G. *Gnilevyye fauty korenykh lesov Russkoy ravniny* [Rotten fallouts of indigenous forests of the Russian Plain]. Moscow, VNIILM Publ., 2002. 154 p. (In Russian).

14. Lebedev A. V. Root rot in recreational spruce forests and diagnostics of tree damage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forestry Journal], 1998, no. 4, pp. 29–35 (In Russian).
15. *Heterobasidion annosum*. Biology, Ecology, Impact and Control. Edited by S. Woodward [et al.] Cambridge, CAB International Publ., 1998. 589 p.
16. On approval of Sanitary forest regulations in the Republic of Belarus: decree of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, December 19, 2016, no. 79. *Natsional'nyy reyestr pravovykh aktov Respubliki Belarus'* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2016, 8/31584 (In Russian).
17. *Rekomendatsii po diagnostike kornevykh i stvolovykh gnilei v yelovykh nasazhdeniyakh: utverzhdeno prikazom Ministerstva lesnogo khozyaystva 30.04.2024 goda, no. 95* [Recommendations for diagnostics of root and stem rot in spruce stands: approved by the Order of the Ministry of Forestry, 30.04.2024, no. 95]. Minsk, 2024. 20 p. (In Russian).

Информация об авторах

Сазонов Александр Александрович – начальник лесоустроительной партии 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (ул. Железнодорожная, 27/1, 220089, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Нестюк Антонина Михайловна – аспирант кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: antonina.nestyuk95@gmail.com

Бабуль Дмитрий Александрович – ведущий инженер-таксатор 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (ул. Железнодорожная, 27/1, 220089, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: babuld@bk.ru

Богаченко Петр Александрович – заместитель начальника отдела проектирования и борьбы с вредителями и болезнями леса. ГУ по защите и мониторингу леса «Беллесозащита» (ул. Парковая, 26а, 223031, а. г. Ждановичи, Республика Беларусь). E-mail: bogachenkopa@mail.ru

Жданович Сергей Анатольевич – директор. ГУ по защите и мониторингу леса «Беллесозащита» (ул. Парковая, 26а, 223031, а. г. Ждановичи, Республика Беларусь). E-mail: zhsa82@mail.ru

Зур Александр Сергеевич – начальник отдела проектирования и борьбы с вредителями и болезнями леса. ГУ по защите и мониторингу леса «Беллесозащита» (ул. Парковая, 26а, 223031, а. г. Ждановичи, Республика Беларусь). E-mail: alexander76zur@gmail.com

Пацкевич Павел Викторович – инженер-таксатор II категории 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (ул. Железнодорожная, 27/1, 220089, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pavel_photo@inbox.ru

Information about the authors

Sazonov Aleksandr Aleksandrovich – Head of the Forest Pathology Department, the First Minsk Forest Inventory Expedition. Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1 Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Nestyuk Antonina Mikhailovna – PhD student, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: antonina.nestyuk95@gmail.com

Babul' Dmitry Aleksandrovich – leading appraiser engineer, the First Minsk Forest Inventory Expedition. Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1 Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: babuld@bk.ru

Bogachenko Petr Aleksandrovich – Deputy Head of the Department of Design and Control of Forest Pests and Diseases. State Institution for Forest Protection and Monitoring “Bellesozashchita” (26a Parkovaya str., 223031, agrotown Zhdanovichi, Republic of Belarus). E-mail: bogachenkopa@mail.ru

Zhdanovich Sergey Anatolyevich – director. State Institution for Forest Protection and Monitoring “Bellesozashchita” (26a Parkovaya str., 223031, agrotown Zhdanovichi, Republic of Belarus). E-mail: zhsa82@mail.ru

Zur Alexander Sergeevich – Head of the Department of Design and Control of Forest Pests and Diseases. State Institution for Forest Protection and Monitoring “Bellesozashchita” (26a Parkovaya str., 223031, agrotown Zhdanovichi, Republic of Belarus). E-mail: alexander76zur@gmail.com

Patsukevich Pavel Viktorovich – appraiser engineer of the 2nd category, the First Minsk Forest Inventory Expedition. Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1 Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavel_photo@inbox.ru

Поступила 10.10.2024

ТУРИЗМ И ЛЕСОХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО

TOURISM AND FOREST HUNTING

УДК 63+599.742.4

Е. О. Смолярко¹, Н. Т. Юшкевич²

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский государственный технологический университет

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОЛОВУШЕК В ЦЕЛЯХ МОНИТОРИНГА ЖИВОТНОГО МИРА НА ПРИМЕРЕ ЛОКАЛЬНОЙ ПОПУЛЯЦИИ БАРСУКА (*MELES MELES*)

Сохранение и улучшение биоразнообразия требуют постоянного мониторинга экосистем в качестве источника максимально актуальной информации о текущем состоянии животного и растительного мира. Инфокоммуникационные методы являются действенным, информативным, перспективным направлением изучения диких животных в дополнение к традиционным методам, предусмотренным актуальными техническими и нормативно-правовыми актами Республики Беларусь. На основе многолетнего опыта использования фотоловушек для наблюдения за модельным поселением барсука в статье дается краткая оценка функциональных возможностей и целесообразности использования фотоловушек для обнаружения мест обитания диких животных, учета их численности, а также изучения их образа жизни. Также рассматриваются сложности применения метода и даются предложения по решению возможных проблем. Предлагаемые в статье практические рекомендации по выбору мест установки фотоловушек, их эксплуатации, настройке и обработке полученных материалов применимы в лесохозяйственных учреждениях, охотхозяйствах, научных организациях Республики Беларусь, а также могут быть использованы представителями гражданской науки. Научная значимость применения результатов настоящего исследования заключается в развитии теоретико-методических основ применения фотоловушек при мониторинге животного мира, в частности для учета численности диких животных и изучения их жизнедеятельности.

Ключевые слова: барсук, учет численности, мониторинг диких животных, фотоловушка, суточная активность, антропогенный фактор.

Для цитирования: Смолярко Е. О., Юшкевич Н. Т. Опыт использования фотоловушек в целях мониторинга животного мира на примере локальной популяции барсука (*Meles meles*) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 59–68.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-6.

Е. О. Smolyarko¹, N. T. Yushkevich²

¹Belarusian State University

²Belarusian State Technological University

CAMERA TRAPPING EXPERIENCE IN WILDLIFE MONITORING BY EXAMPLE OF BADGER (*MELES MELES*) SETTLEMENT

Conservation of biodiversity requires a permanent monitoring of ecosystems as a source of the most relevant information on the actual state of local flora and fauna. Infocommunication methods are an effective, informative and contemporary trend of studying wild animals in addition to traditional methods provided by actual technical and regulatory legal acts in the Republic of Belarus. On the basement of long-term monitoring experience of badger settlement the article provides brief review of the functionality and usage of camera traps to find wild animal habitats, to evaluate the population abundance and to study animal's behavioral ecology. Some challenges of using this method and possible solutions are considered. The practical recommendations proposed in the article are applicable in forestry, hunting grounds, scientific organizations of the Republic of Belarus, as well as for citizen science representatives. The scientific application of the results of this study is the development of theoretical and methodological foundations for the use of camera traps in wildlife monitoring.

Keywords: badger, abundance estimation, wild animals monitoring, camera trap, daily activity, anthropogenic factor.

For citation: Smolyarko E. O., Yushkevich N. T. Camera trapping experience in wildlife monitoring by example of badger (*Meles meles*) settlement. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 59–68 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-6.

Введение. Биоразнообразие является основой множества услуг, предоставляемых как на местном, так и на глобальном уровне, а ответы на снижение биоразнообразия могут иметь различный характер – от эмоционального до сугубо утилитарного. Снижение локального биоразнообразия в свою очередь может служить своего рода маркером для своевременного обнаружения более глубоких проблем. Именно поэтому важно вести непрерывный мониторинг состояния как охраняемых представителей растительного и животного мира, находящихся под угрозой исчезновения, так и биоразнообразия в целом.

Согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь от 21 декабря 2021 г. № 733 «О Национальном плане действий по сохранению и устойчивому использованию биологического разнообразия на 2021–2025 годы», сохранение биологического разнообразия в Республике Беларусь и обеспечение его устойчивого использования являются одними из приоритетных направлений государственной политики в экологической сфере и реализуются путем применения различных механизмов, к числу которых относятся:

- осуществление контроля за вселением в уголья новых видов диких животных и дикорастущих растений, а также мер по борьбе с инвазивными чужеродными видами;

- ведение кадастра животного и растительного мира и иных кадастров в части сохранения и устойчивого использования биологического разнообразия;

- осуществление мониторинга животного и растительного мира, комплексного мониторинга экологических систем на особо охраняемых природных территориях.

Фотоловушки – один из наиболее перспективных не прямых методов мониторинга диких животных с применением автоматических устройств для записи, хранения и передачи фото- и видеоматериалов, позволяющих вести наблюдение за животным миром с минимальной степенью влияния на поведенческие особенности диких животных, что дает возможность получать максимально объективную информацию для дальнейшей обработки как в научных, так и сугубо прикладных целях.

Основная часть. Лесные массивы, содержащие в себе множество разнородных областей биоразнообразия, особенно сложны в решении вопросов учета животных из-за их труднодо-

ступности и ограниченности обзора по сравнению с открытыми ландшафтами. Автоматические фотокамеры с датчиками движения и сенсорами (обычно пассивными инфракрасными) уже несколько десятилетий как зарекомендовали себя в качестве мощного инструмента изучения лесных диких животных. Хотя изучение фауны с использованием фотоловушек требует относительно высоких начальных вложений, у этого метода есть существенное преимущество в эксплуатационной стоимости: научному и техническому персоналу нет необходимости работать в районе исследования за исключением непосредственно установки, проверки и снятия оборудования. Метод является менее травматичным как для растительного, так и для животного мира по сравнению с традиционными методами. При достаточном количестве оборудования исследователю доступен массив данных, для обработки которых требуется конкретная статистическая модель (REM – Random Encounter Method, REST – Random Encounter Stay Time или их производные) и план исследования, разработанный под эту модель [1]. Фотоловушки – метод не прямых исследований, который можно применять в различных условиях окружающей среды и при этом получать надежные, достоверные, сравнимые между собой данные без влияния на поведение и реакцию животных.

Тема учета и исследования образа жизни барсука особенно актуальна, поскольку по косвенным признакам в Республике Беларусь отмечается рост его численности и, как следствие, в настоящее время рассматривается возможная корректировка его охранного статуса [2]. С учетом относительной малочисленности и скрытного образа жизни универсальные методики, предусмотренные ТКП 624–2018 (33090) «Технология учета охотничьих животных», дают результат с очень высокой степенью погрешности, не позволяющей делать обоснованные выводы о реальной численности животных с последующей экстраполяцией результатов в масштабах всей страны. В настоящее время для этого в основном применяются методы изучения, подразумевающие использование косвенных данных, либо методы, предполагающие изъятие животных из естественной среды обитания, что недопустимо, когда речь идет о редких и охраняемых видах. Кроме того, подобные методы характеризуются низкой репрезентативностью и высокой степенью погрешности (в том числе при количественной

оценке популяции), поскольку не дают достаточно достоверного представления о тех либо иных аспектах жизнедеятельности в условиях естественной среды обитания. Метод фотоловушек со всеми его производными формами наиболее полно отвечает этим требованиям и поставленным задачам по изучению животных.

В ходе подготовки к настоящему исследованию был осмотрен лесной массив в пределах кварталов 169, 173 и 175 Радосковичского лесничества Молодечненского лесхоза. На данной территории ранее были обнаружены признаки обитания барсука обыкновенного – норы с многочисленными отнорками, покопы, экскременты, следы. В виду преимущественно ночного образа жизни барсука возможность непосредственного наблюдения животных была исключена, поэтому подтвердить обитание в норах именно барсука и достоверно оценить его численность традиционными методами оказалось невозможно, что и определило выбор метода исследования. Наблюдение за животными с помощью фотоловушек определяется как надежный метод оценки размера популяции [3] и ее плотности. Достоверность результатов неоднократно подтверждалась предыдущими исследованиями с использованием фотоловушек, например для оценки плотности заранее известной популяции дикого кабана без необходимости индивидуального распознавания [4–6].

Объектом настоящего исследования является модельное поселение барсука в месте его постоянного обитания в районе деревень Вязынка, Повязынь и Володьки Молодечненского района Минской области. Данная территория расположена на Минской возвышенности Белорусской гряды со средней высотой 200–300 м. Рельеф территории наблюдений – грядово-холмистовувалистый с отдельными моренными и камовыми холмами. На камовых участках крутизна склонов достигает 20–25°. Северный склон возвышенности образует уступ высотой около 50 м и углом наклона 25–30°, выходящий к Нарочано-Вилейской низменности. В антропогенных слоях присутствуют отложения всех оледенений (кроме Поозерского) и межледниковых периодов. Наибольший вклад внесли Днепровское и Сожское (Московское) оледенения, мощность слоев которых превышает 250 м. На вершинах холмов и гряд представлены буровато-коричневые, легкосуглинистые и супесчаные морены с большим количеством валунов. Территорию перерезают долины рек, многочисленные ложины стока, короткие овраги. На пологих склонах сформированы делювиальные шлейфы [7].

Таким образом, географические особенности наблюдаемой местности являются характерными, типичными для проживания барсука – сложный

рельеф с частым чередованием возвышенностей и понижений с преобладанием рыхлых осадочных горных пород в виде песков и супесей, смешанный лес, наличие источников воды [8].

Одной из особенностей территории обитания изучаемой локальной популяции барсука является непосредственная близость населенных пунктов и сельскохозяйственных земель, на которых ведется интенсивное земледелие. Лесной массив находится в аренде Молодечненской районной организационной структуры Белорусского общества охотников и рыболовов и является охотничьими угодьями (за исключением мест обитания охраняемых животных). Особенностью района является также одна из самых высоких в стране плотность дачных и садовых кооперативов, что существенно увеличивает рекреационную нагрузку на близлежащие лесные комплексы особенно в летне-осенний период. Также здесь регулярно проводятся соревнования по спортивному ориентированию. Таким образом, наблюдаемая популяция барсука существует под сильным влиянием ряда антропогенных факторов, что является предметом отдельного изучения с применением фотоловушек. За время проведения исследования собрано достаточное количество данных для формирования предположения о влиянии антропогенного фактора беспокойства животных на их суточную активность [9].

По данным многолетних наблюдений на метеостанции «Вилейка», среднегодовая температура воздуха в районе составляет +5,7°C. Средняя температура января –6,6°C; минимальная температура –37°C. Средняя температура июля составляет +17,6°C; абсолютный максимум +35°C. Протяженность безморозного периода в воздухе составляет около 203 дней. Ежегодно отмечается около 80 дней со среднесуточной температурой воздуха выше +15°C, продолжительность вегетационного периода составляет 187–189 дней. Зимний период с устойчивыми отрицательными температурами начинается в среднем с первых чисел декабря [10].

В ходе исследования применялись фотоловушки производства Suntek (модели серий HC800, HC900) и Bolyguard (модели SG520, BG310) с интегрированным датчиком температуры, позволяющим измерять и записывать температуру окружающей среды в моменты срабатывания устройства. Необходимо отметить, что статистическая выборка данных о температуре с фотоловушек ограничена показаниями только в моменты срабатывания устройства и не в полной мере отражает суточные и годовые колебания температуры, поскольку напрямую завязана на активность животных (срабатывания датчика движения), которая зависит в том числе от времени года (например, активность барсука в период спячки в

зимние месяцы минимальна и измерений мало, в то время как в теплое время года барсук активен и температура фиксируется ежедневно, неоднократно в течение суток). Кроме того, датчики температуры, расположенные в корпусе фотоловушек, имеют значительную погрешность измерений в том числе в большей степени за счет нагрева внутреннего пространства устройства в процессе его работы (нагрев интегральных схем, цифровой светочувствительной матрицы, элементов питания). Эту особенность получаемых таким образом данных непременно требуется учитывать при обработке результатов и при необходимости их верифицировать, корректировать и дополнять данными из других источников, для чего целесообразно использовать отдельные специализированные устройства для сбора, хранения и передачи телеметрической информации (температура, влажность воздуха, атмосферное давление). Так, например, в рамках изучения поведенческой экологии барсука в Дарвинском заповеднике (Россия) положительно зарекомендовала себя система автономной регистрации температуры и влажности на базе решения от Dallas Semiconductor – гигрохроны DS1923-F5 [11]. В исследовании, описываемом в данной статье, для мониторинга микроклимата барсучьих нор применялись логгеры Inkbird IBS-TH1, хранящие в энергонезависимой памяти массив информации о температуре и влажности воздуха объемом до 30 000 записей, что позволяет использовать данное решение в автономном режиме (с поправкой на емкость элемента питания) до полугода. В свою очередь, для мониторинга температуры и влажности окружающей среды использовалось иное решение на базе промышленного гигрохрона DT-171 с емкостью энергонезависимой памяти до 32 000 записей.

Места установки фотоловушек выбирались таргетированным методом (т. е. устанавливались в местах с гарантированным присутствием животных, а именно на обитаемых норах, внутри поселения, на тропах), который в общем случае характеризуется как нежелательный с точки зрения предвзятости сбора статистических данных при учете общей численности диких животных, поскольку при численной оценке популяции животных случайный фактор размещения фотоловушек является обязательным условием [1]. Однако целью данного исследования являлась оценка состояния отдельно взятого модельного поселения, поэтому данный метод оправдан и подходит в том числе не только для оценки численности, но и в целях изучения поведенческих особенностей животных, что в свою очередь находится за рамками существующих моделей оценки численности и плотности популяций типа REM, REST и др.

В общей сложности непрерывные наблюдения за модельной популяцией барсука ведутся с лета

2021 г. В рамках данной статьи рассматриваются статистические данные, полученные за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г., т. е. на протяжении двух календарных лет. В местах организации мониторинга животных в общей сложности постоянно используются около 6 фотоловушек с незначительной их ротацией по причине временного выхода из строя отдельных экземпляров или использования на других объектах, что за два года работы обеспечило 4380 ловушкосуток. Установка нескольких камер в одном месте обитания барсуков произведена для максимально полного охвата территории и нор (отнорков), недосягаемых полем зрения одной камеры, что позволило увеличить достоверность учета животных без индивидуального распознавания особей.

На всех фотоловушках был настроен режим записи видеороликов высокого разрешения в формате FullHD (1080p) с записью звука, сжатием видеопотока кодеком MJPG, частотой кадров 30 fps, общей длительностью записи 30 с и защитным интервалом между срабатываниями датчика 5 с. При указанной настройке режима работы фотоловушки комплекта из 8 аккумуляторных батарей типоразмера AA (R6, LR6) было достаточно для гарантированной бесперебойной работы в течение 2 недель при ежедневной съемке, в том числе с использованием инфракрасной подсветки (наиболее энергоемкий потребитель ресурса питания) в темное время суток. В качестве источника питания при этом использовались никель-металлогидридные аккумуляторные батареи с рабочим напряжением 1,2 В и емкостью 2100 мАч. Таким образом, при необходимости время автономной работы камеры может быть увеличено как за счет использования аккумуляторов более высокой емкости, так и путем замены аккумуляторов на качественные щелочные батареи с напряжением 1,5 В. Кроме того, в целях только лишь обнаружения и учета диких животных (в том числе с индивидуальным распознаванием особей) без необходимости изучения их поведения данный метод целесообразно применять в значительно менее энергозатратном режиме – режиме фотофиксации путем съемки одиночных кадров или серии кадров, сохраняемых в формате JPG в достаточном для дальнейшей обработки качестве снимка. В рамках данного исследования такой подход не применялся, поэтому достоверно оценить время работы фотоловушки в этом режиме возможным не представляется, однако можно предположить, что оно превышает полученные результаты в разы [8].

При настройке длительности времени видеозаписи необходимо отталкиваться в первую очередь от прогнозируемого ресурса фотоловушки по питанию и от предполагаемой модели поведения животных перед ней. При высоком расходе ресурса питания и при невозможности частой

замены элементов питания желательно выбирать небольшую длительность записи 5–10 с, поскольку при критическом разряде батареи и отключении фотоловушки в момент записи видеофайла есть риск повреждения не только текущей видеозаписи, но и файловой системы вместе со всеми сохраненными ранее записями на установленном носителе информации. Выбор места установки фотоловушки также имеет значение при определении требуемой длительности видеоролика. Непродолжительное время записи рекомендуется выбирать для тех мест установки, где животные появляются в кадре на незначительное время транзитом: на тропах или в новых неизученных местах. В местах обитания (выходы из нор, городки), кормления, отдыха животных имеет смысл устанавливать большее время записи – от 30 с до 1 мин, сохраняя при этом баланс с ресурсом элементов питания для каждой отдельно взятой ситуации.

В абсолютном большинстве случаев фотоловушки размещались на стволах деревьев. Крепление фотоловушек осуществлялось с помощью капронового ремня с пружинным механизмом фиксации его затяжки. Кроме ремня возможно применение металлических воротков с дюймовой резьбой для крепления с использованием штативного гнезда, которым оснащаются практически все фотоловушки, а также более сложных механизмов крепления (кронштейнов) фотоловушек на твердых поверхностях как вертикальных, так и горизонтальных. Все они подразумевают травмирование живого дерева путем вворачивания крепления и саморезов в древесину. Такие методы желательно использовать при размещении устройств на валежнике, пнях и остолопах, однако в ряде случаев их размещение на живых деревьях может быть оправдано.

Обработка полученного материала в целях оценки численности, когда важно только определение наличия животного в кадре, идентификация его вида и время нахождения, оптимальна с применением автоматизированных программных средств на базе нейросетевых алгоритмов Camelot, Photospread, Camera Trap Manager и др. [12, 13]. Однако, если речь идет об изучении поведенческих особенностей животных, в настоящее время целесообразно использование ручной обработки материала, для чего требуется отсматривать видеоматериалы индивидуально и вручную вносить информацию в базу данных.

За описываемый период наблюдений фотоловушками в рамках данного исследования было зарегистрировано в общей сложности почти 7000 событий общей длительностью около 60 ч. На фото и видео запечатлены животные, птицы и люди в соотношении 96, 3 и 1% соответственно.

Люди, появлявшиеся в объективе фотоловушек, это охотники, грибники, работники лесхоза,

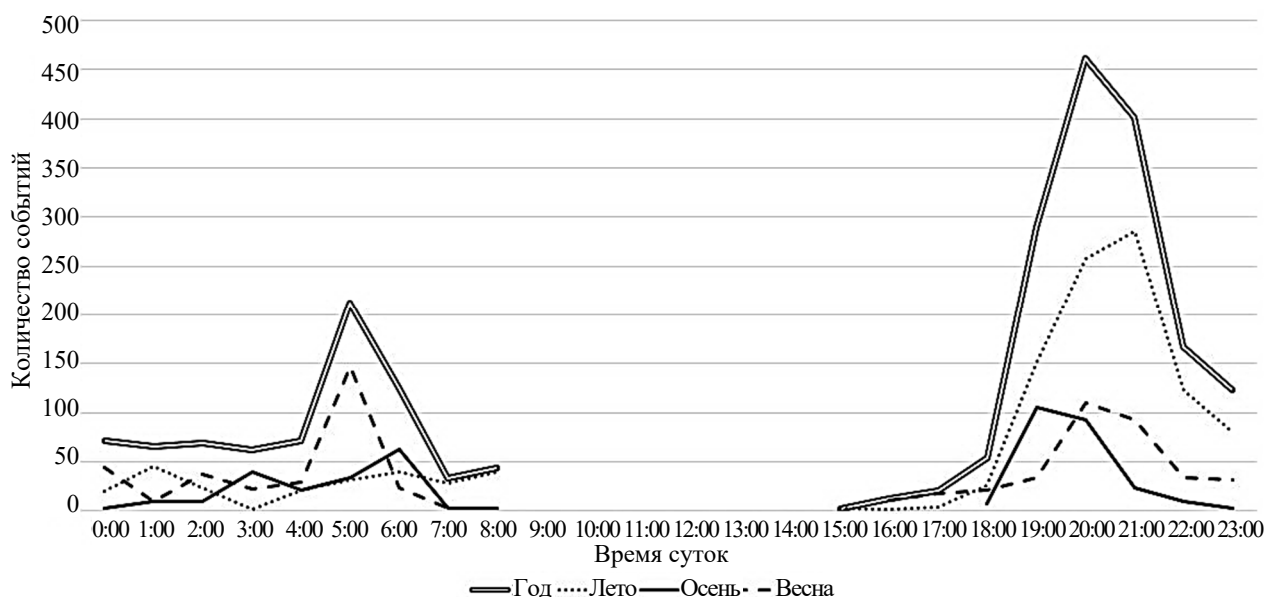
спортсмены-ориентировщики, представители госинспекции. Птицы в основном были представлены дроздами, сойками, дневными и ночными хищниками, яблниками, малиновками, а также единично регистрировались кедровка, желна, рябчик, снегирь.

Видовое разнообразие млекопитающих со значительным количественным перевесом представлено в первую очередь барсуком как целевым видом исследования, а также лисами и собаками, которые интересовались барсучьими норами в силу своей поведенческой специфики. Среди копытных в равной степени запечатлены лось и косуля, в меньшей степени кабан в силу нехарактерного для его обитания биотопа, а среди грызунов – различные виды мышей и белок. Хищники представлены немногочисленными енотовидными собаками, куницей и единичными регистрациями рыси европейской.

Всего за указанный период наблюдений было зарегистрировано 11 видов млекопитающих, из которых 2 занесены в Красную книгу РФ, что в целом сравнимо с результатами аналогичного изучения фауны Березинского биосферного заповедника в 2022 г. [14] и достаточно положительно характеризует биологическое разнообразие и состояние наблюдаемой территории. Полученные данные могут быть использованы в ряде научных исследований, связанных с биологией животных.

Так, например, с точки зрения учета количества особей барсука изучаемой популяции, согласно полученным данным, на наблюдаемом поселении в 2021 г. обитало 2 взрослые особи, а в 2022 г. – уже 6 особей: пара взрослых барсуков и четверо барсучат, которые были впервые зафиксированы в апреле 2022 г. По данным фиксаций осени 2022 г., есть основания предположить, что не все барсучата выжили. В сентябре – октябре достоверно было известно только о двух барсучатах (одновременное нахождение в кадре). При этом после зимней спячки по состоянию на 11 марта 2023 г., был зарегистрирован выход только одного барсука [8].

На основе данных с фотоловушек можно получить поведенческую картину или активность на годичном, сезонном, суточном уровнях [15]. По результатам обработки данных можно утверждать, что большую часть времени возле норы барсук занимается ее чисткой, грумингом и аллогрумингом, сбором и обновлением подстилки из сухой травы и листьев. Активность животных наблюдается с 19:00 до 6:00, с двумя выраженными пиками суточной активности у норы – с 19:00 до 21:00 (выход из норы после дневного отдыха) и с 3:00 до 6:00 (возвращение) с ощутимым перевесом вечерней активности, который объясняется тем, что именно в это время барсук приводит себя и свое жилище в порядок после отдыха. Утром барсук, как правило, возвращается с ночного кормления и надолго у норы не задерживается.



Распределение активности барсука по часовым промежуткам (по вертикальной оси приводится количество 30-секундных видеозаписей с барсуком в кадре суммарно в течение года)

Период спячки барсука зимой 2022 г. завершился в начале весны, когда 20 марта барсуки не только вышли из норы на достаточно продолжительное время, но и занялись ее тщательной чисткой. В середине мая пара барсуков дала потомство, и на ряде кадров фотоловушка запечатлела четырех барсучат.

На графике хорошо отслеживаются сезонные особенности суточной активности животных. В летний период наблюдается не только наибольшая частота активности животных, но и практически постоянная активность особей в течение суток. Немногочисленные выходы барсука летом в середине дня (13:00–15:00) связаны с игровой активностью подрастающих барсучат, которая к осени исчезает по мере их взросления.

Осенняя активность у норы выражена в меньшей степени по сравнению с весенней и летней, что обусловлено необходимостью усиленного питания для создания нужного для зимовки запаса жировых отложений. Зимняя спячка началась в первых числах ноября, в этот период активность животных представлена единичными выходами барсуков без отлучки от норы только для утоления жажды при необходимости (едят снег).

Данные о погодных условиях собраны при анализе видеозаписей и носят несколько субъективный характер. Тем не менее распределение активности выглядит следующим образом: ветреная погода – 2,8%, снегопад – 3,5%, туман – 5,74%, дождь – 11,48%, солнечно – 17,23%. Низкий процент активности при некоторых погодных явлениях (например, во время снегопада) можно объяснить особенностями экологии вида, а именно периодом спячки в зимний период, на который приходится большая часть

снегопадов в течение года, из-за чего в статистике учитываются только те кратковременные снегопады, которые пришлось на период активности животных в межсезонье (конец осени, начало весны). Наибольшая активность (более 40% событий) барсука отмечается в теплое время года, когда температура воздуха составляет 16–26°C. Локальный пик (18,46%) диапазона от 1 до 5°C приходится на периоды перед спячкой и после нее (ноябрь и март), что обусловлено подготовкой жилища к зиме и его чисткой после.

Отдельный интерес представляют выходы барсука из норы на фоне присутствия рядом с ней других видов животных. За отчетный период зафиксировано несколько десятков регистраций, когда в течение 1 ч (гранулярность собираемой статистики) возле отнорка находились белка, лисица, енотовидная собака, косуля, охотничьи собаки, а также птицы (черный дрозд, лесной конек), после чего фиксировался выход барсука. В основном барсук предпочитает не пересекаться с представителями других видов и даже в периоды наибольшей своей активности, в случае присутствия других животных, как правило, из норы не выходит. Однако наблюдались ситуации одновременного бесконфликтного нахождения барсука с другими животными возле норы. Достоверно зафиксированы факты соседства барсуков с косулей и щенком лисицы, когда животные находились в поле зрения друг друга, не проявляя признаков агрессии или беспокойства [15]. В 2023 г. фотоловушками зафиксировано около 200 визитов бродячих и охотничьих собак на барсучье поселение с суммарной длительностью пребывания возле нор около 1,5 ч [9]. Начало и конец суточной

активности барсука, когда он выходит из норы после сна и возвращается назад после ночной кормежки, приходится соответственно на 20:00 и 4:00. При этом нужно заметить, что эти данные относятся к теплому сезону (март – ноябрь), так как в зимние месяцы 2023 г. выходы барсука из нор не фиксировались. При этом данные довольно схожи с таковыми в других частях ареала барсука, например, южнее, в Польше (животные выходили из поселений в 19:00 и возвращались к ним в 3:40) [16], и севернее, в России (в 21:00 и 4:00) [17].

Согласно данным, полученным на модельном поселении барсука, он является животным с сумеречно-ночной активностью, как отмечается для большей части ареала этого вида [16, 18]. Тем не менее рядом исследователей показана и дневная активность барсука [17, 19, 20]. Среди возможных причин подобного характера деятельности рассматривается низкая степень антропогенной нагрузки в районах исследований [21–23]. Возможно, что и на модельной территории настоящего исследования именно антропогенным фактором беспокойства животных и определяется их активность [8].

Заключение. На основе приведенных выше примеров можно сделать вывод о возможности использования записей с фотоловушек даже «постфактум», оперируя архивными данными в целях исследований произвольной направленности, не предусмотренных изначальным проектом по сбору материала. Это характеризует фотоловушки как метод мониторинга диких животных с высокой избыточностью собираемых данных, что по факту является существенным плюсом. Метод положительно зарекомендовал себя при использовании в лесных массивах, где иные способы не применимы или отличаются низкой достоверностью. Значимость его применения обусловлена еще и тем, что он дает возможность уйти от основной проблематики традиционных методов учета диких животных – предвзятости, человеческого фактора и высокой погрешности при оценке численности, плотности и границ изучаемой популяции, а также позволяет устранить влияние присутствия исследователя на реакцию животных в соответствующих исследованиях в области поведенческой экологии. Запись, хранение и максимально полная и грамотная расшифровка видеозаписей с животными позволяет собрать архивный массив данных, область применения которого находится за пределами текущих исследований и может быть впоследствии успешно использована в иных областях науки.

Использование фотоловушек показало, что это неотъемлемый инструмент получения актуальных данных об относительной численности млекопитающих в долговременных стационарных исследованиях. Так, например, опыт применения данного метода исследований на территории Березинского заповедника в настоящее время позволяет получать актуальные данные о динамике популяций диких животных, которые необходимы для понимания происходящих экологических процессов [14].

С использованием фотоловушек возможен сбор сопутствующей информации о популяционных (половозрастная структура, воспроизводство) и поведенческих (активность, взаимодействие с другими видами) особенностях животных. Этот метод может успешно применяться в условиях территорий с ограниченной видимостью и при наблюдении за животными, ведущими скрытный (в том числе ночной) образ жизни. По итогам проведенной работы можно утверждать, что эффективность применения предложенного метода достаточно высока и его можно использовать для мониторинга популяций диких животных с целью оценки их состояния, поскольку предоставляется возможность максимально комплексно отслеживать популяционные динамические процессы и давать оценку жизнедеятельности объектов исследований по ряду параметров.

Преимущество сбора данных в описываемом в работе объеме и формате (особенно при условии сохранения исходного материала) заключается в некоторой исходной избыточности, которая впоследствии дает возможность использовать их для многостороннего анализа, в том числе и в изначально не предусмотренных целях, что позволяет решать задачи в значительно более широком спектре различных областей применения при том же уровне временных, финансовых и трудовых затрат [24].

Достижение целей сохранения и улучшения биоразнообразия как на глобальном, так и национальном уровнях невозможно без непрерывного мониторинга экосистем в качестве источника максимально актуальной информации о текущем состоянии животного и растительного мира. Перспективные методы, включая фотоловушки, используемые для наблюдения за дикими животными и изучения среды их обитания, в полной мере отвечают поставленным задачам и должны применяться с параллельным формированием методической и правовой баз.

Список литературы

1. Hongo S., Nakashima Y., Yajima G. A practical guide for estimating animal density using camera traps: Focus on the REST model // bioRxiv. 2021. DOI: 10.1101/2021.05.18.444583.
2. Кононов С. Барсуку не грозит исчезновение // Паляўнічы і рыбалоў. 2022. № 20. С. 6.

3. Rovero F., Marshall A. R. Camera trapping photographic rate as an index of density in forest ungulates // J. Appl. Ecol. 2009. No. 46 (5). P. 1011–1017. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2009.01705.x.
4. Assessing precision and requirements of three methods to estimate roe deer density / A. Marcon [et al.] // Plos One. 2019. No. 14 (10). P. 1–15. DOI: 10.1371/journal.pone.0222349.
5. Pictures or pellets? Comparing camera trapping and dung counts as methods for estimating population densities of ungulates / S. E. Pfeffer [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2018. No. 4 (2). P. 173–183. DOI: 10.1002/rse2.67.
6. Mortality rates of wild boar *Sus scrofa* L. in central Europe / O. Keuling [et al.] // European Journal of Wildlife Research. 2013. Vol. 59 (6). P. 805–814. DOI: 10.1007/s10344-013-0733-8.
7. Якушка В. П. Радашковіцкае ўзвышша // Беларуская энцыклапедыя: у 18 т. Мінск: БелЭн, 1996–2004. Т. 13. 2001. С. 206–207.
8. Смолярко Е. О., Соловей И. А., Юшкевич Н. Т. Опыт использования фотоловушек для наблюдений за барсуком обыкновенным *Meles meles* // Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых ученых: сб. материалов IX междунар. науч.-практ. конф., р. п. Краснообск, 20 апр. 2023 г. Новосибирск, 2023. Т. I. С. 252–256. URL: [https://sfscs.ru/upload/iblock/690/d5rx9mda3qti50fqweu4ht4qfxjk7mlf/сборн_конф_СМУ-2023_A4_том1%20с%20исправлениями%20в%20печать%20\(1\).pdf](https://sfscs.ru/upload/iblock/690/d5rx9mda3qti50fqweu4ht4qfxjk7mlf/сборн_конф_СМУ-2023_A4_том1%20с%20исправлениями%20в%20печать%20(1).pdf) (дата обращения: 06.11.2024).
9. Смолярко Е. О., Соловей И. А., Юшкевич Н. Т. Некоторые данные об активности барсука обыкновенного *Meles meles* около нор на фоне посещения его поселения собаками // Состояние среды обитания и фауна охотничьих животных России и сопредельных территорий: сб. материалов III междунар., VIII всерос. науч.-практ. конф., Москва, 18–19 марта 2024 г. М., 2024. С. 107–111. URL: https://mooir.ru/statics/uploads/files/Conf_2024.pdf (дата обращения: 06.11.2024).
10. Материалы лесоустройства лесного фонда государственного лесохозяйственного учреждения «Молодечненский лесхоз» Минского государственного производственного лесохозяйственного объединения Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь на период с 01.01.2021 по 31.12.2030. Минск, 2020. 50 с.
11. Сидорчук Н. В., Рожнов В. В. Европейский барсук в Дарвинском заповеднике. Традиционные и новые методы в изучении экологии и поведения норных хищников. М.: КМК, 2010. 122 с.
12. Огурцов С. С. Обзор программного обеспечения для обработки и анализа данных с фотоловушек: последние новинки, работа с видео и ГИС // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. № 4 (2). С. 95–124. DOI: 10.24189/ncr.2019.019.
13. Огурцов С. С., Волков В. П., Желтухин А. С. Обзор современных способов хранения, обработки и анализа данных с фотоловушек в зоологических исследованиях // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2017. № 2 (1). С. 73–98. DOI: 10.24189/ncr.2017.057.
14. Первые результаты мониторинга крупных и средних видов млекопитающих с помощью фотоловушек в Березинском биосферном заповеднике в 2022 году / А. В. Рак [и др.] // Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования. Вып. 18. С. 153–161.
15. Смолярко Е. О., Соловей И. А., Юшкевич Н. Т. Анализ активности барсука *Meles meles* у норы в 2022–2023 биологическом году // Актуальные проблемы экологии: сб. науч. ст. Гродно, 2023. С. 135–137. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/64967> (дата обращения: 06.11.2024).
16. Kowalczyk R., Jedrzejewska B., Zalewski A. Annual and circadian activity patterns of badgers (*Meles meles*) in Białowieża Primeval Forest (eastern Poland) compared with other Palaearctic populations // Journal of Biogeography. 2003. Vol. 30. P. 463–472. DOI: 10.1046/j.1365-2699.2003.00804.x.
17. Sidorchuk N., Rozhnov V. Daily activity of the European Badger (*Meles meles*, *Mustelidae*, *Carnivora*) on setts in Darwin Reserve and Meschera National Park (Russia) in summer and autumn // Nature Conservation Research. 2018. Vol. 3 (2). P. 47–56. DOI: 10.24189/ncr.2018.032.
18. Neal E., Cheeseman C. Badgers. London: T&ADPoyser, 1996. 271 p.
19. Данилов П. И., Туманов И. Л. Куны северо-запада СССР. Л.: Наука, 1976. 256 с.
20. Rodrigues A., Martin R., Delibes M. Space use and activity in a Mediterranean population of badgers *Meles meles* // Acta Theriologica. 1996. Vol. 41 (1). P. 59–72. DOI: 10.4098/AT.arch.96-5.
21. Jenkinson S., Wheate C. P. The influence of public access and sett visibility on badger (*Meles meles*) sett disturbance and persistence // J. Zool. 1998. Vol. 246. P. 478–482. DOI: 10.1111/j.1469-7998.1998.tb00186.x.
22. Activity of badgers (*Meles meles*) in Central Poland / J. Goszczyński [et al.] // Mammalian Biology. 2005. Vol. 70 (1). P. 1–11. DOI: 10.1078/1616-5047-00171.
23. Vigilance in badgers *Meles meles*: the effects of group size and human persecution / F. A. M. Tuytens [et al.] // Acta Theriologica. 2001. Vol. 46 (1). P. 79–86. DOI: 10.1007/BF03192419.
24. Смолярко Е. О. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга и изучения животного мира на особо охраняемых природных территориях // Беспилотные

аппараты «БПЛА – 2024»: сб. ст. междунар. молодежного форума, 22–26 апреля 2024 г. Минск, 2024. С. 80–84. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65208> (дата обращения: 06.11.2024).

References

1. Hongo S., Nakashima Y., Yajima G. A practical guide for estimating animal density using camera traps: Focus on the REST model. *bioRxiv*. 2021. DOI: 10.1101/2021.05.18.444583.
2. Kononov S. No danger of extinction for badger. *Palyaunichy i rybalou* [Hunter and angler], 2022, no. 20, p. 6 (In Russian).
3. Rovero F., Marshall A. R. Camera trapping photographic rate as an index of density in forest ungulates. *J. Appl. Ecol.*, 2009, no. 46 (5), pp. 1011–1017. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2009.01705.x.
4. Marcon A., Battocchio D., Apollonio M., Grignolio S. Assessing precision and requirements of three methods to estimate roe deer density. *Plos One*, 2019, no. 14 (10), pp. 1–15. DOI: 10.1371/022234.
5. Pfeffer S. E., Spitzer R., Andrew M., Allen A. M., Hofmeester T. R., Ericsson G., Widemo F., Singh N. J., Crooms J. Pictures or pellets? Comparing camera trapping and dung counts as methods for estimating population densities of ungulates. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, no. 4 (2), pp. 173–183. DOI: 10.1002/rse2.67.
6. Keuling O., Baubet E., Duscher A., Ebert C., Fischer C., Monaco A., Podgorski T., Prevot C., Ronnenberg K., Sodeikat G., Stier N., Thurfjell H. Mortality rates of wild boar *Sus scrofa* L. in central Europe. *European Journal of Wildlife Research*, 2013, vol. 59 (6), pp. 805–814. DOI: 10.1007/s10344-013-0733-8.
7. Yakushka V. P. Radashkovichi Upland. *Belaruskaya entsyklapedyya: u 18 tamakh* [Belorussian Encyclopedia: in 18 vol.]. Minsk, BelEn Publ., 1996–2004, vol. 13, 2001, pp. 206–207 (In Belarusian).
8. Smolyarko E. O., Solovey I. A., Yushkevich N. T. Camera trapping experience of badger *meles meles* observation. *Noveyshiye napravleniya razvitiya agrarnoy nauki v rabotakh molodykh uchenykh: sbornik materialov IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The latest trends of development of agricultural science in the works of young scientists: collection of materials of the IX international scientific and practical conference]. Novosibirsk, 2023, vol. 1, pp. 252–256. Available at: [https://sfscs.ru/upload/iblock/690/d5rx9mda3qti50fqweu4ht4qfxjk7mlf/сборн_конф_СМУ-2023_A4_том1%20с%20исправлениями%20в%20печать%20\(1\).pdf](https://sfscs.ru/upload/iblock/690/d5rx9mda3qti50fqweu4ht4qfxjk7mlf/сборн_конф_СМУ-2023_A4_том1%20с%20исправлениями%20в%20печать%20(1).pdf) (accessed 06.11.2024) (In Russian).
9. Smolyarko E. O., Solovey I. A., Yushkevich N. T. Some new data about badger *meles meles* activity during dogs visits in the settlement. *Sostoyaniye sredi obitaniya i fauna okhotnich'ikh zhivotnykh Rossii i sopredel'nykh territoriy: materialy III Mezhdunarodnoy, VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The state of the habitat and fauna of game animals in Russia and adjacent territories: materials of the III International, VIII All-Russian scientific and practical conference]. Moscow, 2024, pp. 107–111. Available at: https://moor.ru/statics/uploads/files/Conf_2024.pdf (accessed 06.11.2024) (In Russian).
10. *Materialy lesoustroystva lesnogo fonda gosudarstvennogo lesokhozyaystvennogo uchrezhdeniya “Molodechnskiy leskhov” Minskogo gosudarstvennogo proizvodstvennogo lesokhozyaystvennogo ob'yedineniya Ministerstva lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' na period s 01.01.2021 po 31.12.2030* [Forest management materials of the forest fund of the state forestry institution “Molodechno forestry” of the Minsk state production forestry association of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus for the period from 01.01.2021 to 31.12.2030]. Minsk, 2020. 50 p. (In Russian).
11. Sidorchuk N. V., Rozhnov V. V. *Evropeyskiy barsuk v Darvinskoy zapovednike. Traditsionnyye i novyye metody v izuchenii ekologii i povedeniya normykh khishchnikov* [European badger in Darwin's Reserve. Traditional and new methods in studying the ecology and behavior of burrowing predators]. Moscow, KMK Publ., 2010. 122 p. (In Russian).
12. Ogurcov S. S. Overview of software for processing and analyzing data from camera traps: the latest innovations, working with video and GIS. *Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research], 2019, no. 4 (2), pp. 95–124. DOI: 10.24189/ncr.2019.019 (In Russian).
13. Ogurcov S. S., Volkov V. P., Zheltuhin A. S. A review of modern methods of storing, processing and analyzing data from camera traps in zoological research. *Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research], 2017, no. 2 (1), pp. 73–98. DOI: 10.24189/ncr.2017.057 (In Russian).
14. Rak A. V., Springer A. M., Mal'kova K. A., Zimnickij V. A. First results of monitoring large and medium-sized mammal species using camera traps in the Berezinsky Biosphere Reserve in 2022. *Osobo okhranyayemyye prirodnyye territorii Belarusi. Issledovaniya* [Conservation areas in Belarus. Researches], 2023, issue 18, pp. 153–161 (In Russian).
15. Smolyarko E. O., Solovey I. A., Yushkevich N. T. Analysis of the activity of the badger *Meles meles* at the burrow in the 2022–2023 biological year. *Aktual'nyye problemy ekologii: sbornik nauchnykh statey* [Actual problems of ecology: a collection of scientific articles]. Grodno, GrGU Publ., 2023, pp. 135–137. Available at: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/64967> (accessed 06.11.2024) (In Russian).

16. Kowalczyk R., Jedrzejewska B., Zalewski A. Annual and circadian activity patterns of badgers (*Meles meles*) in Białowieża Primeval Forest (eastern Poland) compared with other Palearctic populations. *Journal of Biogeography*, 2003, vol. 30, pp. 463–472. DOI: 10.1046/j.1365-2699.2003.00804.x.
17. Sidorchuk N., Rozhnov V. Daily activity of the European Badger (*Meles meles*, *Mustelidae*, *Carnivora*) on setts in Darwin Reserve and Meschera National Park (Russia) in summer and autumn. *Nature Conservation Research*, 2018, vol. 3, pp. 47–56. DOI: 10.24189/ncr.2018.032.
18. Neal E., Cheeseman C. Badgers. London, T&ADPoyser Publ., 1996. 271 p.
19. Danilov P. I., Tumanov I. L. *Kun'i severo-zapada SSSR* [Mustelidae of the north-west of the USSR]. Leningrad, Nauka Publ., 1976. 256 p. (In Russian).
20. Rodrigues A., Martin R., Delibes M. Space use and activity in a Mediterranean population of badgers *Meles meles*. *Acta Theriologica*, 1996, vol. 41 (1), pp. 59–72. DOI: 10.4098/AT.arch.96-5.
21. Jenkinson S., Wheate C. P. The influence of public access and sett visibility on badger (*Meles meles*) sett disturbance and persistence. *J. Zool.*, 1998, vol. 246, pp. 478–482. DOI: 10.1111/j.1469-7998.1998.tb00186.x.
22. Goszczyński J., Juszko S., Pacia A., Skoczyńska J. Activity of badgers (*Meles meles*) in Central Poland. *Mammalian Biology*, 2005, vol. 70 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1078/1616-5047-00171.
23. Tuytens F. A. M., Stapley N., Steward P. D., Macdonald D. W. Vigilance in badgers *Meles meles*: the effects of group size and human persecution. *Acta Theriologica*, 2001, vol. 46 (1), pp. 79–86. DOI: 10.1007/BF03192419.
24. Smolyarko E. O. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles for monitoring and studying wildlife in specially protected natural areas. *Bespilotnyye apparaty "BPLA – 2024": sbornik statey Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma* [Unmanned vehicles "UAV – 2024": collection of articles from the international youth forum]. Minsk, 2024, pp. 80–84. Available at: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65208> (accessed 06.11.2024) (In Russian).

Информация об авторах

Смолярко Евгений Олегович – соискатель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии. Белорусский государственный университет (пр-т Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: smolyarko@belstu.by

Юшкевич Николай Тарасович – кандидат экономических наук, доцент, декан лесохозяйственного факультета. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ushkevich@belstu.by

Information about the authors

Smolyarko Evgeniy Olegovich – external doctorate student, the Department of General Geography and Hydrometeorology. Belarusian State University (4 Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smolyarko@belstu.by

Ushkevich Nikolay Tarasovich – PhD (Economics), Assistant Professor, Dean of the Forestry Faculty. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ushkevich@belstu.by

Поступила 06.11.2024

ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS

УДК 630*377.4:625.711.84

М. Т. Насковец¹, Ю. А. Ким², В. Н. Штепа¹, Т. М. Тявловская², П. Н. Жлобич¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ КОЛЕСНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ГРУНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДЪЕЗДНЫХ ПУТЕЙ

В данной публикации рассмотрены некоторые аспекты негативного влияния колесных движителей при перемещении по грунтовым основаниям с низкой несущей способностью. Показано, что современные транспортно-технологические машины, оснащенные такими ходовыми системами, представляют собой большегрузные крупногабаритные технические средства повышенной проходимости, которые должны обеспечивать эффективную работу всех производственных процессов.

Проанализированы варианты взаимодействия различного вида колесных схем (такие как однокатные шины, спаренные колеса и колеса с низкопрофильными шинами) с грунтовой поверхностью. Это дало возможность сделать вывод о неравномерности горизонтального и вертикального смещения грунта в зоне пятна контакта колес, а также показало, каким образом распределяется удельное давление по глубине при воздействии разнопрофильных шин.

Кроме того, в статье исследованы способы снижения величины напряжений, возникающих в грунтовых массивах. Приведены основные их достоинства и недостатки, которые свидетельствуют о необходимости комплексного решения проблемы взаимодействия колесных систем с грунтовыми поверхностями. Проведенная оценка воздействия на грунт лесных колесных движителей в местах совместного контакта позволила выработать направления, способствующие увеличению работоспособности грунтовых оснований и дорог.

Ключевые слова: грунтовые основания, лесной колесный движитель, протекторы шин, воздействие колесной нагрузки, оценка работоспособности.

Для цитирования: М. Т. Насковец, Ю. А. Ким, В. Н. Штепа, Т. М. Тявловская, П. Н. Жлобич. Оценка влияния воздействия лесных колесных движителей на работоспособность грунтовых поверхностей подъездных путей // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 69–74.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-7.

M. T. Naskovets¹, Yu. A. Kim², V. N. Shtepa¹, T. M. Tyavlovskaya², P. N. Zhlobich¹

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FOREST WHEEL MOVERS ON THE OPERABILITY OF THE DIRT SURFACES OF ACCESS ROADS

The aspects of the negative impact of wheel movers when moving on unpaved bases with low load-bearing capacity are considered. It is shown that modern transport and technological machines equipped with such running systems are heavy-duty, large-sized cross-country vehicles that must ensure the efficient operation of production processes.

The variants of interaction of various types of wheel schemes (single-pitched tires, paired wheels and wheels with low-profile tires) with a dirt surface are analyzed. This allowed us to conclude that the

horizontal and vertical displacement of the soil in the area of the wheel contact spot is uneven, and also showed how the specific pressure is distributed over depth when exposed to multi-profile tires.

The methods of reducing the magnitude of stresses arising in soil massifs are investigated. Their main advantages and disadvantages are given, which indicate the need for a comprehensive solution to the problem of interaction of wheel systems with ground surfaces. The assessment of the impact of forest wheel thrusters on the ground in places of joint contact made it possible to develop directions for increasing the efficiency of soil foundations and roads.

Keywords: soil foundations, forest wheel mover, tire treads, impact of wheel loading, performance assessment.

For citation: M. T. Naskovets, Yu. A. Kim, V. N. Shtepa, T. M. Tyavlovskaya, P. N. Zhlobich. Assessment of the impact of forest wheel movers on the operability of the dirt surfaces of access roads. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry, Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 69–74 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-7.

Введение. Рост механизации технологических процессов лесозаготовительного производства лесного комплекса, а также повышение интенсивности ведения сельского хозяйства в Республике Беларусь приводит к использованию для выполнения производственных задач транспортных средств повышенной мощности, что значительно увеличивает их грузоподъемность, а следовательно осевые нагрузки [1–3]. Такие большегрузные операционные машины (лесовозные автопоезда, форвардеры и агротехнические средства транспорта) негативно влияют на грунтовые основания (рис. 1) и требуют проведения оценки взаимодействия крупногабаритных автомобильных движителей с контактирующей грунтовой поверхностью транспортно-технологических путей [4, 5].



Рис. 1. Процесс образования колеи после проезда форвардера

Основная часть. Одной из основных функций транспортных средств высокой проходимости является обеспечение многократного проезда по грунтовым поверхностям (лесные грунтовые дороги и просеки либо сельскохозяйственные угодья), характеризующимся низкой несущей способностью. В данном случае процесс движения средств транспорта во многом зависит от применяемых на них автомобильных движителей, главным образом конструкции, количества и размерных параметров колес, давления воздуха в них и протектора шин.

Для повышения производительности, снижения повреждающего воздействия на опорную поверхность такого рода технологические машины становятся в большей степени грузоподъемными, что приводит к увеличению их массы и в конечном итоге возрастанию вертикальной нагрузки на колесо. В свою очередь, конструкции их колес имеют большие габариты и являются более деформируемыми. В отличие от колес с узкопрофильными шинами и спаренных колес, колеса с широкопрофильными шинами увеличивают площадь пятна контакта с опорной поверхностью, и снижают осадку и боковое смещение грунта (рис. 2) [6, 7].

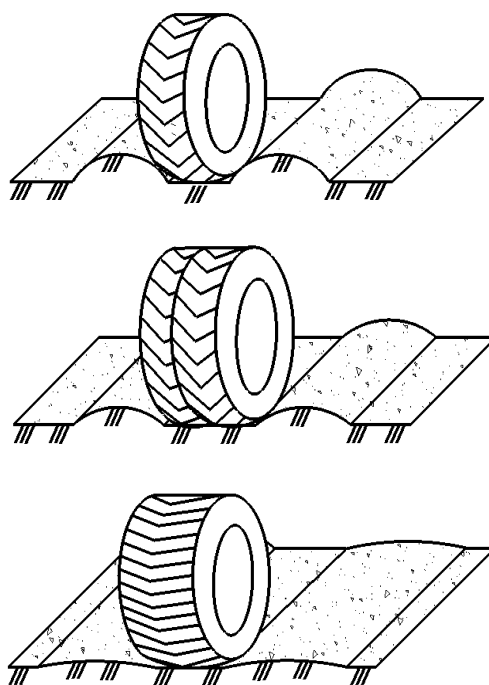


Рис. 2. Варианты воздействия односкатных и спаренных колес на грунтовую поверхность

Это также приводит к снижению напряжений по глубине грунтового массива (рис. 3).

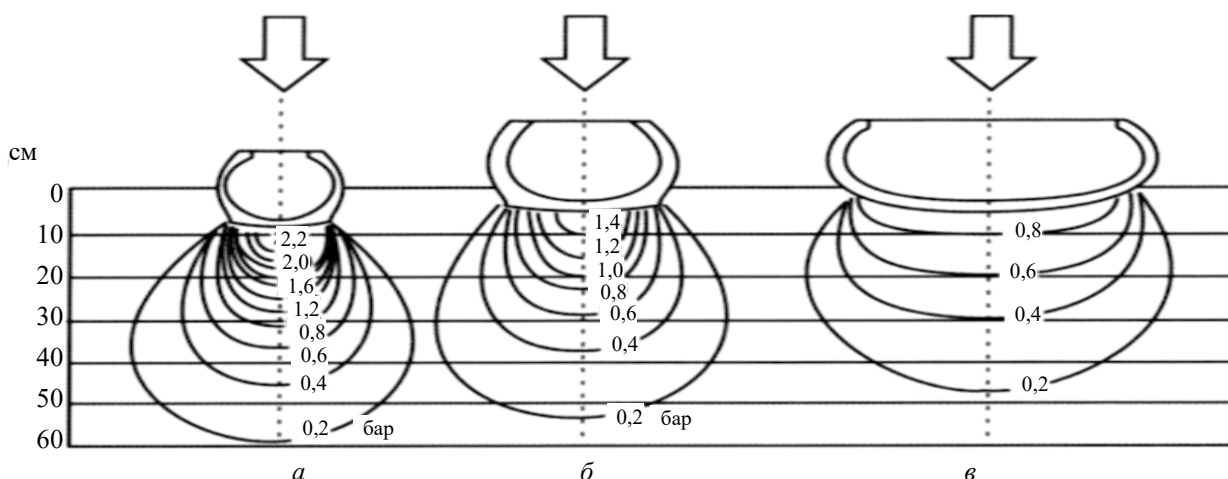


Рис. 3. Форма пятна контакта колес различной ширины с дорожным полотном:
а – узкие шины; б – стандартные шины; в – широкие шины

Однако снижение величины контактных напряжений при увеличении вертикальной нагрузки на колесо не решает проблему распространения луковичы напряжения в глубь грунтового массива. Более того, увеличение площади пятна контакта колеса с опорной поверхностью при усилении вертикальной нагрузки приводит к охвату больших объемов грунтового массива. А это отрицательно влияет на состояние и долговечность грунтовой дороги.

С целью понижения напряженности грунтового массива на машины устанавливаются дополнительные колеса, грунтозацепы либо гусеницы [8] или снижается давление в шинах [9], а также сепарируются слои грунта посредством укладки хвостистой выстилки, геомембран, пленок и т. д.

Использование средств, сепарирующих слои грунтового основания, в значительной степени снижает действие тангенциальных составляющих напряжения. Сложное напряженно-деформированное состояние грунтового массива, вызванное внешним воздействием, обусловлено влиянием как нормальных, так и касательных составляю-

щих. Это в целом снижает напряженность состояния и является положительным эффектом.

Способ снижения величины напряжений путем сдвигания колес является достаточно эффективным, но при этом имеет ряд отрицательных моментов. Во-первых, повышается сопротивление качению при повороте транспортного средства. Во-вторых, образующиеся луковичы напряжения, возникающие от рядом расположенных колес пересекаются, и в этой зоне возникает интегрирование напряжения. Кроме того, сдвоенные колеса способствуют более интенсивному колееобразованию в сравнении с одиночным пневмокатком равной грузоподъемности.

Одним из наиболее доступных и эффективных путей снижения контактных напряжений является регулирование внутреннего давления воздуха в шинах (рис. 4).

Но здесь существуют проблемы. Так, для активного колеса при значительном понижении величины давления воздуха в шине, появляется опасность проворота диска относительно шины, что приводит к разгерметизации колеса.

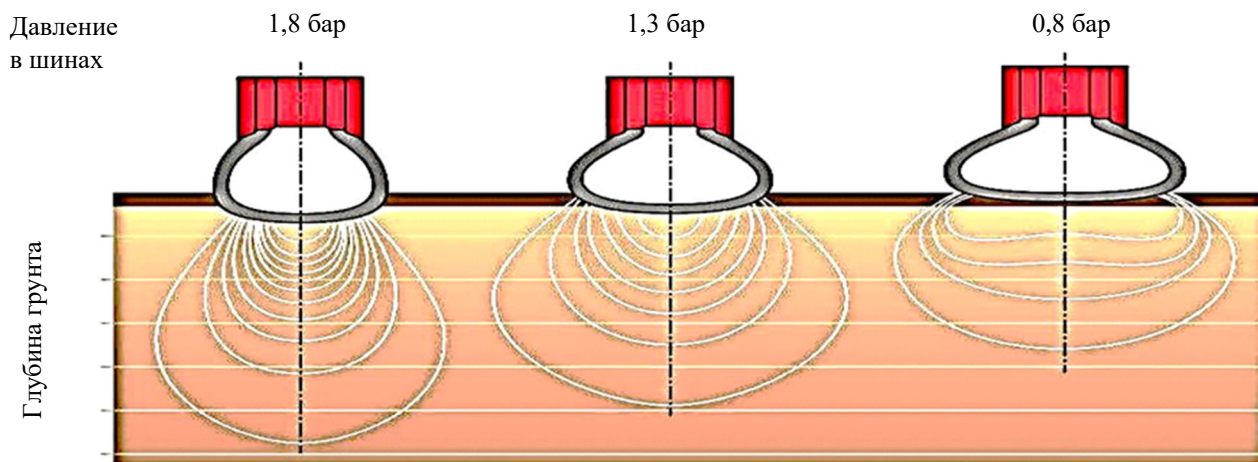


Рис. 4. Варианты эпюр снижения контактных напряжений в зависимости от давления воздуха в шинах

Для увеличения долговечности конструкций пневматических шин колес предусматривается протектор [10]. Назначение протектора также состоит в том, чтобы обеспечивать необходимую управляемость и силу тяги. Для ведомых управляемых колес это продольные реборды, а для ведущих – развитый рисунок протектора, обеспечивающий необходимую силу тяги. Чаще всего это протектор типа «елка» (рис. 5).

Такой рисунок обеспечивает условие самоочищения. Смысл такого рисунка протектора состоит в том, что небольшие по величине коэффициенты трения резина – грунт заменяются на значительно более высокие коэффициенты внутреннего трения грунта.



Рис. 5. Примеры протекторов пневматических шин «елка»:

а – односкатные; б – широкопрофильные

Для увеличения сцепных качеств колес с грунтом слабого основания применяют гусеницы либо грунтозацепы (рис. 6) [11].



Рис. 6. Форвардер, оборудованный гусеницами и грунтозацепами

Наличие гусениц в конструкциях технологических машин позволяет перераспределить воз-

действующую нагрузку от колес на большую площадь грунтового массива, увеличивая таким образом пятно контакта, а установка грунтозацепов дает возможность образовывать грунтовый кирпич и сдвигать грунт в направлении, противоположном движителю колеса. Как показывают исследования, максимальная касательная сила тяги, развиваемая колесным движителем, достигается при коэффициенте буксования, равном приблизительно 20% [12]. Высота и расстояние между грунтозацепами рассчитываются в зависимости от габаритов движителя и условий эксплуатации. Таким образом, активное колесо с протектором типа «елка», как бы вырабатывает поверхность грунтового покрытия дороги, что приводит к интенсивному колееобразованию. Кроме того, грунтозацепы создают под собой очаги концентрации напряжений с одновременным срезом грунта как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Скачкообразность нормальных напряжений сглаживается по мере их распространения в глубь грунтового массива.

В этом смысле использование сепарирующих средств значительно способствует сглаживанию массивов напряжений. Теоретически описать поверхность шины с грунтозацепами одним законом не представляется возможным, поэтому решения необходимо проводить приближенно. Таким образом, для увеличения срока эксплуатации грунтовых дорог необходим комплексный подход к этой проблеме [13–15]: это и снижение разрушающего воздействия ходовых систем, и повышение несущей способности дорожного покрытия. Решение данной задачи весьма сложно и трудоемко как теоретически, так и экспериментально, но наиболее эффективно.

Работоспособность колесных движителей лесных транспортных средств при перемещении по естественным грунтовым основаниям в значительной мере может быть повышена путем увеличения их опорной поверхности за счет укрепления грунтовой поверхности порубочными остатками, образующими хворостяную выстилку (рис. 7).



Рис. 7. Упрочнение поверхности грунтового основания хворостяной выстилкой

Наличие под колесами подушки из древесных остатков позволяет увеличить площадь опоры движителей, а также предотвратить прямой контакт протекторной части колеса с грунтом и его интенсивное смещение в горизонтальной и вертикальной плоскости. Такой эффект снижает и повреждающее воздействие колесных движителей.

Заключение. Проанализированы основные предпосылки взаимодействия движителей лесной

и сельскохозяйственной техники со слабыми грунтовыми основаниями. Это позволит в дальнейшем выработать направления совершенствования и расчета крупногабаритных большегрузных транспортных средств и условий их применения.

Оценка воздействия колесных движителей на основания подъездных путей со слабыми грунтами выявила их существенные недостатки и позволила предложить способы повышения их прочности и работоспособности.

Список литературы

1. Насковец М. Т. Транспортное освоение лесов Беларуси и компоненты лесотранспорта. Минск: БГТУ, 2010. 178 с.
2. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев [и др.]. Минск: Лесная пром-сть, 1990. 416 с.
3. Леонович И. И. Автомобильные лесовозные дороги. Минск: Выш. шк., 1965. 396 с.
4. Бабаскин Ю. Г. Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна. Минск: ИНФРА-М, 2013. 462 с.
5. Бабаков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М.: Выш. шк., 1986. 239 с.
6. Кишинский М. И. Эксплуатация и ремонт лесовозных дорог. М.: Гослесбумиздат, 1954. 326 с.
7. Исследования величин давления в пятне контакта крупногабаритной шины с деформируемой опорной поверхностью / Ю. А. Ким [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 143–148.
8. Леонович И. И., Вyrko Н. П. Механика земляного полотна. Минск: Наука и техника, 1975. 232 с.
9. Влияние величины давления воздуха в шинах колес на геометрические параметры пятна контакта при взаимодействии с опорной поверхностью / Ю. А. Ким [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2018. № 2 (210). С. 308–312.
10. Касперович А. В., Шашок Ж. С., Мозгалев В. В. Технология производства шин. Минск: БГТУ, 2011. С. 147.
11. Маркина А. А., Давыдова В. В. Теория движения колесных машин. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 216 с.
12. Гуськов В. В. Тракторы. Ч. II. Теория. Минск: Выш. шк., 1977. 384 с.
13. Скойбеда А. Т. Автоматизация ходовых систем колесных машин. Минск: Наука и техника, 1979. 277 с.
14. К вопросу взаимодействия колесного движителя с деформируемым основанием / Ю. А. Ким [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 196–200.
15. О повышении проходимости внедорожного колесного транспортного средства / Ю. А. Ким [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 98–103.

References

1. Naskovets M. T. *Transportnoye osvoyeniye lesov Belarusi i komponenty lesotransporta* [Transport development of forests of Belarus and components of forest transport]. Minsk, BSTU Publ., 2010. 178 p. (In Russian).
2. Alyabyev V. I., Ilyin B. A., Kuvaldin B. I., Grekhov G. F. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of forests]. Minsk, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 416 p. (In Russian).
3. Leonovich I. I. *Avtomobil'nyye lesovoznyye dorogi* [Automobile logging roads]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1965. 396 p. (In Russian).
4. Babaskin Yu. G. *Dorozhnoye gruntovedeniye i mekhanika zemlyanogo polotna* [Road soil science and mechanics of the roadbed]. Minsk, INFRA-M Publ., 2013. 462 p. (In Russian).
5. Babakov V. F., Bezruk V. M. *Osnovy gruntovedeniya i mekhaniki gruntov* [Fundamentals of soil science and soil mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 239 p. (In Russian).
6. Kishinskiy M. I. *Ekspluatatsiya i remont lesovoznykh dorog* [Operation and repair of logging roads]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1954. 326 p. (In Russian).
7. Kim Yu. A., Naskovets M. T., Zharkov N. I., Gil V. I. Research of pressure values in the spot of contact of a large-sized tire with a deformable support surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 1 (252), pp. 143–148 (In Russian).
8. Leonovich I. I., Vyrko N. P. *Mekhanika zemlyanogo polotna* [Mechanics of the roadbed]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 232 p. (In Russian).

9. Kim Yu. A., Bobrovich V. A., Voytekhevsky B. V., Isachenkov V. S. Impact of air pressure size in tire wheels on the geometric parameters of the spot of contact with interaction with support surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 1 (210), pp. 308–312 (In Russian).

10. Kasperovich A. V., Shashok Zh. S., Mozgalev V. V. *Tekhnologiya proizvodstva shin* [Tire production technology]. Minsk, BSTU Publ., 2011. 147 p. (In Russian).

11. Markina A. A., Davydova V. V. *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [Theory of the movement of wheeled vehicles]. Ekaterinburg: Izdatl'stvo ural'skogo universiteta Publ., 2021. 216 p. (In Russian).

12. Gus'kov V. V. *Traktory. Chast' II. Teoriya* [Tractors. Part 2. Theory]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1977. 384 p. (In Russian).

13. Skoybeda A. T. *Avtomatizatsiya khodovykh sistem kolesnykh mashin* [Automation of running systems of wheeled vehicles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 277 p. (In Russian).

14. Kim Yu. A., Bobrovich V. A., Voytekhevsky B. V., Isachenkov V. S. To the question of the interaction of the wheel propulsion with a deformable base. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 1 (216), pp. 196–200 (In Russian).

15. Kim Yu. A., Naskovets M. T., Voitekhevsky B. V., Sivitskaya D. D. About increasing the performance of off-road wheels vehicle. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 1 (264), pp. 98–103 (In Russian).

Информация об авторах

Насковец Михаил Трофимович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

Ким Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика машиностроительного профиля». Белорусский национальный технический университет (ул. Я. Коласа, 12, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Штепа Владимир Николаевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tppoless@gmail.com

Тявловская Тереза Михайловна – старший преподаватель кафедры «Инженерная графика машиностроительного профиля». Белорусский национальный технический университет (ул. Я. Коласа, 12, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Жлобич Павел Николаевич – инженер кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pashkazhlobich1@gmail.by

Information about the authors

Naskovets Mikhail Trofimovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: naskovets@belstu.by

Kim Yuriy Alekseevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department “Engineering Graphics for Machine-Building”. Belarusian National Technical University (12 Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Shtepa Vladimir Nikolaevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Life Safety. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tppoless@gmail.com

Tyavlovskaya Tereza Mihaylovna – Senior Lecturer, the Department “Engineering Graphics for Machine-Building”. Belarusian National Technical University (12 Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Zhlobich Pavel Nikolaevich – engineer, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pashkazhlobich1@gmail.by

Поступила 20.10.2024

УДК 038.742.046.73

С. А. Дупанов, О. К. Леонович, И. К. Божелко, И. В. Генюш
Белорусский государственный технологический университет

**ПОДГОТОВКА И КОНСЕРВАЦИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ ДРЕВЕСИНЫ
НА АРХЕОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ: ГОРОДИЩЕ, СЕЛИЩЕ
(X–XI, XVII–XIX ВВ.)**

Археологическая древесина клетей оборонительной стены Минска, включающая древесину мореного дуба и частично других пород, на Археологическом комплексе: городище, селище (X–XI, XVII–XIX вв.) представляет исторически важную ценность и требует внимательного отношения с целью сохранения сооружений для потомков.

В статье приведены результаты исследований по антисептированию, сушке и консервированию археологической древесины, а также даны советы по практическому их применению на объекте. Отмечается, что основным фактором разрушения мореной древесины дуба после ее контакта с воздушной средой является быстрое усыхание верхних и особенно торцевых частей сооружений.

Предложено сразу после извлечения элементов конструкций из грунта изолировать их пленкой и постепенно удалять накопившуюся влагу. При снижении влаги до 100% сушку осуществлять в высоко насыщенном среде (98–95%). По достижении влажности 20–25% древесина окончательно подвергается антисептированию и последующей консервации. В статье также приведены результаты исследований прочности мореной древесины и классификация деградированной древесины в зависимости от плотности и степени разрушения. Определены средства, наиболее приемлемые для защиты древесины от биоразрушения.

Ключевые слова: археологическая древесина, мореный дуб, деградация, прочность, классификация, консервирование.

Для цитирования: Дупанов С. А., Леонович О. К., Божелко И. К., Генюш И. В. Подготовка и консервация археологической древесины на Археологическом комплексе: городище, селище (X–XI, XVII–XIX вв.) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 75–82.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-8.

S. A. Dupanov, O. K. Leonovich, I. K. Bazhelka, I. V. Genyush
Belarusian State Technological University

**PREPARATION AND CONSERVATION OF ARCHAEOLOGICAL WOOD
AT THE ARCHAEOLOGICAL COMPLEX: HILLFORT, SETTLEMENT
(X–XI, XVII–XIX CENTURIES)**

Archaeological wood of the cells of the defensive wall of Minsk made of bog oak and partly other species at the Archaeological Complex: hillfort, settlement (10th–11th, 17th–19th centuries) is of historically important value and requires careful attention to the preservation of structures for posterity.

The article presents the results of studies on the development of recommendations for antiseptic treatment, drying and conservation of archaeological wood and practical experience of their application at the site. It is noted that the main factor in the destruction of bog oak wood after its contact with the air is the rapid drying of the upper and especially the end parts of the structures.

It is proposed to immediately after opening the elements of structures from the ground to isolate them with a film and gradually remove the accumulated moisture. When the moisture content decreases to 100%, drying should be carried out in a highly saturated environment of 98–95%. When the humidity reaches 20–25%, the wood is finally subjected to conservation and subsequent conservation. The results of studies of the strength of bog wood and the classification of degraded wood depending on the density and degree of destruction are presented. The protective means most suitable for protection against biodestruction are determined.

Keywords: archaeological wood, bog oak, degradation, strength, classification, conservation.

For citation: Dupanov S. A., Leonovich O. K., Bazhelka I. K., Genyush I. V. Preparation and conservation of archaeological wood at the Archaeological Complex: hillfort, settlement (X–XI, XVII–XIX centuries). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resource*, 2025, no. 1 (288), pp. 75–82 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-8.

Введение. Подходы к консервированию археологической древесины на сегодня изучены, имеется ряд направлений и технологий, которые используются по всему миру, благодаря этому можно оценить их применимость и результативность. Наиболее распространенными и эффективными в настоящее время являются составы на основе смол, которые после пропитки древесины отверждаются под воздействием температуры. Данная технология получила широкое распространение, однако она имеет ряд серьезных недостатков, обусловленных высокой токсичностью препаратов, используемых для защиты крупногабаритных образцов древесины, а так же отсутствием соответствующего оборудования. Интерес представляет опыт предприятия ГОДО «Транс-Центр» в сушке и переработке мореной древесины дуба и работы в данном направлении, проводимые аспирантом Дупановым С. А. под руководством научного руководителя Леоновича О. К. в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» (кафедра технологии деревообрабатывающих производств (заведующий кафедрой Божелко И. К.)) совместно с Институтом истории Национальной академии наук Республики Беларусь и ГОДО «Транс-Центр» [1, 2].

Основные направления исследований и технологии сохранения мореной древесины различных периодов возрастания и мест залегания перед добычей их в переработку изложены авторами в работе [2], в которой они предлагают использовать технологию по сушке и консервации, основывающуюся на базе исследований университетской и академической науки и практики по сохранению и переработке мореного дуба на ГОДО «Транс-Центр» [2].

На данный момент метод применим только к древесине дуба, для прочих пород требуются анализ и изучение динамики разрушения в процессе сушки. Проблема сохранения археологической древесины, в том числе дуба, заключается не только в переувлажнении до $W = 100\text{--}600\%$, но и в процентном увеличении количества связанной на клеточном уровне влаги. Процесс консервации археологической древесины начинали сразу после ее обнаружения. В момент контакта археологической древесины с воздушной средой начинаются необратимые процессы сушки и дальнейшей деградации. Скорость данных процессов напрямую зависит от температуры и влажности воздуха. Разные породы археологической древесины имеют разную динамику разрушения. Наиболее устойчива в этом плане древесина дуба.

Целью данных исследований является представление теоретических и практических резуль-

татов по подготовке и консервации археологической древесины на Археологическом комплексе: городище, селище (X–XI, XVII–XIX вв.) с учетом ее состояния и определения основных прочностных свойств и средств защиты от дальнейшего разрушения.

Исследования физико-химических, реологических, качественных характеристик натурального мореного дуба, видовых и возрастных свойств, направления использования в народном хозяйстве изложены в работах, которые послужили основой для принятия решений по защите археологических объектов от разрушения [3–16].

Основная часть. Технология консервации археологической древесины индивидуальна и зависит от многих параметров:

- среды нахождения объектов археологической древесины;
- породы древесины, в полевых условиях реально отличить древесину хвойных пород от твердолиственных;
- возраста археологической древесины;
- степени деградации;
- наличия факторов биоразрушения.

Находки из археологической древесины имеют высокую культурную значимость и являются наиболее тяжелыми в плане сохранения.

В результате первичного анализа оборонительных сооружений из древесины на Археологическом комплексе: городище, селище (X–XI, XVII–XIX вв.) в деревне Городище Минского района были получены следующие данные:

- 1) влажность неравномерная – от 70 до 200%;
- 2) поражение плесневыми грибами;
- 3) конструктивные деформации, изломы, места продавливания деревянных срубов;
- 4) преобладающая порода дуб;
- 5) период нахождения в исходной среде 900–1100 лет;
- 6) конструкция имеет форму клеток: внутреннее заполнение однородное глеевое, наружное – неоднородное;
- 7) в местах запилов срубов имеются следы гниения (рис. 1);
- 8) ориентировочный объем археологической древесины в сооружении – около 30 м^3 , масса конструкции из переувлажненной древесины при средней плотности 1600 кг/м^3 оценивалась в 48 т;
- 9) диаметры срубов – от 5 до 40 см. Расчетное количество – 300 единиц.

В связи с особенностями расположения комплекса, высоким уровнем грунтовых вод, большим общим объемом деревянных сооружений и имеющимися конструктивными дефектами было принято решение о полной разборке данных конструкций.



Рис. 1. Биопоражение археологической древесины на Археологическом комплексе: городище, селище

Такое решение имело как свои плюсы, так и минусы. В связи с тем что период начала проведения консервационных работ был ограничен, а раскопки еще не завершены, отсутствовала полная картина конструкции. Консервационные работы на месте не рассматривались. Поэтому после вскрытия раскопок были даны рекомендации для увеличения сроков проведения работ. При этом конструкцию из археологической древесины увлажняли, накрывали полиэтиленовой пленкой и не допускали попадания прямых солнечных лучей.

Выбранная технология консервации применяется на предприятии ГОДО «Транс-Центр», занимающемся добычей и переработкой мореного дуба, и доработана на базе УО «Белорусский государственный технологический университет». Определены и опробованы режимы сушки, разработаны антисептирующие составы и рассчитаны этапы антисептирования, подготовлена программа поэтапной сушки. Перед началом работ по разборке конструкций проведено полное антисептирование методом распыления состава «Консервант-А». В условиях археологических раскопок подготовить поверхность древесины для нанесения любых антисептирующих средств не является возможным. Состав «Консервант-А» является водорастворимым, и его эффективная концентрация равна 1:5, но на данном этапе применили концентрацию 1:10–25. Нанесение состава на поверхность древесины также способствовало смачиванию и замедлению высыхания древесины. Данный процесс является первым этапом технологии сушки массивной древесины мореного дуба без ее деформации.

С целью уменьшения усушки поверхностных слоев разобранных элементов конструкции их упаковывали в гидропакеты, тем самым создавая приемлемые условия хранения на момент разборки и перевозки (рис. 2–4). Упаковка в гидропакеты эффективна при температурах окружающего воздуха от -5 до $+35^{\circ}\text{C}$.



Рис. 2. Процесс разборки деревянных конструкций



Рис. 3. Формирование гидропакета

Археологическая древесина дуба при температуре 30°C имеет скорость высыхания 5–10% в сутки, а при попадании прямых солнечных лучей этот показатель увеличивается вдвое. Такая скорость сушки неизбежно приводит к полной структурной деградации древесины.

При разборке конструкции стоит учитывать, что древесина сильно переувлажнена и ее вес

вдвое превышает вес обычного дуба. При подъеме необходимо распределять нагрузку и избегать точечного усилия, а также использовать широкие матерчатые стропы для подъема и перемещения.



Рис. 4. Разборка конструкций и подготовка гидропакетов

Деревянные дубовые конструкции археологического комплекса изолированные в пленку после разборки клеток, перевозились для временного хранения на промежуточный склад (рис. 5). Далее конструкции автотранспортом перевозили в ангары к месту их дальнейшей сушки и консервации.



Рис. 5. Промежуточный склад хранения дубовых конструкций

Следующим этапом консервации археологической древесины является механическая очистка, а также гидромеханическая очистка с дальнейшей обработкой антисептиком Tanalith E в концентрации 1:8.

В процессе гидромойки конструкций морской дубовой древесины выявились интересные артефакты на гаковых частях конструкции (крюки на концах). Крюки удерживали конструкцию от растаскивания ее нападающими на крепостные стены. На одном из гаков, по утверждению главного археолога Андрея Войтеховича, вырезаны устрашающие кабаньи клыки (рис. 6–7).



Рис. 6. Гаковая часть конструкции до гидромеханической очистки



Рис. 7. Гаковая часть конструкции после гидромеханической очистки

Проводились исследования влажности, плотности и прочности образцов археологического мореного дуба различной степени деградации.

В результате исследования влажности и плотности древесины мореного дуба установлен среднестатистический уровень их изменения: плотность древесины падает пропорционально степени деградации от 100 до 15% (от 701,8 до 105 кг/м³), а влажность, наоборот, возрастает со 112 до 148%.

В процессе работ по защите археологической древесины велись исследования ее физических и прочностных свойств, а также степени повреждения грибами различных видов.

Прочность мореной древесины элементов клетей на Археологическом комплексе: городище, селище исследовалась с помощью приростного бурава (бурав Пресслера), используемого в оценочных работах при таксации и лесоотведении в лесном хозяйстве.

Состояние древесины в целом, в зависимости от ее влажности, плотности и глубины поражения грибом, рекомендовано характеризовать степенью деградации. Принято решение классифицировать состояние деградированной древесины по 4 степеням деградации:

А – состояние без особых повреждений (0–20%);

Б – имеются повреждения, трещины, внутреннее гниение, деградация поверхности (21–40%);

В – древесина частично деградирована, есть внутренние гнили, трещины, грибные поражения (41–60%);

Г – деградация по всему объему, глубокие трещины, древесина имеет ослабленное структурное состояние (61–20% и ниже).

В соответствии с предложенной классификацией определялось состояние каждого объекта археологического комплекса и составлялись акты.

Параллельно с полевыми работами велись исследования в научно-исследовательской лаборатории огнезащиты строительных конструкций и материалов БГТУ.

Предел прочности при изгибе и сжатии у древесины мореного дуба со степенью деградации А находится в пределах прочности натурального мореного дуба. Средний фактический предел прочности испытанных образцов археологической древесины при статическом изгибе – 93,8 МПа, а образцов древесины обычного дуба – 91,7 МПа.

Прочность древесины, деградированной по степени Б, В, Г, падает пропорционально плотности древесины.

Важное значение для сохранения археологической древесины имеет защита ее от биоразрушения. Древесина – гигроскопичный природный материал, который в процессе произрастания и эксплуатации подвергается воздействию плесневых, деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов и технических вредителей. Грибы и технические вредители используют древесину в качестве питательного вещества. В результате их воздействия древесина изменяет химический состав, структуру, строение и физико-механические свойства.

Испытания по определению эффективности биозащитных свойств по отношению к плесневым, деревоокрашивающим грибам и стандарт-

ному дереворазрушающему грибу *Coniophora puteana* проводились по ГОСТ 30028.4–2022 «Средства защитные для древесины. Экспресс-метод оценки эффективности против деревоокрашивающих и плесневых грибов» и ГОСТ 16712–95 «Средства защитные для древесины. Метод испытания токсичности».

В качестве защитных средств были выбраны 4 состава:

1) водорастворимый концентрат с профилактическим, временным защитным эффектом от синевы и плесени Impralit-BSK effect+;

2) антисептик Tanalith E 3475 + Tanagard;

3) Консервант-А (средство для обработки мореной древесины (в составе CuSO_4 , FeSO_4 , FeO , NaCl);

4) Консервант-Б (смесь Консерванта А и Tanalith E 3475 в соотношении 1:1).

На основании результатов исследований по определению эффективности против плесневых, деревоокрашивающих, дереворазрушающих грибов был сделан выбор в пользу защитного средства Tanalith E для консервации мореной древесины дуба. Антисептик Tanalith E 3475 + Tanagard по показателю порогового поглощения (3,6%) обладает согласно ГОСТ 16712–95 достаточной токсичностью к стандартному штамму дереворазрушающего гриба *Coniophora puteana* и по показателю эффективности в отношении к плесневым и деревоокрашивающим грибам (по ГОСТ 30028.4–2022) соответствует высокоэффективным защитным средствам.

Заключение. В процессе исследовательских и практических работ по подготовке и консервации археологической древесины на Археологическом комплексе: городище, селище (X–XI, XVII–XIX вв.) установлено:

– процессы раскрытия археологических находок и начала их биозащиты и гидрофобизации должны проходить одновременно;

– наиболее эффективной является защита археологической дубовой древесины при изолировании ее от внешней среды пленкой с постепенным удалением накопившейся влаги (т. е. удаление влаги из древесины практически при влажности окружающей среды 99–98%);

– антисептирование от повреждения плесневыми и деревоокрашивающими грибами непосредственно на объекте первоначально следует производить составом «Консервант-А», для безопасности работы персонала после попадания дубовой мореной древесины на склад хранения антисептирование производить защитным средством Tanalith E методом капиллярной пропитки (распылением);

– увлажнение деревянных конструкций из мореной древесины производить защитным средством Tanalith E пониженной концентрации;

- снижение влажности мореной археологической древесины дуба от 100 до 65% производить в помещениях с влажностью среды 98–95%, причем деревянные дубовые элементы конструкции необходимо периодически увлажнять;
- непосредственно сушку от 60 до 35% производить при влажности среды от 95 до 55%;
- окончательную сушку от 35 до 10% вести в закрытых помещениях при температуре 20°C и влажности среды 55%, которая наиболее приемлема и позволяет сохранить мореную древесину без трещин и деформаций;
- укрытие пленкой элементов дубовых деревянных конструкций клеток с периодическим увлажнением их поверхности способствует снижению скорости удаления влаги из деревянных конструкций и бездеформативной сушке;

- классификация деградированной археологической древесины по изменению параметров плотности и степени разрушения позволяет отнести ее к определенной группе прочности и получить прогнозный показатель по реологическим свойствам и, соответственно, направлению ее использования;

- прочностные показатели мореной дубовой древесины группы А – состояние без особых повреждений (0–20%) находятся на уровне аналогичных показателей натурального дуба;

- консервирование конструкции из мореной древесины от поражения плесневыми, дереворастворяющими и дереворазрушающими грибами производить защитным средством Tanalith E 3475 + Tanagard по показателю порогового поглощения (3,6%).

Список литературы

1. Дупанов С. А., Леонович О. К. Проблемы сохранения археологических объектов из натурального мореного дуба и сосны // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С.165–172. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-22.
2. Леонович О. К., Дупанов С. А. Исследования мореного дуба и его свойств при добыче и переработке // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (276). С. 157–166. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-19.
3. Дупанов С. А., Леонович О. К. Исследование физико-химических и прочностных свойств мореного дуба различных возрастных групп для изготовления изделий // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: тез. докл. 85-й науч.-техн. конф. (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 144–147.
4. Леонович О. К., Дупанов С. А. Исследование химических и структурных свойств натурального мореного дуба методом сканирующей микроскопии // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (240). С. 150–155. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-240-20-150-155.
5. Леонович О. К., Дупанов С. А. Перспективные направления переработки натурального мореного дуба // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: тез. докл. 84-й науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию БГТУ и Дню белорусской науки (с междунар. участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. Минск, 2020. С. 80–81.
6. Дупанов С. А., Леонович О. К. Проблемы защиты древесины сосны и дуба в Республике Беларусь // Лес – Наука – Инновации – 2022. Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6–9 дек. 2022 г. Минск, 2022. С. 238–241. URL: <https://www.belstu.by/nauka/ob-inf/konferenczii-v-bgtu-v-2022-godu/mezhdunarodnyij-molodezhnyij-lesopromyshlennyij-forum-%C2%ABles-nauka-innovaczii-2022%C2%BB-sentyabr-oktyabr-2022> (дата обращения: 10.10.2024).
7. Леонович О. К., Божелко И. К. Консервация археологических и деревянных строений в Беларуси // Каласавины: материалы XXXIV науч. конф., Минск, 2 окт. 2020 г. Минск, 2020. С. 8–10.
8. Леонович О. К., Мазало Н. А. Исследование долговечности археологической древесины, обработанной защитными составами // Музейныя здабыткі: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 12–13 нояб. 2020 г. Брест, 2020. С. 30–35.
9. Леонович О. К., Дупанов С. А. Консервация археологических находок из мореного дуба // Реставрация, консервация и музеефикация археологического дерева и органических материалов: материалы Междунар. конф., Казань, 1–5 нояб. 2022 г. Казань, 2022. URL: <http://archtat.ru/events/mezhdunarodnaya-konferentsiya-restavratsiya-konservatsiya-i-muzeifikatsiya-arheologicheskogo-dereva-i-organicheskikh-materialov> (дата обращения: 28.09.2024).
10. Леонович О. К., Дупанов С. А. Модифицирование древесины мореного дуба акрилатными соединениями // Лес – 2022: тез. докл. XXII Междунар. науч.-техн. интернет-конф., Брянск, 1–30 нояб. 2022 г. Брянск, 2022. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2022/les_2022/leonovich_pol.htm (дата обращения: 28.09.2024).

11. Дупанов С. А., Леонович О. К. Классификационный подход к оценке качественных характеристик натурального мореного дуба // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: сб. ст. 87-й науч.-техн. конф. с междунар. участием, Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 146–149.
12. Дупанов С. А., Леонович О. К. Возрастная и видовая дифференциация натурального мореного дуба // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 204–209. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-23.
13. Леонович О. К., Дупанов С. А. Определение качества натурального мореного дуба в зависимости от различных физических, возрастных и видовых характеристик // Лес – 2023: тез. докл. XXIII междунар. науч.-техн. интернет-конф., 1–30 мая 2023 г. Брянск, 2023. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2023/les_2023/leonovich_komp.htm (дата обращения: 28.09.2024).
14. Методы физико-механических испытаний модифицированной древесины. М.: Стройиздат, 1973. 47 с.
15. Леонович О. К., Дупанов С. А. Исследование зольных остатков мореного дуба различных возрастных периодов залегания в поймах рек // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: тез. докл. 71-й науч.-техн. конф., Минск, 20–25 апр. 2020 г. Минск, 2023. С. 137–138.
16. Леонович О. К., Дупанов С. А. Исследование физико-химических свойств натурального мореного дуба, используемого для производства эксклюзивных изделий и мебели // Лес – 2020: тез. докл. XIX Междунар. науч.-техн. интернет-конф., 1–30 мая 2020 г. Брянск, 2020. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2020/les_2020/leonovich_komp.htm (дата обращения: 28.09.2024).

References

1. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Problems of preservation of archaeological objects from natural moren oak and pine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2024, no. 1 (276), pp. 165–172. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-22 (In Russian).
2. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Studies properties in extraction and processing. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2024, no. 2 (282), pp. 157–166. DOI: 10.52065/2519-402-2024-282-19 (In Russian).
3. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Study of the physical-chemical and strength properties of bog oak of various age groups for the manufacture of products. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: tezisy dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forestry engineering, materials science and design: abstracts of the reports of the 85th scientific and technical conference (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 144–147 (In Russian).
4. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Study of the chemical and structural properties of natural bog oak using scanning microscopy. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (240), pp. 150–155. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-240-20-150-155 (In Russian).
5. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Promising directions for processing natural bog oak. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: tezisy dokladov 84-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letnemy yubileyu BGTU i Dnyu belorusskoy nauki (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forest engineering, materials science and design: abstracts of the reports of the 84th scientific and technical conference, dedicated 90th anniversary of BSTU and the Day of Belarusian Science (with international participation)]. Minsk, 2020, pp. 80–81 (In Russian).
6. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Problems of protecting pine and oak wood in the Republic of Belarus. Available at: <https://www.belstu.by/nauka/ob-inf/konferenczii-v-bgtu-v-2022-godu/mezhdunarodnyij-molodezhnyij-lesopromyishlennyij-forum-%C2%ABles-nauka-innovaczii-2022%C2%BB-sentyabr-oktyabr-2022> (accessed 10.10.2024) (In Russian).
7. Leonovich O. K., Bozhelko I. K. Conservation of archaeological and wooden buildings in Belarus. *Kalasaviny: materialy XXXIV nauchnoy konferentsii* [Kalasaviny: materials of the XXXIV scientific conference]. Minsk, 2020, pp. 8–10 (In Russian).
8. Leonovich O. K., Mazalo N. A. Study of the durability of archaeological wood treated with protective compounds. *Muzeynyya zdabytki: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Museum buildings: materials of the II International scientific-practical conference]. Brest, 2020, pp. 30–35 (In Russian).
9. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Conservation of archaeological finds from bog oak. Available at: <http://archtat.ru/events/mezhdunarodnaya-konferentsiya-restavratsiya-konservatsiya-i-muzeefikatsiya-arheologicheskogo-dereva-i-organicheskikh-materialov/> (accessed 28.09.2024) (In Russian).

10. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Modification of bog oak wood with acrylate compounds. *Les – 2020: tezisy dokladov XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy internet-konferentsii* [Forest – 2020: abstracts of the report of the XIX International Scientific and Technical Internet Conference]. Bryansk, 2020. Available at: http://science-bsea.bgita.ru/2022/les_2022/leonovich_komp.htm (accessed 28.09.2024) (In Russian).

11. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Classification approach to assessing the qualitative characteristics of natural bog oak. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: sbornik statey 87-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Forest engineering, materials science and design: abstracts of the reports of the 87th scientific and technical conference with international participation]. Minsk, 2023, pp. 146–149 (In Russian).

12. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Age and species differentiation of natural bog oak. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 2 (270), pp. 204–209. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-23 (In Russian).

13. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Deformation-free drying of natural bog oak. *Les – 2023: tezisy dokladov XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy internet-konferentsii* [Forest – 2023: abstracts of the report of the XXIII International Scientific and Technical Internet Conference]. Bryansk, 2023. Available at: http://science-bsea.bgita.ru/2023/les_2023/leonovich_komp.htm (accessed 28.09.2024) (In Russian).

14. *Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy modifitsirovannoy drevesiny* [Methods of physical and mechanical testing of modified wood]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973. 47 p. (In Russian).

15. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Study of ash residues of bog oak of various age periods in river floodplains. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: tezisy dokladov 71-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Forest engineering, materials science and design: abstracts of the reports of the 85th scientific and technical conference with international participation]. Minsk, 2020, pp. 8–15 (In Russian).

16. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Study of the physical and chemical properties of natural bog oak used for the production of exclusive products and furniture. *Les – 2020: tezisy dokladov XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy internet-konferentsii* [Forest – 2020: abstracts of the report of the XIX International Scientific and Technical Internet Conference]. Bryansk, 2020. Available at: http://science-bsea.bgita.ru/2020/les_2020/leonovich_komp.htm (accessed 28.09.2024) (In Russian).

Информация об авторах

Леонович Олег Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: okl2001@mail.ru

Дупанов Сергей Александрович – магистрант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: serge.zubr@yandex.by

Божелко Игорь Константинович – кандидат технических наук, доцент заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bkbstu@mail.ru

Генюш Инга Владимировна – инженер кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: agniya_21@mail.ru

Information about the authors

Leonovich Oleg Konstantinovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: okl2001@mail.ru

Dupanov Sergey Alexandrovich – Master's degree student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: serge.zubr@yandex.by

Bazhelka Ihar Kanstantinavich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bkbstu@mail.ru

Genyush Inga Vladimirovna – engineer, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agniya_21@mail.ru

Поступила 20.10.2024

УДК 630*377.21

А. О. Шошин¹, В. Штоллманн², С. В. Ярмолик¹¹Белорусский государственный технологический университет²Технический университет в Зволене (Словацкая Республика)**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАБОЛОЧЕННЫХ УСЛОВИЙ**

Предложен и апробирован алгоритм определения параметров мобильной канатной трелевочной установки, позволяющий производить проектирование и включающий следующие пункты: высота мачты, мощность и геометрические размеры рабочих барабанов (несущего, тягового). Обоснована стадийность расчета по алгоритму.

Детерминированы группы мобильных канатных трелевочных установок и коэффициент сопротивления движению в зависимости от эксплуатационных условий: объема хлыста, среднего расстояния трелевки, уклона местности, коэффициента лобового сопротивления, годового объема производства.

Получена диаграмма определения мощности на тяговом и несущем барабанах, позволяющая подобрать базовую машину в зависимости от способа трелевки древесины, коэффициента сопротивления движению, скорости трелевки/подтрелевки, высоты мачты, максимальной величины пролета и объема пачки. Получена диаграмма зависимости диаметра барабана несущего каната от объема пачки, коэффициента запаса прочности и производителя гибкого органа. Построена диаграмма определения диаметра барабана тягового каната в зависимости от объема пачки, коэффициента сопротивления движению, коэффициента запаса прочности и производителя гибкого органа.

Для коробчатого сечения мачты установлены зависимости ширины сечения от высоты мачты, коэффициента сопротивления движению и объема пачки лесоматериалов. Выделены диапазоны рациональных размеров сечений мачты.

Ключевые слова: алгоритм, мощность, барабаны, мачта, трелевочная установка.

Для цитирования: Шошин А. О., Штоллманн В., Ярмолик С. В. Обоснование параметров мобильной канатной трелевочной установки для заболоченных условий // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 83–96.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-9.

A. A. Shoshyn¹, V. Štollmann², S. V. Yarmolik¹¹Belarusian State Technological University²Technical University in Zvolen (Slovak Republic)**DETERMINATION OF PARAMETERS OF A MOBILE CABLE SKIDDING UNIT FOR WATERLOGGED FOREST AREAS**

An algorithm for determining the parameters of a mobile cable skidding unit has been proposed and tested. It allows for design and includes the following points: mast height, power and geometric dimensions of the working drums (carrying, traction). The stage-by-stage nature of the calculation according to the algorithm has been substantiated.

Groups of mobile cable skidding units and the drag coefficient have been determined depending on operating conditions: log volume, average skidding distance, terrain slope, drag coefficient, and annual production volume.

A diagram has been obtained for determining the power on the traction and carrying drums, allowing for the selection of a base machine depending on the timber skidding method, drag coefficient, skidding/skidding speed, mast height, maximum span, and bundle volume. A diagram has been obtained for the dependence of the carrying rope drum diameter on the bundle volume, safety factor, and flexible organ manufacturer. A diagram for determining the diameter of a traction rope drum depending on the volume of a bundle, the coefficient of resistance to movement, the safety factor, and the manufacturer of the flexible organ is constructed. For a box-shaped mast section, the dependences of the section width on the mast height, the coefficient of resistance to movement, and the volume of a bundle of timber are established. Ranges of rational sizes of mast sections are identified.

Keywords: algorithm, power, drums, tower, skidding unit.

For citation: Shoshyn A. O., Štollmann V., Yarmolik S. V. Determination of parameters of a mobile cable skidding unit for waterlogged forest areas. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 83–96 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-9.

Введение. Современный рынок лесозаготовительной техники предоставляет широкие возможности выбора производителя и модели мобильной канатной трелевочной установки. В их числе Larix, Koller, Konrad, Ritter, Madill, Grizzly, TST [1–6]. Однако значительная стоимость этой техники, необходимость долгого и профессионального обучения ставит перед инженерами и учеными задачу проектирования и создания отечественной мобильной канатной трелевочной установки, соответствующей требованиям лесозаготовительного производства и лесохозяйственным ограничениям [7–11].

Серьезную работу по определению параметров привода канатных трелевочных установок проделал В. В. Барыляк, который установил ступенчатый характер изменения моментов инерции приводных барабанов в зависимости от наматывания и разматывания гибкого органа; получил зависимости изменения мощности двигателя базовой машины в зависимости от частоты вращения и количества витков намотки; предложил минимальные значения передаточного отношения привода в зависимости от грузоподъемности установки; обосновал максимально допустимое количество витков наматывания в зависимости от передаточного отношения; раскрыл влияние приведенного коэффициента жесткости линий передач привода на коэффициент динамичности нагрузок, возникающих в приводе [12].

М. П. Мартынюк идентифицировал зависимости коэффициента неравномерности распределения поперечной нагрузки между опорными катками каретки и углом наклона хорды пролета, установил расстояния между осями опорных балансиров и высотой подвески груза [13].

Определению параметров привода двухбарабанной лебедки канатной трелевочной установки посвящена работа А. Н. Удовичко. Автор приводит номограммы, связывающие крутящие моменты на рабочих барабанах, их момент инерции и угловую скорость в зависимости от приведенной жесткости элементов привода [14].

Новый технический подход в направлении создания канатных трелевочных установок представлен в монографии В. Штолльмана, Ш. Ильчика и Ю. Р. Никитина [15]. Авторы предлагают «рекуперационные» решения при проектировании элементов или канатной установки в целом. Разработаны: рабочий макет новой канатной системы с двумя каретками на одном несущем канате; лабораторный стенд гирационной установки.

Фундаментальный вклад в расчет гибких нитей канатных лесотранспортных установок внесли А. И. Дукельский, Н. М. Белая, А. Schlaghamerský, P. Roško [16–19].

В то же время авторами приведенных работ не были напрямую предложены и обоснованы параметры привода, мачты, каретки, не выявлен

детерминированный подход к определению базовой машины и каретки.

Цель работы – выработка последовательного и взаимно увязанного алгоритма определения параметров мобильных канатных трелевочных установок и анализ полученных результатов, выполненных по данному алгоритму.

Актуальность темы заключается в том, что на данный момент не обнаружено цельной расчетной системы, позволяющей подбирать параметры канатных трелевочных установок, в том числе мобильных.

Основная часть. При проектировании мобильной канатной трелевочной установки необходимо руководствоваться лесорастительными условиями лесосечного фонда и годовым объемом лесозаготовок по труднодоступному лесному фонду.

Для условий Республики Беларусь наиболее эффективно применение установки со следующими характеристиками:

- а) принципиальная схема мобильной канатной трелевочной установки – с неподвижным несущим канатом;
- б) тип привода – от двигателя базовой машины;
- в) тип движителя базовой машины – колесный;
- г) назначение рабочих канатов – несущий, тяговый, возвратный, вспомогательный, монтажный (в зависимости от конструкции и технологии монтажных работ);
- д) способ перемещения установки – самоходная;
- е) конструкция трелевочной мачты – навесная, двухсекционная;
- ж) тип каретки – вытяжная.

Установки с заданными характеристиками могут эффективно применяться в первую очередь для полуподвесной трелевки древесины на сплошных рубках.

Алгоритм определения параметров мобильной канатной трелевочной установки с вышеописанными характеристиками представлен в виде блок-схемы на рис. 1.

Алгоритм включает ряд действий:

- анализ лесорастительных условий разрабатываемого лесного фонда;
- определение типа установки;
- расчет сменной производительности $P_{см}$ канатной установки по заданным исходным данным;
- вычисление скорости трелевки $v_{тр}$ по выбранному объему пачки $V_{пач}$ и сменной производительности $P_{см}$;
- определение высоты мачты;
- выбор способа трелевки (подвесная, полуподвесная, волоком) и определение усилий в канатах и касательной силы на барабанах;
- расчет мощности на барабанах и выбор базовой машины;
- установление параметров барабанов и канатов;
- определение сечения мачты;
- подбор каретки на основании типа установки.

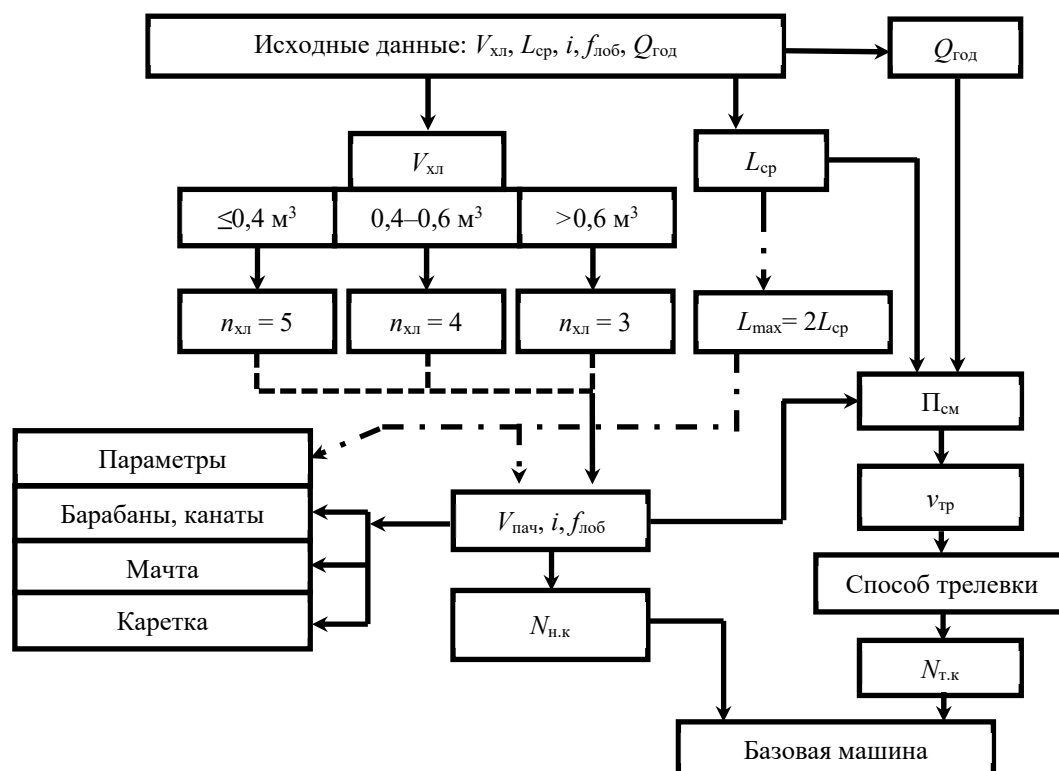


Рис. 1. Алгоритм определения параметров мобильной канатной трелевочной установки на базе трактора
(в данной статье не приведены следующие элементы алгоритма: определение параметров каретки;
подбор базовой машины)

В лесозаготовительных условиях Республики Беларусь наиболее вероятным вариантом работы мобильных канатных трелевочных установок является обеспечение освоения труднодоступных заболоченных лесосек не отдельного лесхоза, а целого ГПЛХО или группы рядом расположенных лесхозов. Это связано с необходимостью обеспечения полной загрузки техники в течение года.

На основе изученных источников [9, 15–20] выделены 3 типа установок:

- легкие (объем пачки до 1,5 м³, максимальная величина пролета 70 м);
- средние (объем пачки от 1,5 до 5 м³, максимальная величина пролета 100 м);
- тяжелые (объем пачки от 5 до 10 м³, максимальная величина пролета 200 м).

Зависимость конструкции проектируемой установки от лесорастительных факторов: $V_{хл}$ (объем хлыста), $L_{ср}$ (среднее расстояние трелевки), i (средний уклон местности), $f_{лоб}$ (коэффициент лобового сопротивления) – связана со значительной вариацией усилий в рабочих органах, мачте, каретке и, следовательно, с широким диапазоном изменения мощности привода и базовой машины.

При выборе значения коэффициента лобового сопротивления $f_{лоб}$ необходимо проведение обследования характерных лесосек разрабатываемого лесфонда. Для этого значения $f_{лоб}$ разбиты на несколько групп, полученных в результате анализа

ряда работ и экспериментальных исследований заболоченного лесного фонда Республики Беларусь [21–25]:

- $f_{лоб} \leq 1$:
 - а) средняя высота корневой шейки находится в пределах до 0,5 м;
 - б) встречаются одиночные естественные холмы и овраги;
- $f_{лоб} = 1–2$:
 - а) средняя высота корневой шейки находится в пределах 0,5–1 м;
 - б) множественные естественные холмы и овраги;
- $f_{лоб} = 2–2,5$:
 - а) средняя высота корневой шейки достигает 1,5 м;
 - б) множественные естественные холмы и овраги;

Наиболее важным фактором является средний объем хлыста, непосредственно влияющий на объем пачки и усилия в канатах. Никаких технических ограничений на объем пачки не существует, однако практика применения таких установок показывает, что объем пачки ограничен количеством лесоматериалов, которые она включает. Количество лесоматериалов в пачке должно находиться в диапазоне от 3 до 5 штук и определяться в соответствии с алгоритмом (рис. 1).

Ограничение количества хлыстов в пачке не более 5 связано с увеличением времени цикла за счет чокаровки, повышения количества зацепов пачки и времени на ее высвобождение, что напрямую влияет на уменьшение производительности установки [26, 27]. Уклон местности с подъемом в сторону головной мачты увеличивает сопротивление подъему пачки при трелевке вдоль несущего каната, однако труднодоступный лесосечный фонд страны в подавляющем объеме представлен заболоченными равнинными территориями, для которых уклоны минимальны. Для разрабатываемой методики определения параметров заложен уклон в 5° в сторону лесосеки от верхнего склада. Среднее расстояние трелевки принималось в зависимости от максимального как 1:2.

В соответствии с порядком определения параметров мобильных канатных трелевочных установок (рис. 1), используя исходные данные разрабатываемого лесного региона (среднее расстояние трелевки $L_{\text{ср}}$, средний объем хлыста $V_{\text{пач}}$) и требуемую сменную производительность $P_{\text{см}}$ (исходя из годового объема заготовок), определяется скорость трелевки $v_{\text{тр}}$ (рис. 2).

В зависимости от выбранного способа трелевки пачки вдоль несущего каната и скорости перемещения максимальное значение мощности барабана тягового каната $N_{\text{т.к}}$ может быть определено либо по усилию на подтрелевку $S_{\text{т.к.под}}$ операции подтрелевки, либо по операции трелевки по усилию на трелевку $S_{\text{т.к.тр}}$ (рис. 3). Для обеспечения безопасных условий труда на операции подтрелевки принята минимальная скорость данной операции, равная 0,5 м/с. Мощность привода барабана несущего каната $N_{\text{н.к}}$ определяется на основе выбора величины пролета, высоты мачты, скорости намотки/размотки несущего каната при монтажно-демонтажных работах.

По данной диаграмме определяется необходимая мощность двигателя базовой машины на основе максимального из двух значений мощности, определенных через мощность на привод барабанов тягового и несущего канатов в соответствии с принятым КПД привода 0,9. На основе предварительных расчетов мощности из условия проходимости колесной техники на лесных заболоченных почвах было получено пороговое значение мощности двигателя в 130 кВт.

Для определения параметров привода канатной установки на рис. 3 приведена номограмма, анализ которой позволяет отметить:

- установки для полуподвесной трелевки за комли и за вершины при скорости 5 м/с ограничены объемом пачки $3,5 \text{ м}^3$, а при подвесной трелевке – $3,0 \text{ м}^3$. Ограничения при скорости трелевки 4 м/с: для полуподвесной трелевки за комли – $4,5 \text{ м}^3$, за вершины – $4,0 \text{ м}^3$, при подвесной – $3,5 \text{ м}^3$. Для меньших скоростей ограничений нет;

- при значении мощности до 65 кВт в зависимости от способа трелевки и величины коэффициента сопротивления движению мощность барабана тягового каната может быть определена либо по операции подтрелевки, либо по операции трелевки. При больших значениях мощности определяется только по операции трелевки;

- при скорости намотки/размотки барабана несущего каната 1,5 м/с параметры установки ограничены 2 м^3 при расстоянии трелевки 100 м и 3 м^3 при расстоянии трелевки 70 м для всех высот мачты;

- при величине пролета 100 м существуют следующие ограничения: при высоте мачты 8 м объем пачки не должен превышать 4 м^3 , при высоте 7 и 6 м должен быть не более $3,5 \text{ м}^3$. При величине пролета 70 м нет ограничений.

Определение параметров канатов и барабанов. Приведенные на рис. 4 и 5 номограммы позволяют установить диаметры и производителя несущего $d_{\text{н.к}}$ и тягового $d_{\text{т.к}}$ канатов, а также диаметры соответствующих им барабанов $D_{\text{н.к}}$ и $D_{\text{т.к}}$ (в данной статье приведены только для пролета в 100 м).

Проведенные исследования (рис. 4) показали, что увеличение высоты мачты приводит к уменьшению усилия в несущем канате, что положительным образом сказывается на обеспечении безаварийного прохождения пачки по трелевочному коридору, частично уменьшает суммарный изгибающий момент, приходящийся на мачту. В зависимости от производителя гибкого органа (зарубежный либо отечественный) при одинаковых и близких величинах диаметра каната разрывное усилие может отличаться весьма значительно [28–38]. Начиная с диаметра 12 мм существенное преимущество по отношению к остальным вариантам наблюдается у производителя Teufelberger (модель F30) [30]. В сторону уменьшения усилия в несущем канате можно отметить весьма близкие значения разрывного усилия для производителей Python (модель 6 R+F), Drumet (модель K6×25F), Vornbaumen (модель VS 6-5 C). При этом показатели производителя Vornbaumen незначительно уступают Python и Drumet [29, 31, 32]. Разрывные характеристики отечественных канатов, производимых в соответствии с требованиями стандартов (ГОСТ 3077–80, ГОСТ 2668–80, ГОСТ 7667–80) [34, 36, 37], достаточно сильно уступают зарубежным, что вызвано давностью разработки этих норм, игнорированием видом грузоподъемных машин и спецификой их работы, в то время как зарубежные производители выделяют отдельные марки канатов для выполнения операций на машинах конкретных отраслей промышленности. Наилучшим отечественным вариантом для применения в качестве несущего органа является канат, отвечающий требованиям ГОСТ 7667–80 [34].

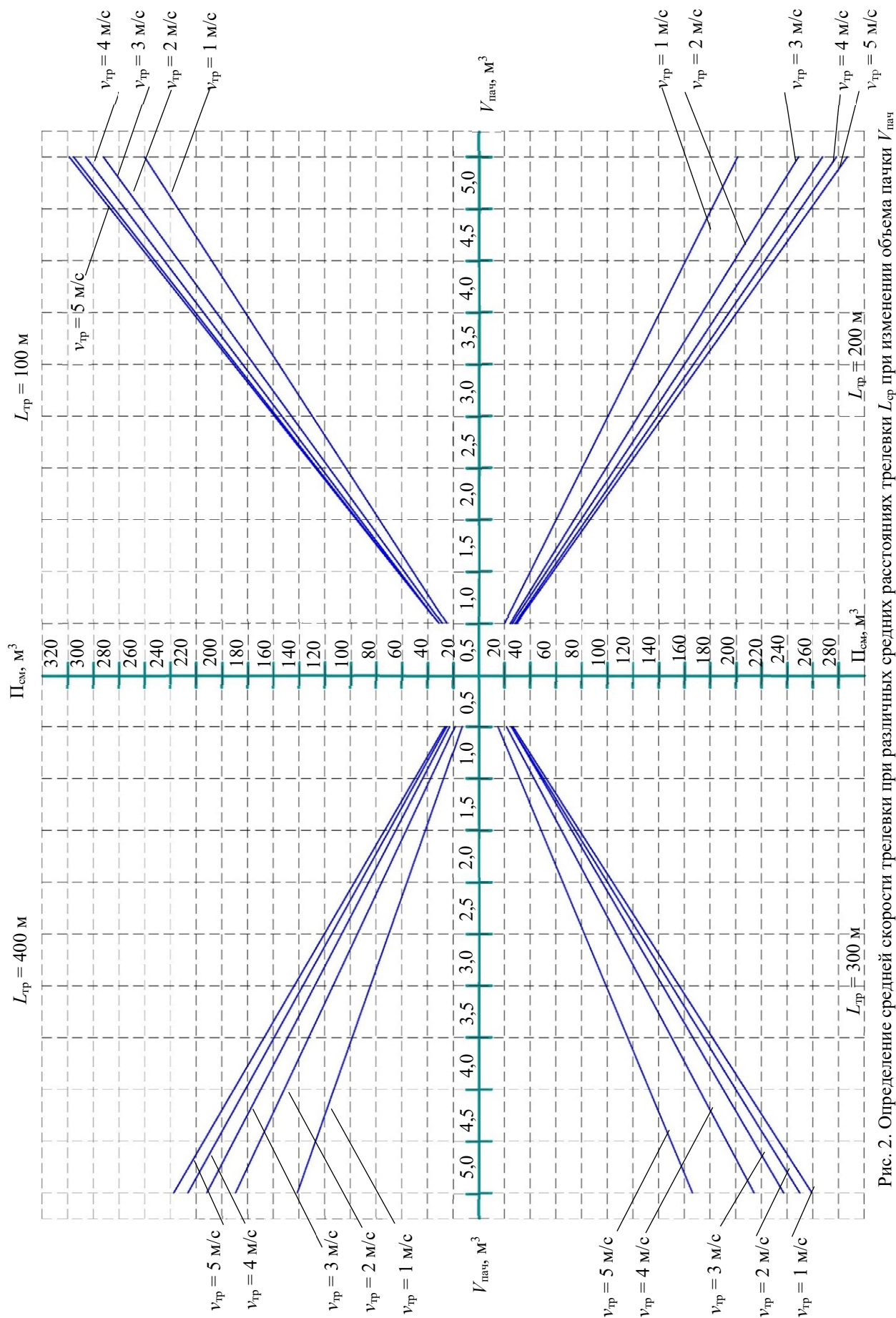


Рис. 2. Определение средней скорости треловки при различных средних расстояниях треловки $L_{\text{тр}}$ при изменении объема пачки $V_{\text{пач}}$

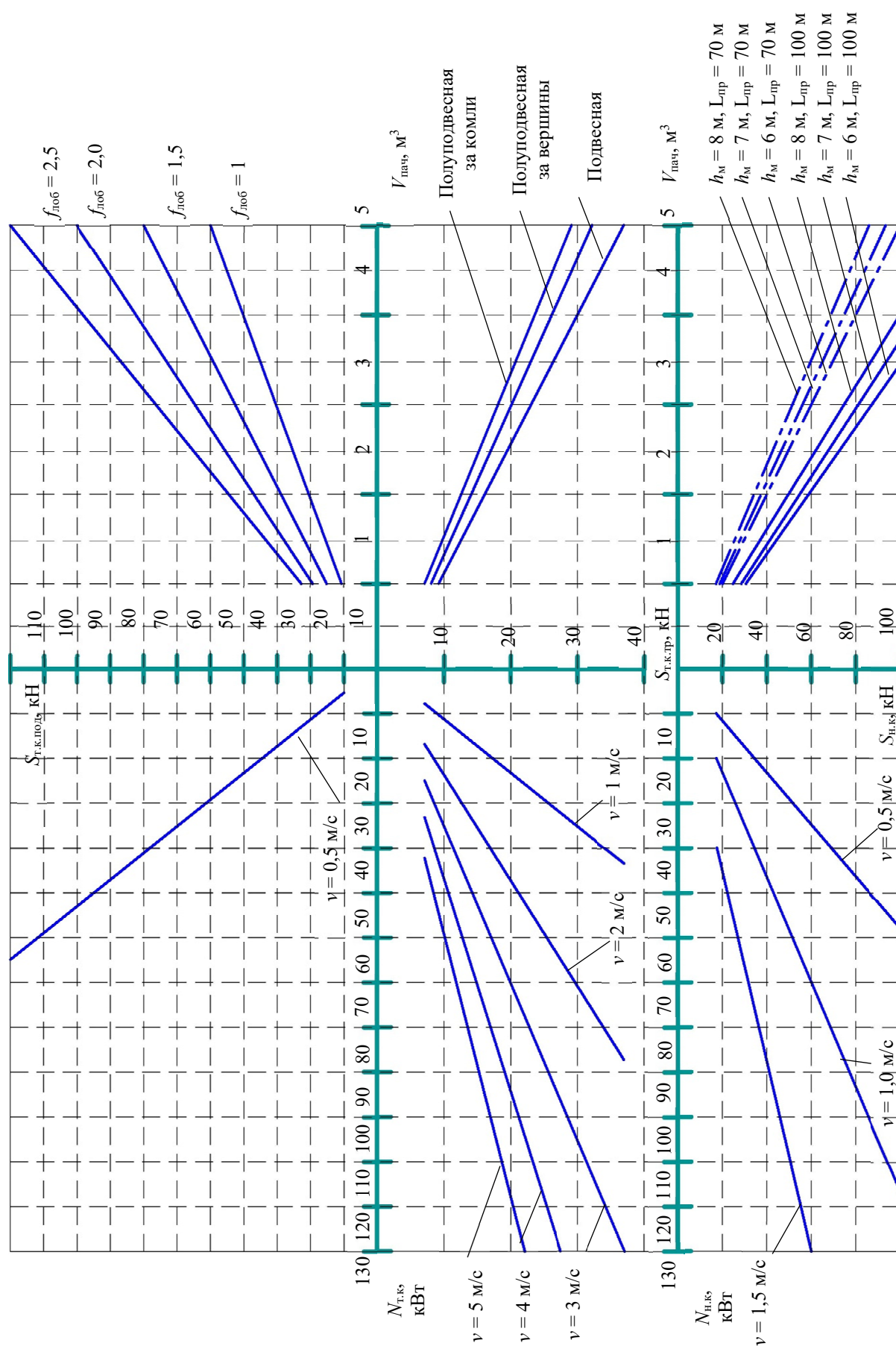


Рис. 3. Диаграмма определения мощности на барабанах тягового и несущего канатов

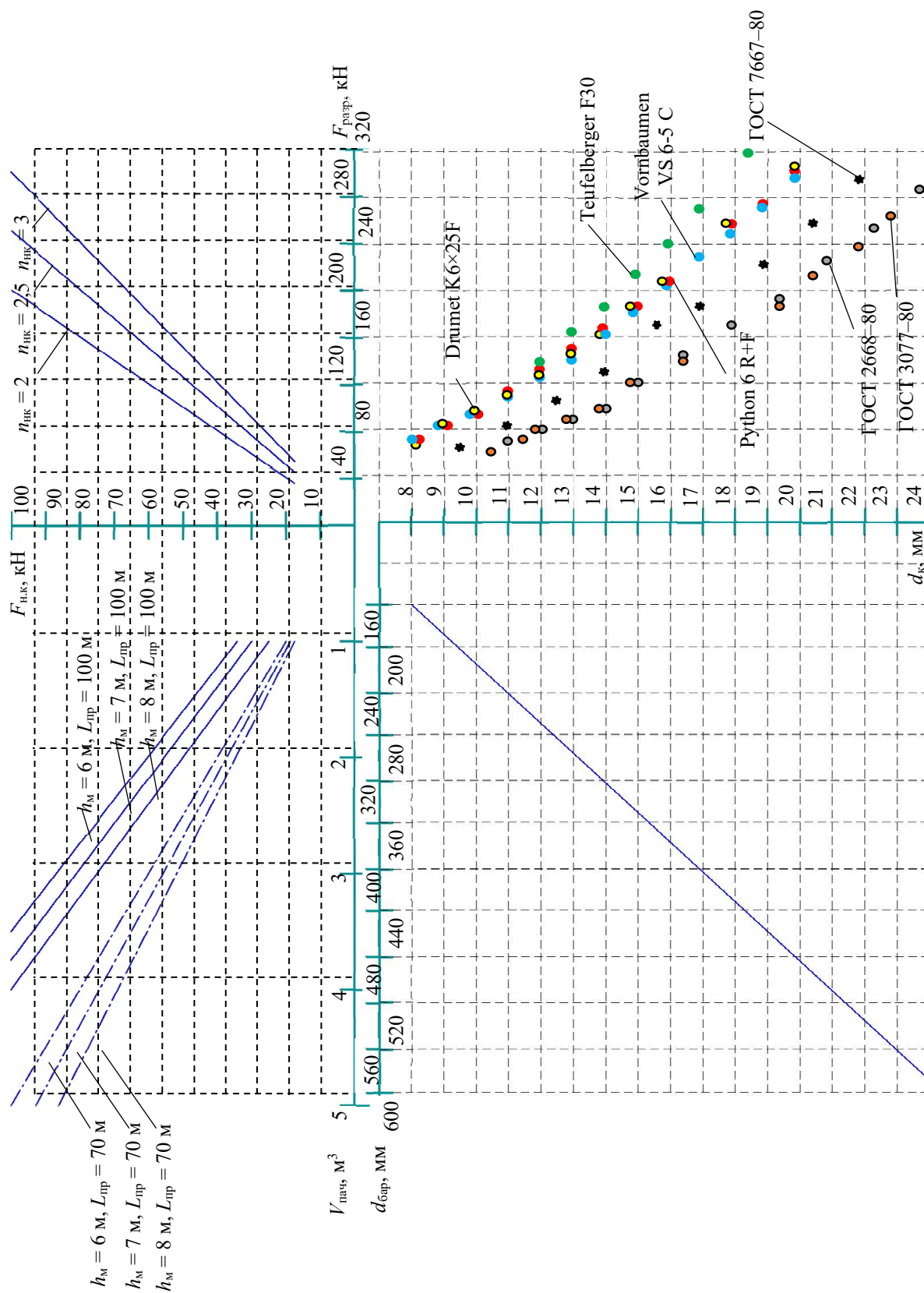


Рис. 4. Подбор параметров для барабана несущего каната при расстоянии пролета 100 м

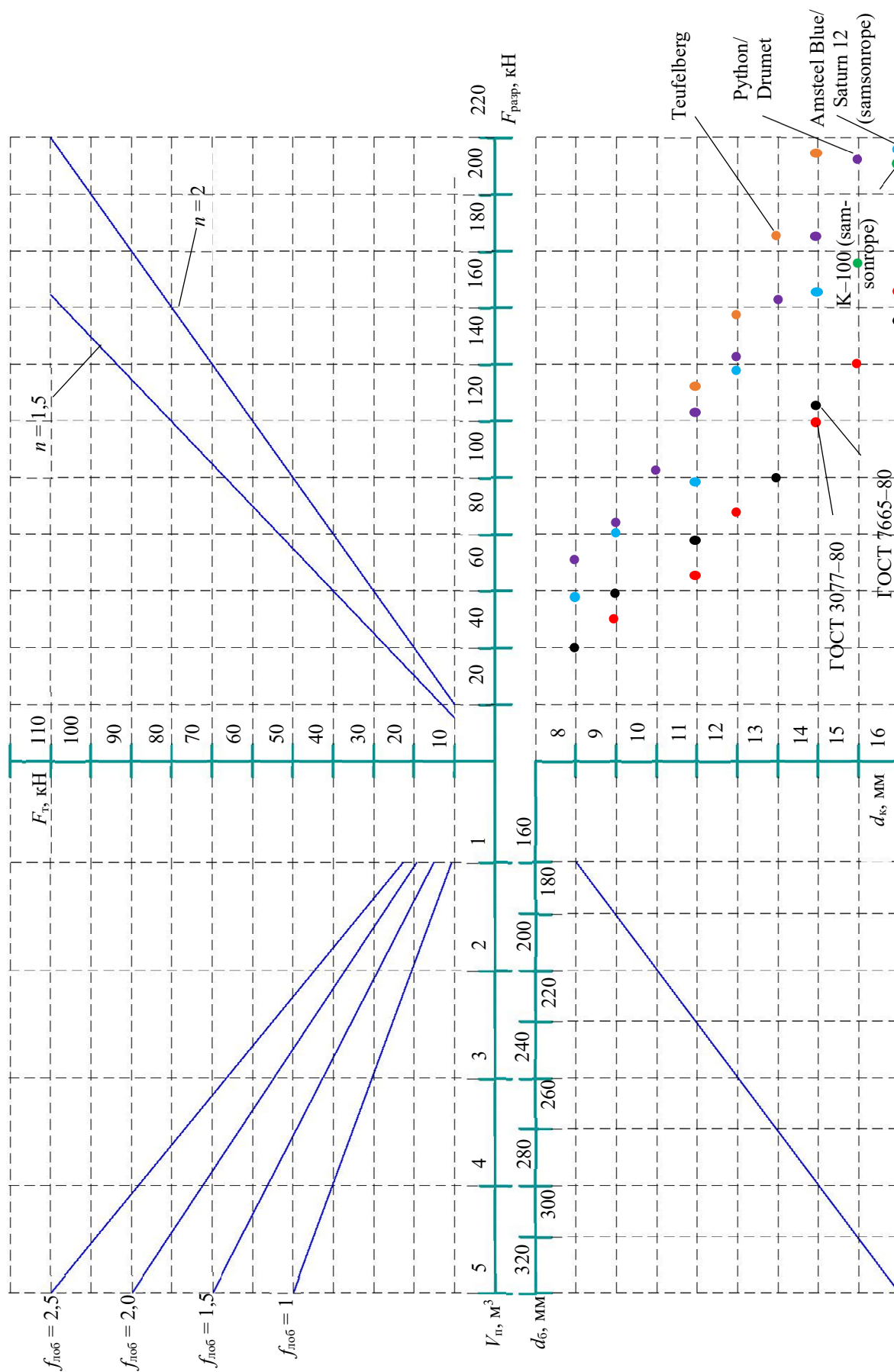


Рис. 5. Подбор параметров для барабана тягового каната при расстоянии пролета 100 м

Анализ графика (рис. 5) в четвертой четверти позволяет сделать заключение, что при одинаковых диаметрах канатов разрывные усилия в них могут отличаться в 1,5–2 раза. Наиболее эффективно применение специализированных канатов для лесной промышленности (Python, Drumet, Teufelberger). Для данной номограммы, в отличие от исследований по несущему канату, использовался заниженный коэффициент запаса прочности 1,5 и 2 по сравнению с рекомендованным 4–6 [28]. Это связано с тем, что усилия в тяговом канате при работе на заболоченных лесах будут достаточно сильно завышены за счет влияния лобовых сопротивлений и коэффициента $f_{\text{лоб}}$, который их учитывает. При использовании коэффициентов, рекомендованных для других условий, диаметры канатов и барабанов приобретают значительные величины, не позволяющие их реализовать на практике. Аналогично рис. 4 наблюдается тенденция, при которой отечественные конструкции канатов имеют более низкий по отношению к зарубежным моделям показатель соотношения диаметр – разрывное усилие.

Определение параметров мачты. Среди рассмотренных вариантов сечения мачты канатных трелевочных установок универсальным является квадратное корабчатое (рис. 6, а). Оно может быть получено путем сварки двух швеллеров либо цельной трубой корабчатого сечения в соответствии с ГОСТ 32931–2015 [39]. Угол между растяжками и осью симметрии мачты в плане, а также между растяжками и горизонтальной плоскостью рекомендуется принимать в диапазоне 30–60°

[15–20] (рис. 6, б, в). Для расчетов принималось среднее значение 45°.

Диаграмма, построенная на основании методики [40] (рис. 7), отражает изменения параметра сечения в зависимости от усложнения условий работы установки с помощью коэффициента лобового сопротивления (от 1 до 2,5). Также варьирование выполнено для диапазона высот мачты, характерного для установок с неподвижным несущим канатом, – от 6 до 8 м. Полученные зависимости близки к линейным.

Из графика (рис. 7) видно, что для условий, когда коэффициент $f_{\text{лоб}} = 2$, высота мачты $h = 6$ м, параметр сечения b аналогичен условиям $f_{\text{лоб}} = 1,5$, $h = 8$ м. Параметр сечения при условиях $f_{\text{лоб}} = 2$ и $h = 8$ м выше, чем для условий $f_{\text{лоб}} = 2,5$, $h = 6$ м. Все остальные зависимости отражают последовательное увеличение параметра сечения при увеличении высоты мачты и усложнении условий подтрелевки.

В соответствии с экспериментальными исследованиями [21] при выполнении операций рабочего цикла в тяговом канате возникают усилия, изменяющиеся большую часть цикла в установившемся режиме. Неустановившийся режим наступает при прохождении пачки через препятствия. Влияние препятствий на резкий рост усилия в тяговом канате учитываются коэффициентом лобового сопротивления при его определении. Поэтому при расчете допускаемого напряжения при изгибе выбирались значения, соответствующие симметричной нагрузке для широко используемой в промышленности марки стали Ст3 при $[\sigma] = 150$ МПа [41].

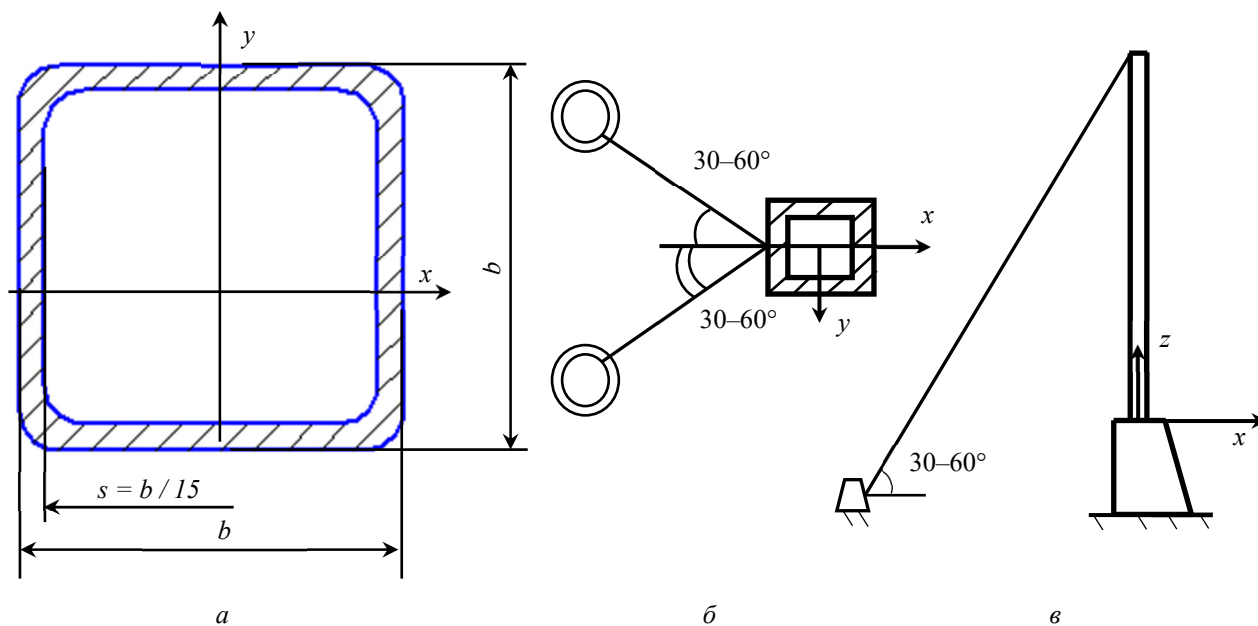
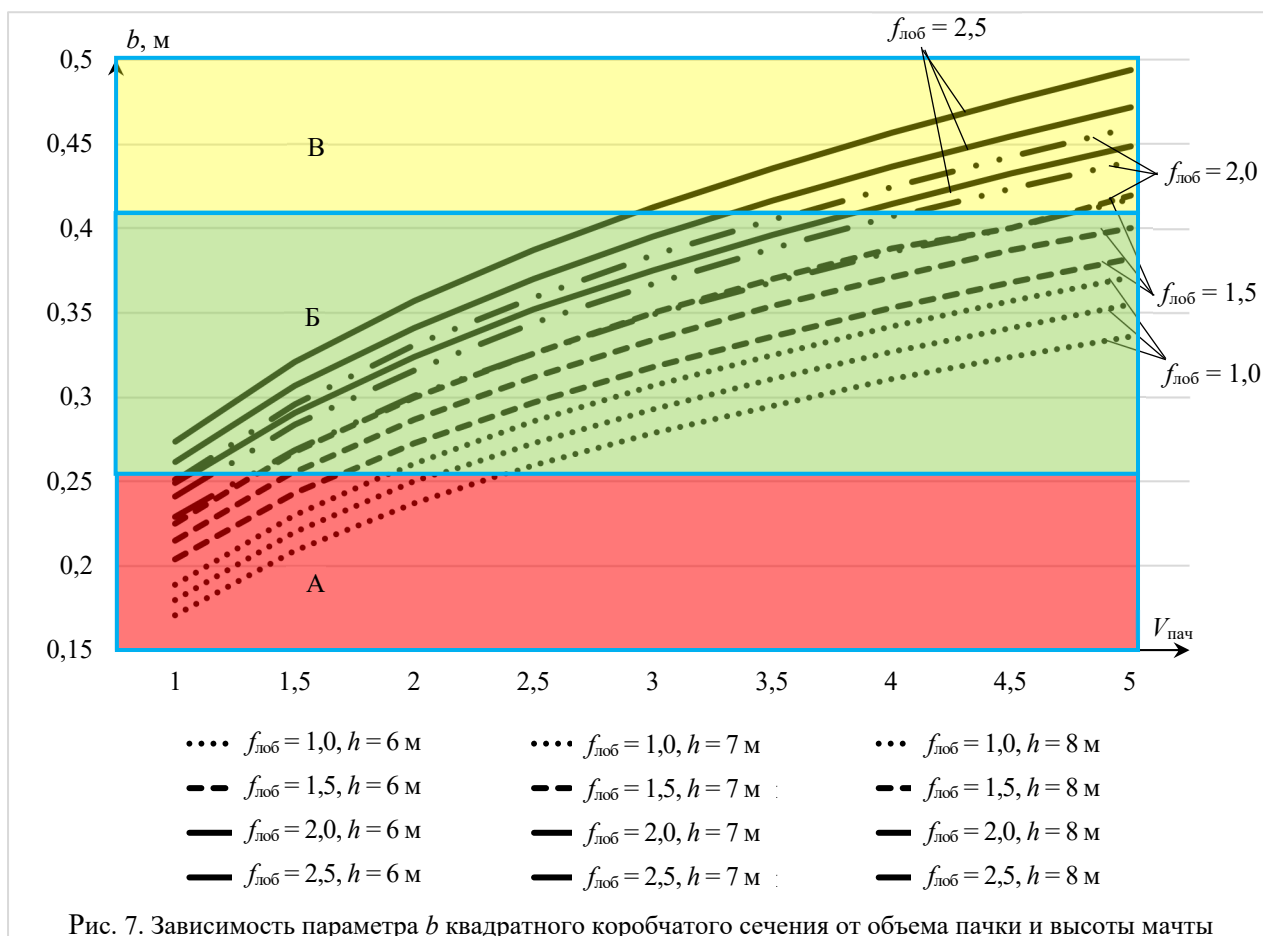


Рис. 6. Параметры мачты:
а – поперечное сечение; б – мачта и растяжки в плане за мачтой (растяжки перед мачтой не показаны); в – мачта и растяжка в профиле



На диаграмме (рис. 7) выделены 3 зоны: А – область, из которой не рекомендуется выбирать сечения мачты, исходя из возможной потери устойчивости конструкции и сложности обеспечения установки дополнительных элементов (блоков, лестниц) на мачте небольшого поперечного сечения; Б – область, из которой рекомендуется в первую очередь выбирать размер поперечного сечения мачты; В – область завышенных значений параметра сечения, которые рекомендуется принимать только при повышенном коэффициенте запаса прочности и значительном объеме дополнительных элементов на мачте.

Выводы. Полученные в данной работе результаты направлены в первую очередь на обоснованный и практикоориентированный подход в выборе параметров привода и мачты проектируемых мобильных канатных трелевочных установок. Данные параметры вместе с непредставленными результатами подбора кареток и выбора базовой машины позволят получить комплексный взгляд на будущую канатную установку.

Первоочередным шагом при проектировании мобильной канатной трелевочной установки для заболоченных лесосек должно быть грамотное и систематизированное изучение лесозаготовительной базы. Игнорирование данного пункта, с

одной стороны, может привести к завышенным параметрам, увеличению стоимости и общей массы конструкции, с другой стороны, к поломкам и травмам среди персонала.

При сопоставлении полученных параметров (рис. 3–5, 7) и параметров существующих установок могут быть получены завышенные значения параметров мощности, сечения мачты, диаметров канатов, что вызвано лесозаготовительными особенностями заболоченных лесосек и заложенным в связи с этим дополнительным запасом прочности.

Рабочие канаты (несущий, тяговый) в первую очередь необходимо выбирать из ряда специализированных канатов, разработанных для лесозаготовительной техники.

Существуют мачты и других сечений, например круглого [3], применяемые для установок со значительной высотой мачты (20–25 м). Однако такое сечение имеет большую металлоемкость по сравнению с коробчатым. Альтернативой коробчатому сечению может быть сечение, сваренное из двух швеллеров таким образом, чтобы образовалось закрытое полое сечение.

Для усредненных условий заготовки древесины на заболоченных лесосеках Республики Беларусь ($L_{тр} = 200$ м, $f_{лоб} = 1,5$, скорость полуподвесной

трелевки за комли 2 м/с, скорость намотки несущего каната 1,0 м/с, высота мачты 7 м, величина пролета 100 м, объем пачки 3 м³) необходимо соблюдать следующие параметры:

– мощность привода 90 кВт;

– диаметр барабана несущего каната 360 мм;

– диаметр несущего каната 16 мм;

– диаметр барабана тягового каната 200 мм;

– диаметр тягового каната 9 мм;

– параметр сечения $b = 0,35$ м

Список литературы

1. Канатные установки TST // TST-Forestry. URL: <http://tst-forestry.com/seilkraeneindex> (дата обращения: 09.03.2024).
2. Канатные установки Koller // Koller Forsttechnik. URL: <https://kollergmbh.com/en/yarder> (дата обращения: 09.03.2024).
3. Канатные установки Madill // Madill equipment. URL: <https://madill.dcforestryequipment.com> (дата обращения: 09.03.2024).
4. Канатные установки Herzog // Grizzly yarders. URL: <https://www.agriculture-xprt.com/products/grizzly-model-400-yarder-combines-371632> (дата обращения: 09.03.2024).
5. Канатные установки Konrad // Konrad yarders. URL: <https://www.forsttechnik.at/products/tower-yarders/kms/km40-2> (дата обращения: 09.03.2024).
6. Канатные установки SLP Krtiny // Larix yarders. URL: <http://www.slpkrtiny.cz/ru/eieel-lner-al-nleuiinnu/elni-l-errci/elni-l-erric/larix-3t/> (дата обращения: 09.03.2024).
7. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки главного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1360 – 2002. Минск: Госстандарт, 2002. 22 с.
8. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Машины для рубок леса. Общие технические требования: СТБ 1342-2002. Минск: Госстандарт, 2002. 18 с.
9. Установки канатные подвесные для лесозаготовок. Типы и основные параметры: ОСТ 13-81-80. М.: Изд-во стандартов, 1981. 7 с.
10. Машины лесозаготовительные. Машины самоходные. Требования безопасности: СТБ ЕН 14861–2007. Минск: Госстандарт, 2007. 22 с.
11. Машины для леса. Лебедки. Определения, технические требования, требования безопасности: ГОСТ 34280–2017. М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2007. 15 с.
12. Барыляк В. В. Обґрунтування параметрів приводів лісотранспортних канатних установок: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. Львів, 2015. 222 л.
13. Мартынцев М. П. Исследование нагрузок на ходовые колеса грузовых кареток и их влияние на работу несущего каната: дис. ... канд. техн. наук: 05.06.02. Львов, 1980. 274 л.
14. Удовичий О. М. Обґрунтування основних параметрів та розробка привода мобільної канатної лісотранспортної установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.07. Львів, 1999. 236 л.
15. Štollmann V., Ilčík Š., Nikitin J. R. Rekuperačné lanové zariadenia. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2017. 171 p.
16. Horek P. Lesní lanovky. Praha: Lesnická práce, 2007. 104 p.
17. Белая Н. М., Прохоренко А. Г. Канатные лесотранспортные установки. М.: Лесная пром-сть, 1967. 299 с.
18. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.: Машиностроение, 1966. 484 с.
19. Schlaghamerský A., Roško P. Lesní vývozní lanovky. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1964. 262 p.
20. Lulay M., Wimer J. Yarding and loading. Oregon: Osha, 2010. 164 p.
21. Шошин А. О. Экспериментальные исследования мобильной канатной трелевочной установки в равнинных условиях // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 121–132. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-13.
22. Ходосовский М. В. Исследование проходимости хлыстов при полуподвесной трелевке лебедками: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 1968. 276 л.
23. Алышев И. Ф. Исследование сопротивления движению при трелевке лебедками ТЛ-3 полуподвесным способом: автореф. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 1953. 15 с.
24. Коротяев Л. В. Исследование сопротивления движению при трелевке леса: автореф. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Свердловск, 1970. 32 с.
25. Исследование процесса трелевки хлыстов на заболоченных лесосеках канатными установками в зимний период / А. О. Шошин [и др.] // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 апр. 2017 г. Минск, 2017. С. 72–76.
26. Spinelli R., Maganotti N., Visser R. Productivity Models for Cable Yarding in Alpine Forests // Eur. J. Forest Eng. 2015. No. 1 (1). P. 9–14.

27. Senturk N., Ozturk T., Demir M. Productivity and costs in the course of timber transportation with the Koller K300 cable system in Turkey // Building and Environment. 2007. No. 42. P. 2107–2113.
28. Кусакин Н. Ф., Минаков И. Ф., Носиков А. А. Стальные канаты на лесозаготовках. М.: Лесная пром-сть, 1982. 136 с.
29. Python wire ropes. Product catalog high performance ropes edition 2019/2020.
30. Teufelberger wire ropes // Teufelberger. Redaelli. URL: <https://www.teufelberger.com/en/products-services/construction.html> (date of access: 09.03.2024).
31. Vornbaumen wire ropes // Vornbaumen. URL: <https://makkee.com/en/product/vornbaumen/> (date of access: 09.03.2024).
32. Drumet wire ropes // WireCO. URL: <https://www.drumet.pl/applications/druforest-forestry-logging> (date of access: 09.03.2024).
33. Канат двойной свивки типа ЛК-3 конструкции 6×25: ГОСТ 7665–80. М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1982. 8 с.
34. Канат двойной свивки типа ЛК-3 конструкции 6×25: ГОСТ 7667–80. М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1982. 8 с.
35. AmSteel wire ropes // Samson. URL: <https://www.samsonrope.com/crane> (date of access: 09.03.2024).
36. Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6×19: ГОСТ 2688–80. М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1982. 12 с.
37. Канат двойной свивки типа ЛК-О конструкции 6×19: ГОСТ 3077–80. М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1982. 8 с.
38. Канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции 6×36(1+7+7/7+14)+1 о.с. ГОСТ 7668–80. М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1982. 12 с.
39. Трубы стальные профильные для металлоконструкций: ГОСТ 3293–2015. М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. 81 с.
40. Методика определения параметров сечения мачты мобильной канатной трелевочной установки на базе трактора / А. О. Шошин [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 155–164.
41. Допускаемые напряжения // Алекс-проект. URL: https://alexfl.pro/inform/inform_stali4.html (дата обращения: 09.03.2024).

References

1. Cable yarders TST. Available at: <http://tst-forestry.com/seilkraeneindex> (accessed 09.03.2024) (In Russian).
2. Cable yarders Koller. Available at: <https://kollergmbh.com/en/yarder> (accessed 09.03.2024) (In Russian).
3. Cable yarders Madill. Available at: <https://www.madillequipment.com/172-tower-yarder.php> (accessed 09.03.2024) (In Russian).
4. Cable yarders Grizzly. Available at: <http://www.forst-service.com/Grizzly%20400-Yarder.htm> (accessed 09.03.2024) (In Russian).
5. Cable yarders Konrad. Available at: <https://www.forsttechnik.at/products/tower-yarders/kms/km40-2> (accessed 09.03.2024) (In Russian).
6. Cable yarders SLP Krtiny. Available at: <http://www.slpkrtiny.cz/ru/eieel-lner-al-nleuiinnu/elni-l-errci/elni-l-erric/larix-3t/> (accessed 09.03.2024) (In Russian).
7. STB 1360–2002. Sustainable forest management and forest use. Final fellings. Technology requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2002. 22 p. (In Russian).
8. STB 1342–2002. Sustainable forest management and forest use. Forest cutting machines. General technical requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2003. 18 p. (In Russian).
9. OST 13-81–80. Cable yarding systems. Types and main parameters. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1981. 7 p. (In Russian).
10. STB EN 14861–2007. Forest machinery. Selfpropelled machinery. Safety requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2007. 22 p. (In Russian).
11. GOST 34280–2017. Machinery for forestry. Winches. Dimensions, performance and safety. Moscow, Mezghosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2017. 15 p. (In Russian).
12. Barylyak V. V. *Obgruntuvannya parametriv privediv lisotransportnykh kanatnykh ustanovok. Dissertatsiya kandidata technichnykh nauk* [Justification of the drive parameters of cable yarding systems. Dissertation PhD (Engineering)]. Lviv, 2015. 222 p. (In Ukrainian).
13. Martynciv M. P. *Issledovaniye nagruzok na khodovyye koleasa gruzovykh kareток i ikh vliyaniye na rabotu nesushchego kanata. Dissertatsiya kandidata technicheskikh nauk* [Study of loads on the running wheels of carriages and their impact on the operation of the skyline. Dissertation PhD (Engineering)]. Lviv, 1980. 274 p. (In Russian).

14. Udovitskiy O. M. *Obgruntuvannya osnovnykh parametriv ta rozrobka pryvoda mobil'noi kanatnoi lisotransportnoi ustanovki. Dissertatsiya kandidata tekhnichnykh nauk* [Substantiation of the main parameters and development of the drive of the cable yarding system. Dissertation PhD (Engineering)]. Lviv, 1999. 236 p. (In Ukrainian).
15. Štollmann V., Ilčík Š., Nikitin J. R. *Rekuperáčné lanové zariadenia*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene Publ., 2017. 171 p. (In Slovak).
16. Horek P. *Lesní lanovky*. Praha, Lesnická práce Publ., 2007. 104 p. (In Czech).
17. Belaya N. M., Prokhorenko A. G. *Kanatnyye lesotransportnyye ustanovki* [Cable yarding systems]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 299 p. (In Russian).
18. Dukelskiy A. I. *Podvesnyye kanatnyye dorogi i kabelnyye krany*. Moscow, Mashinocnroyeniye Publ., 1966. 484 p.
19. Schlaghamerský A., Roško P. *Lesní vývozní lanovky*. Praha, Státní zemědělské nakladatelství Publ., 1964. 262 p. [In Czech].
20. Lulay M., Wimer J. *Yarding and loading. Handbook*. Oregon, Osha Publ., 2010. 164 p.
21. Shoshyn A. O. Experimental researches of the cable yarder in flat cutting areas. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 1 (264), pp. 121–132. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-13 (In Russian).
22. Khodosovsky M. V. *Issledovaniye prokhodimosti khlystov pri polupodvesnoy trelevke lebedkami. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Research stems patency at high lead yarding winches. Dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 1968. 276 p. (In Russian).
23. Alyshev I. F. *Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu pri trelevke lebedkami TL-3 polupodvesnym sposobom. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Resistance movement study yarding winch TL-3 semi-overhead way. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. St. Petersburg, 1953. 15 p. (In Russian).
24. Korotyaev L. V. *Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu pri trelevke lesa. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the resistance movement at the timber yarding. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Sverdlovsk, 1970. 32 p. (In Russian).
25. Shoshyn A. O., Protas P. A., Mokhov S. P., Grechko V. V. Study of the cable crane tree-skidding process on swampy logging sites in the winter season. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging industry: problems and solutions: materials of first International scientific-technical conference]. Minsk, 2017, pp. 72–76 (In Russian).
26. Spinelli R., Maganotti N., Visser R. Productivity Models for Cable Yarding in Alpine Forests. *Eur. J. Forest Eng.*, 2015, no. 1 (1), pp. 9–14.
27. Senturk N., Ozturk T., Demir M. Productivity and costs in the course of timber transportation with the Koller K300 cable system in Turkey. *Building and Environment*, 2007, no. 42, pp. 2107–2113.
28. Kusakin N. F., Minakov I. F., Nosikov A. A. *Stal'nyye kanaty na lesozagotovkakh* [Steel ropes in logging]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 136 p. (In Russian).
29. Python wire ropes. Product catalog high performance ropes edition 2019/2020.
30. Teufelberger wire ropes. Available at: <https://www.teufelberger.com/en/perfection-f30-woodrunner.html> (accessed 09.03.2024).
31. Vornbaumen wire ropes. Available at: <https://www.vornbaeumen.de/en/products/special-ropes/forestry-ropes.html> (accessed 09.03.2024).
32. Drumet wire ropes. Available at: <https://www.drumet.pl/applications/druforest-forestry-logging> (accessed 09.03.2024).
33. GOST 7665–80. Double lay rope type LK-3, design 6×25. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1982. 8 p. (In Russian).
34. GOST 7667–80. Double lay rope type LK-3, design 6×25. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1982. 8 p. (In Russian).
35. AmSteel wire ropes. Available at: <https://www.samsonrope.com/crane> (accessed 09.03.2024).
36. GOST 2668–80. Double lay rope type LK-R, design 6×19. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1982. 12 p. (In Russian).
37. GOST 3077–80. Double lay rope type LK-O, design 6×19. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1982. 8 p. (In Russian).
38. GOST 7668–80. Double lay rope type LK-RO, design 6×36(1+7+7/7+14)+1. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1982. 12 p. (In Russian).
39. GOST 32931–2015. Profile steel pipes for metal structures. Moscow, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2015. 81 p. (In Russian).
40. Shoshyn A. O., Dorozhko A. V., Štollmann V., Yarmolik S. V. Method for determining the parameters of the tower section of a cable yarding based on a tractor. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU],

issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 1 (252), pp. 155–164 (In Russian).

41. Permissible stresses. Available at: https://alexfl.pro/inform/inform_stali4.html (accessed 09.03.2024) (In Russian).

Информация об авторах

Шошин Артем Олегович – старший преподаватель кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Штолманн Владимир – кандидат технических наук, доцент кафедры лесозаготовок, логистики и мелиорации. Технический университет в Зволене (ул. Масарика, 24, 96001, г. Зволен, Словацкая Республика). E-mail: stollmannv@tuzvo.sk

Ярмолик Сергей Васильевич – старший преподаватель кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yarmolik@belstu.by, sv.ya@tut.by

Information about the authors

Shoshyn Artsiom Alegavich – Senior Lecturer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Štollmann Vladimir – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Forest Harvesting, Logistics and Soil/Land Ameliorations. Technical University in Zvolen (24 Masaryka str., 96001, Zvolen, Slovak Republic). E-mail: stollmannv@tuzvo.sk

Yarmolik Sergey Vasil'evich – Senior Lecturer, the Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yarmolik@belstu.by

Поступила 11.11.2024

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

WOODWORKING INDUSTRY

УДК 658.5

В. Э. Расолько, Е. В. Дубоделова
Белорусский государственный технологический университет

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ НА ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В статье охарактеризована динамика развития деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь, требующая улучшения технологий, кадрового и управленческого потенциала. В настоящее время подтверждается тот факт, что современные подходы в управлении, основанные на необходимости использования потенциала человеческих ресурсов, помогают предприятию быть конкурентоспособным. Система управления призвана обеспечить эффективную реализацию всех специальных и основных функций управления, и именно от ее состояния во многом зависит эффективность развития предприятия. Состояние системы управления, ее методы и средства влияют на структуру и величину затрат предприятия, объем производства и реализации продукции и, как следствие, на размер конечных финансовых результатов. Система управления во многом определяет уровень качества реализации всех процессов в организации, способность предприятия оперативно реагировать на изменения внешней и внутренней среды. Выявлены проблемные точки в развитии деревообрабатывающего предприятия и последствия, к которым они могут привести. Определены подходы для разработки методов внедрения системы управления на деревообрабатывающих предприятиях, на примере мебельных. Собрана первичная информация по предприятиям для работ над системой управления. Приведены выводы на основе исследования, показана логика выработки решения для внедрения практических действий на деревообрабатывающем предприятии.

Ключевые слова: деревообрабатывающее предприятие, система управления, мебельное предприятие, модель развития предприятия, эффективность развития предприятия.

Для цитирования: Расолько В. Э., Дубоделова Е. В. Методы и средства управления на деревообрабатывающих предприятиях // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 97–104.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-10.

V. E. Rasolko, E. V. Dubodelova
Belarusian State Technological University

METHODS AND MEANS OF MANAGEMENT AT WOODWORKING ENTERPRISES

The article characterizes the dynamics of development of woodworking enterprises of the Republic of Belarus, which requires improvement of technologies, human and managerial potential. Nowadays it is confirmed by the fact that modern approaches in management, based on the need to use the potential of human resources, help the enterprise to be competitive. The management system is designed to ensure the effective realization of all special and basic management functions, and it is from its state largely depends on the effectiveness of enterprise development. The state of the management system, its methods and means affect the structure and amount of costs of the enterprise, the volume of production and realization of products and, as a consequence, the size of the final financial results. The management system largely determines the level of quality of implementation of all processes in the organization, the ability of the enterprise to respond quickly to changes in the external and internal environment. Problem points in the development of woodworking enterprise and the consequences to which they can lead are revealed. Approaches for the development of methods of implementation of the management system at woodworking enterprises, on the example of furniture enterprises, are determined. The primary information on enterprises for works on the management system is collected. The conclusions on the basis of the research are given, the logic of working out a decision for implementation of practical actions at the woodworking enterprise is shown.

Keywords: woodworking enterprise, management system, furniture enterprise, enterprise development model, enterprise development efficiency.

For citation: Rasolko V. E., Dubodelova E. V. Methods and means of management at woodwork-
ing enterprises. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable
Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 97–104 (In Russian).
DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-10.

Введение. В настоящее время на деревооб-
рабатывающих и мебельных предприятиях ощу-
щается нехватка высококвалифицированных кад-
ров на всех уровнях иерархии. Чтобы разобраться
в этой проблеме, необходимо понять масштабы
работ в данном секторе [1, 2].

Статистические данные за 2023 г. показывают,
что к концу года лесхозы продали на экспорт более
955 м³ пиломатериалов. Это на 37,8% больше, чем в
2022 г. Министерство лесного хозяйства успеш-
но перенаправляет торговые потоки с западноевро-
пейского рынка на рынки дружественных стран [3].
С учетом мелких лесопилок функционирует более
2500 предприятий деревообработки, из них 100 круп-
ных предприятий, включающих 88 цехов глубо-
кой переработки и 12 мастерских. Деревообработ-
ка находится под защитой системы Министер-
ства лесного хозяйства и обеспечивает занятость
более 4,5 тыс. человек, проживающих преимуще-
ственно в малых городах и сельской местности [4].

Предложения к проекту Национальной стра-
тегии устойчивого развития Республики Беларусь
до 2040 г. предусматривают использование новых
технологий для глубокой переработки отече-
ственного древесного сырья. Также планируется спе-
циализация на производственных видах экспортной
продукции (деревянное домостроение, бумажная
продукция, гильзованный картон и мебель) [5].

Деревообрабатывающие предприятия оснаще-
ны оборудованием ведущих мировых производи-
телей, что позволяет им выпускать продукцию,
отвечающую самым высоким национальным и
международным требованиям и стандартам [6].

Ассортимент продукции ориентирован на им-
портозамещение и увеличение экспортного потен-
циала. Мебель белорусских производителей постав-
ляется в 38 стран мира, в том числе в Россию [7].
На техническое переоснащение предприятий го-
сударство инвестировало более 4 млрд долл. США.

В настоящее время белорусская деревообра-
батывающая промышленность обеспечивает ста-
бильное финансово-экономическое положение и
работает над модернизацией предприятий за счет
обучения персонала техническим, технологиче-
ским и инженерным квалификациям и установки
современного оборудования [8]. Ведь примене-
ние новых технологий тесно взаимодействует с
персоналом. Даже самое современное оборудо-
вание не будет работать эффективно и может вый-
ти из строя, если его неправильно использовать [9].

Большое внимание нужно уделить подготов-
ке и обучению новых сотрудников, «прокачива-
нию» навыков, адаптации, а специалистам ми-
рового класса предоставить возможность для
роста и продвижения [10].

Из полученной информации можно опреде-
лить следующую цель исследования: выявить
эффективные методы и средства управления для
деревообрабатывающих предприятий, которые по-
могут в организации персоналом, автоматизации
процессов производства и в дальнейшей их оп-
тимизации [11–13].

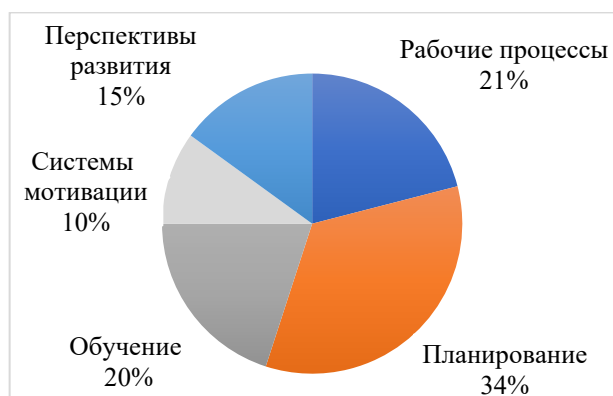
Основная часть. Современные подходы в
управлении отталкиваются от необходимости
максимально использовать потенциал челове-
ческих ресурсов. Опыт показывает, что инвести-
ции в сотрудников, создание необходимых усло-
вий для их профессионального развития и повы-
шения самостоятельности быстро обеспечивают
высокую отдачу от инвестиций [14–18]. Если ру-
ководство не признает, что каждый сотрудник –
это личность с уникальным опытом и запросами,
то способность организации достигать своих це-
лей ослабевает [19–22].

Современные организационные структуры
характеризуются гибкостью, меньшей иерархи-
чностью, значительной децентрализацией, низкой
формальностью и высокой вовлеченностью пер-
сонала. Новая модель управления неполностью
отвергает рационалистический подход. Для ме-
неджмента характерно сочетание «жесткого» ад-
министративного руководства и «гибкого» управ-
ления [23, 24].

При проведении аналитики в качестве объ-
ектов исследования выбраны несколько неболь-
ших мебельных предприятий. Выбор объектов
обусловлен несколькими причинами: социально-
экономической значимостью, технической, акту-
альностью развития данной сферы, сложностью
внутреннего содержания предприятия. В начале
исследования проведены интервью с руководи-
телями предприятий и собрана первичная ин-
формация о проблематике в данной отрасли. Про-
анализированы и выделены общие показатели,
которые можно выделить для всех предприятий.

Выявлено, что на предприятиях присутству-
ет неполная интеграция технологического про-
цесса, людей как специалистов и самого процес-
са работы всех подразделений (рисунок):

- 1) не стандартизированы проектные работы
(планирование) – 34%;
- 2) не полностью оцифрованы рабочие про-
цессы (например, регламенты работы) – 21%;
- 3) нет оцифрованной системы обучения
(сейчас в устной форме) новых специалистов для
введения в рабочие процессы – 20%;
- 4) нет проработанной системы мотивации
для сотрудников – 15%;
- 5) непонимание перспектив развития внут-
ри предприятия – 10%.



Основные критерии развития предприятия

Соотношения взяты и высчитаны в разрезе всех проблемных мест от показателя 100% и по убыванию (по приоритетности).

Следствием описанных выше проблем являются следующие факторы:

- 1) снижаются объемы продаж;
- 2) уменьшаются доходы предприятия, что влечет экономию в рабочих ресурсах;
- 3) возникают проблемы в планировании заказов, так как не оцифрованы и не просчитаны стандарты работы;
- 4) качество изготавливаемого изделия может ухудшаться от недостатка ресурсов (деньги, материалы, время);
- 5) используемое оборудование не обновляется в соответствии с новыми технологиями или не производится должное техническое обслуживание;
- 6) увеличиваются расходы предприятия, нет оптимизации.

Внедрение систем управления на деревообрабатывающих предприятиях зависит от его организационной структуры. Иными словами, она напрямую зависит от типа отношений «подчиненный – начальник» между структурными подразделениями предприятия и всеми сотрудниками. На современном этапе сформировались новые требования к деревообрабатывающему предприятию и наметилась тенденция перехода от иерархических структур к органическим с

гибкостью, адаптивностью, самоорганизацией персонала и инновациями.

Методы и средства эффективного управления должны быть основаны на совокупности экономических, финансовых и технологических показателей. Для их выявления нужно выделить основные направления для развития системы управления на деревообрабатывающем предприятии [25–30]. Организационный механизм развития системы управления на предприятиях может содержать концептуальную модель управления.

В представленном подходе выделяются три уровня задач (таблица). Задачи первого уровня предполагают стратегическую реализацию всех основных функций управления на предприятии. Для данного уровня важно учитывать расчет следующих показателей: количество и виды оборудования, последовательность технологического процесса, постоянство параметров, количество и квалификация специалистов. Задачи второго уровня направлены на конкретизацию решения задач первого уровня и предполагают реализацию всех специальных функций управления на предприятии в разрезе основных. Задачи третьего уровня состоят в эффективной реализации всех основных и специальных функций управления на предприятии.

При этом в качестве показателей эффективности рассматриваются конкретные параметры: своевременность реализации управленческой функции, скорость (время), результативность и экономичность [31]. Подход нацелен не на реализацию отдельных управленческих функций, а на эффективность развития предприятия [32–35].

Преимуществом данного подхода выступает стратегическая ориентация, что соответствует современным тенденциям развития в управлении деревообрабатывающими предприятиями [36–43].

Следующий этап для реализации предложенного подхода – выделение критических точек. Определены следующие критические точки: эффективная и целесообразная организационная структура, стратегическое согласование, высокое качество основной деятельности, свидетельство успеха, культура поддержки [44–50].

Основные задачи управления предприятием

Цель, методы и средства управления предприятием	Повышение качества деятельности предприятия через эффективное управление всеми системами
Задачи первого уровня	1. Планирование 2. Принятие стратегических решений 3. Учет 4. Контроль 5. Анализ и оценка 6. Корректировки 7. Стимулирование команды
Задачи второго уровня	Принятие тактических решений по вопросам реализации специальных функций управления: формирование, развитие деревообрабатывающего предприятия, оценка эффективности, обеспечение специализированной командой
Задачи третьего уровня	Своевременность, скорость, эффективность, экономичность решения задач управления в оперативном режиме

Заключение. Одной из самых сложных задач на деревообрабатывающих предприятиях такого типа является переход от уже существующих правил и процессов к практическому применению новых решений. По этой причине для использования предложенного в данной статье подхода системы управления нужно разработать еще алгоритм системы управления персоналом и организационной структурой.

В полученном подходе выделены критические точки эффективности, которые будут указывать, насколько точно функционируют применимые методы и средства управления и как они приживаются в рабочем процессе. Такие критические

точки нужно отслеживать и после изменения всей системы управления для поддержания подходящего уровня эффективности развития предприятия.

Для демонстрации экономического эффекта от использования предлагаемого подхода и технологии будут сделаны прогнозы изменения основных экономических показателей: оборот, расход, прибыль.

Для понимания результативности должно подтвердиться положительное влияние данного подхода. На основании изложенного можно утверждать, что использование современных методов и средств в управлении предприятием даст новые перспективы в развитии данной отрасли.

Список литературы

1. Казанцева П. И. Особенности функционирования предприятий деревообрабатывающей промышленности // Общественные и экономические науки в современных исследованиях: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 30 дек. 2021 г. Волгоград, 2021. С. 11–20.
2. Концерн «Беллесбумпром» // Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь. URL: <https://president.gov.by/ru/statebodies/koncernbellesbumprom> (дата обращения: 20.09.2024).
3. Добровольский А. А. Проблемы современного лесоводства. СПб.: ГЛТУ, 2016. 36 с.
4. Программа развития деревообрабатывающего и мебельного производства концерна «Беллесбумпром» на период до 2025 года. Минск: Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 2020. 42 с.
5. Предложения к проекту концепции Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года // НИЭИ М-ва экономики Респ. Беларусь. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/Kontseptsija-NSUR-2040.pdf> (дата обращения: 19.10.2024).
6. Чернышев О. Н., Уласовец В. Г. Проектирование деревообрабатывающих предприятий. СПб.: Лань, 2022. 376 с.
7. Деревообработка в Беларуси // Нац. агентство инвестиций и приватизации. URL: <https://investinbelarus.by/upload/medialibrary/ac2/aq82z6b3o3a1ij8c8n2zfo5enlwfnk2w/Derevoobrabotka-2023.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).
8. Деревообрабатывающая промышленность Беларуси: текущее состояние, проблемы и перспективы отрасли // Factories.by. URL: <https://factories.by/news/derevoobrabatyvayushaya-promyshlennost-belarusi-tekushee-sostoyanie-problemy-i-perspektivy> (дата обращения: 23.09.2024).
9. Мохов С. П., Протас П. А., Мисуню Ю. И. Комплексное использование древесного сырья. Минск: БГТУ, 2022. 265 с.
10. Одегов Ю. Г. Управление персоналом. М.: Финансы и статистика, 2006. 128 с.
11. Анисимов А. Ю., Бакиров М. Р. Система менеджмента как фактор развития предприятия // Экономика, предпринимательство и право. 2024. № 2. С. 229–238.
12. Фатхутдинов Р. А. Производственный менеджмент. СПб.: Питер, 2003. 491 с.
13. Кудряшов В. С., Кучина О. В. Производственный менеджмент. СПб.: Астерион, 2022. 208 с.
14. Трушков С. А., Шарапова Н. В. Управление персоналом в современных условиях // Экономические исследования и разработки. 2017. № 2. С. 77–86.
15. Корнюшин В. Ю. Основы управления персоналом. М.: МИЭМП, 2010. 237 с.
16. Варакулина М. В. Развитие системы управления персоналом в обеспечении эффективности функционирования предприятия: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Минск, 2016. 25 с.
17. Хекхаузен Х. Мотивация и деятельность. СПб.: Питер, 2021. 860 с.
18. Гибсон Джеймс Л. Организация: поведение, структура, процессы. М.: ИНФРА-М, 2015. 662 с.
19. Грэхем Х. Т. Управление человеческими ресурсами. М.: Юнити, 2023. 331 с.
20. Ильбульдин Т. Ю. Анализ потребности и разработка информационных систем для организации // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Челябинск, 4 фев. 2018 г. Челябинск, 2018. С. 31–34.
21. Магомедов Ш. Ш. Управление качеством продукции. М.: Дашков и К, 2016. 336 с.
22. Крюкова А. А. Инновационные подходы к мотивации персонала // Экономика и бизнес. 2017. № 2. С. 67–68.
23. Дьяченко Е. И., Лымарева О. А. Роль мотивации и стимулирования трудовой деятельности в системе управления персоналом современной организации // Символ науки. 2017. № 6. С. 171–175.

24. Мелешко А. В., Романова С. С. Информационные технологии в лесном комплексе. Автоматизированное проектирование технологических процессов деревообработки. Красноярск: СибГТУ, 2013. 25 с.
25. Древаль А. Н., Меньшиков Е. В., Верховская М. В. Основы управления на предприятии. Томск: Томский политехн. ун-т, 2019. 195 с.
26. Бочарова С. Ф. Анализ проблем в управлении качеством на современных промышленных предприятиях // Вестн. Саратов. гос. соц.-экон. ун-та. 2018. № 4. С. 73.
27. Копырина Т. О. Описание информационных процессов организации // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 8 дек. 2017 г. Уфа, 2017. С. 82–84.
28. Омельченко И. Н., Комарова С. Г., Лазарев С. В. Формирование системы менеджмента качества производства // Компетентность. 2018. № 7. С. 36–43.
29. Сапунова Т. А., Тонгуш В. В. Оценка эффективности системы менеджмента качества // Символ науки. 2016. № 11. С. 163–165.
30. Резанов В. К. Механизмы управления устойчивым развитием лесного комплекса. Владивосток: Дальнаука, 2015. 511 с.
31. Фатхутдинов Р. А. Стратегический менеджмент. М.: Дело, 2005. 448 с.
32. Приоров Г. Е. Некоторые особенности разработки стратегии на предприятиях деревообрабатывающей промышленности // Лесной вестник. 2018. № 2. С. 201–205.
33. Игнатович Л. В., Шетько С. В. Технология изделий из древесины. Проектирование производственного процесса. Минск: БГТУ, 2006. 130 с.
34. Стандарт организации. Система менеджмента качества: ГОСТ Р ИСО 9001–2015. М.: Стандартинформ, 2018. 38 с.
35. Мальцева А. П. Проектирование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств. Пермь: Прокрость, 2020. 40 с.
36. Кудрявцев Е. В. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2004. 320 с.
37. Шарапова В. М., Лагутина Е. Е., Шарапова Н. В. Оценка эффективности работы службы управления персоналом // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2017. № 3. С. 165–169.
38. Мелешко А. В. Автоматизированное проектирование технологических процессов отделки из древесины. Красноярск: СибГТУ, 2006. 203 с.
39. Шарапова В. М., Шарапова Н. В. Стимулирование трудовой деятельности: характеристика, основные понятия // Агропродовольственная политика России. 2016. № 11. С. 82–84.
40. Резанов В. К., Дюйзен Е. Ю. Стратегическое планирование устойчивого развития компании на основе ресурсно-рыночного подхода. Хабаровск, ТизГУ, 2015. 209 с.
41. Мелешко А. В. Разработка интегрированной информационной системы деревообрабатывающих производств // Деревообрабатывающая промышленность. 2002. № 6. С. 18–22.
42. Сулинов В. И. Проектирование деревообрабатывающего оборудования и инструментов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 139 с.
43. Чернышев А. Н., Послухаев М. А. Конструктивно-технологические аспекты изготовления изделий из переклейной древесины // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 58. С. 196–200.
44. Кудашов В. И., Рябоконт А. И. Инновационная активность как фактор повышения конкурентоспособности предприятий деревообрабатывающей промышленности Республики Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2017. № 1 (196). С. 175–179.
45. Шанин И. И. Развитие научно-методического подхода в направлении повышения уровня инновационной деятельности предприятий лесопромышленного комплекса // Теория и практика общественного развития. 2020. № 18. С. 180–186.
46. Акулович Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: ИНФРА-М, 2012. 487 с.
47. Пузикова М. В., Манмарев Д. В., Морковина С. С. Инструменты поддержки технологических инноваций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. № 3. С. 180–186.
48. Безрукова Т. Л., Шанин И. И., Кудяева Е. Ю. Развитие инноваций на предприятии // Успехи современного естествознания. 2015. № 1-3. С. 489–491.
49. Цифровые технологии в лесном секторе: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 18–19 февр. 2021 г. / отв. ред. А. А. Добровольский. СПб., 2021 г. С. 4–160.
50. Леонович О. К. Технология деревообработки. Минск: БГТУ, 2020. 470 с.

References

1. Kazantseva P. I. Features of functioning of enterprises of woodworking industry. *Obshchestvennyye i ekonomicheskiye nauki v sovremennykh issledovaniyakh: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Social and economic sciences in modern research: collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference]. Volgograd, 2021, pp. 11–20 (In Russian).
2. Concern “Bellesbumprom”. Available at: <https://president.gov.by/ru/statebodies/koncernbellesbumprom> (accessed: 20.09.2024) (In Russian).
3. Dobrovolsky A. A. *Problemy sovremennogo lesovodstva* [Problems of modern forestry]. St. Petersburg, GLTU Publ., 2016. 36 p. (In Russian).
4. *Programma razvitiya derevoobrabatyvayushchego i mebel'nogo proizvodstva kontserna “Bellesbumprom” na period do 2025 goda* [Program of development of woodworking and furniture production of the concern “Bellesbumprom” for the period up to 2025]. Minsk, National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus Publ., 2020. 42 p. (In Russian).
5. Proposals to the Draft Concept of the National Strategy of Sustainable Development of the Republic of Belarus for the period up to 2040. Available at: <https://economy.gov.by/uploads/files/Kontseptsija-NSUR-2040.pdf> (accessed: 19.10.2024) (In Russian).
6. Chernyshev O. N., Ulasovets V. G. *Proyektirovaniye derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy* [Designing of woodworking enterprises]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022. 376 p. (In Russian).
7. Woodworking in Belarus. Available at: <https://investinbelarus.by/upload/medialibrary/ac2/aq82z6b3o3a1ij8c8n2zfo5enlwfkn2w/Derevoobrabotka-2023.pdf> (accessed 15.10.2024) (In Russian).
8. Woodworking industry in Belarus: current state, problems and prospects of the industry. Available at: <https://factories.by/news/derevoobrabatyvayushchaya-promyshlennost-belarusi-tekushee-sostoyanie-problemy-i-perspektivy> (accessed 23.09.2024) (In Russian).
9. Mokhov S. P., Protas P. A., Misuno Yu. I. *Kompleksnoye ispol'zovaniye drevesnogo syr'ya* [Integrated utilization of wood raw materials]. Minsk, BSTU Publ., 2022. 265 p. (In Russian).
10. Odegov Yu. G. *Upravleniye personalom* [Personnel Management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2006. 128 p. (In Russian).
11. Anisimov A. Yu., Bakirov M. R. Management system as a factor of enterprise development. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo* [Economics, Entrepreneurship and Law], 2024, no. 2, pp. 229–238 (In Russian).
12. Fatkhutdinov R. A. *Proizvodstvennyy menedzhment* [Production management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2003. 491 p. (In Russian).
13. Kudryashov V. S., Kuchina O. V. *Proizvodstvennyy menedzhment* [Production management]. St. Petersburg, Asterion Publ., 2022. 208 p. (In Russian).
14. Trushkov S. A., Sharapova N. V. Personnel management in modern conditions. *Ekonomicheskiye issledovaniya i razrabotki* [Economic Research and Development], 2017, no. 2, pp. 77–86 (In Russian).
15. Korniyushin V. Yu. *Osnovy upravleniya personalom* [Fundamentals of personnel management]. Moscow, MIEMP Publ., 2010. 237 p. (In Russian).
16. Varakulina M. V. *Razvitiye sistemy upravleniya personalom v obespechenii effektivnosti funktsionirovaniya predpriyatiya. Aftoreferat dissertatsii kandidata ekonomicheskikh nauk* [Development of the personnel management system in ensuring the effectiveness of enterprise functioning. Abstract of thesis PhD (Economics)]. Minsk, 2016. 25 p. (In Russian).
17. Heckhausen H. *Motivatsiya i deyatel'nost'* [Motivation and activity]. St. Petersburg, Peter Publ., 2021. 860 p. (In Russian).
18. Gibson James L. *Organizatsiya: povedeniye, struktura, protsessy* [Organization: behavior, structure, processes]. Moscow, INFRA-M Publ., 2015. 662 p. (In Russian).
19. Graham H. T. *Upravleniye chelovecheskimi resursami* [Human resource management]. Moscow, Unity Publ., 2023. 331 p. (In Russian).
20. Ilbuldin T. Yu. Project approach to managing the development of information systems of industrial enterprises. *Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Automation: problems, ideas, solutions: proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Chelyabinsk, 2018, pp. 31–34 (In Russian).
21. Magomedov Sh. Sh. *Upravleniye kachestvom produktsii* [Product quality management]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2016. 336 p. (In Russian).
22. Kryukova A. A. Innovative approaches to personnel motivation. *Ekonomika i biznes* [Economics and Business], 2017, no. 2, pp. 67–68 (In Russian).
23. Dyachenko E. I., Lymareva O. A. The role of motivation and stimulation of labor activity in the personnel management system of a modern organization. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2017, no. 6, pp. 171–175 (In Russian).

24. Meleshko A. V., Romanova S. S. *Informatsionnyye tekhnologii v lesnom komplekse. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov derevoobrabotki* [Information technologies in the forestry complex. Automated design of woodworking technological processes]. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2013. 25 p. (In Russian).
25. Dreval A. N., Menshikov E. V., Verkhovskaya M. V. *Osnovy upravleniya na predpriyatii* [Fundamentals of enterprise management]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet Publ., 2019. 195 p. (In Russian).
26. Bocharova S. F. Analysis of problems in quality management at modern industrial enterprises. *Vestnik SGSEU* [Bulletin of Saratov State Socio-Economic University], 2018, no. 4, p. 73 (In Russian).
27. Kopyrina T. O. Description of information processes of the organization. *Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Automation: problems, ideas, solutions: materials of the International scientific and practical conference]. Ufa, 2017, pp. 82–84 (In Russian).
28. Omelchenko I. N., Komarova S. G., Lazarev S. V. Formation of a production quality management system. *Kompetentnost'* [Competence], 2018, no. 7, pp. 36–43 (In Russian).
29. Sapunova T. A., Tongush V. V. Evaluation of the effectiveness of quality management system. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2016, no. 11, pp. 163–165 (In Russian).
30. Rezanov V. K. *Mekhanizmy upravleniya ustoychivym razvitiem lesnogo kompleksa* [Mechanisms for managing the sustainable development of the forestry complex]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2015. 511 p. (In Russian).
31. Fatkhutdinov R. A. *Strategicheskii menedzhment* [Strategic Management]. Moscow, Delo Publ., 2005. 448 p. (In Russian).
32. Priorov G. E. Some features of strategy development at the enterprises of the woodworking industry. *Lesnoy vestnik* [Forest Bulletin], 2018, no. 2, pp. 201–205 (In Russian).
33. Ignatovich L. V., Shetko S. V. *Tekhnologiya izdeliy iz drevesiny. Proyektirovaniye proizvodstvennogo protsessa* [Technology of wood products. Manufacturing process design]. Minsk, BSTU Publ., 2006. 130 p. (In Russian).
34. GOST R ISO 9001–2015. Standard of the organization. Quality management system. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 38 p. (In Russian).
35. Maltseva A. P. *Proyektirovaniye lesozagotovitel'nykh i derevoobrabatyvayushchikh proizvodstv* [Designing of logging and woodworking industries]. Perm, Prokrost' Publ., 2020. 40 p. (In Russian).
36. Kudryavtsev E. V. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem* [GPSS World. Fundamentals of simulation modeling of various systems]. Moscow, DMK Press Publ., 2004. 320 p. (In Russian).
37. Sharapova V. M., Lagutina E. E., Sharapova N. V. Evaluation of the effectiveness of the personnel management service. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* [Competitiveness in the global world: economics, science, technology], 2017, no. 3, pp. 165–169 (In Russian).
38. Meleshko A. V. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov otdelki iz drevesiny* [Automated design of technological processes of wood finishing]. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2006. 203 p. (In Russian).
39. Sharapova V. M., Sharapova N. V. Stimulating work activity: characteristics, basic concepts. *Agrorodovol'stvennaya politika Rossii* [Agricultural policy of Russia], 2016, no. 11, pp. 82–84 (In Russian).
40. Rezanov V. K., Dyuyzen E. Yu. *Strategicheskoye planirovaniye ustoychivogo razvitiya kompanii na osnove resursno-rynochnogo podkhoda* [Strategic planning of sustainable development of the company on the basis of resource-market approach]. Khabarovsk, TikhGU Publ., 2015. 209 p. (In Russian).
41. Meleshko A. V. Development of an integrated information system for woodworking production. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2002, no. 6, pp. 18–22 (In Russian).
42. Sulinov V. I. *Proyektirovaniye derevoobrabatyvayushchego oborudovaniya i instrumentov* [Design of woodworking equipment and tools]. Ekaterinburg, UGLTU Publ., 2016. 139 p. (In Russian).
43. Chernyshev A. N., Poslukhaev M. A. Constructive and technological aspects of manufacturing products from glued wood. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of forest complex], 2020, no. 58, pp. 196–200 (In Russian).
44. Kudashov V. I., Ryabokon A. I. Innovation activity as a factor of increasing the competitiveness of woodworking industry enterprises of the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 5, Economics and Management, 2017, no. 1 (196), pp. 175–179 (In Russian).
45. Shanin I. I. Development of scientific and methodological approach in the direction of increasing the level of innovation activity of enterprises of forestry complex. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya* [Theory and practice of social development], 2020, no. 18, pp. 180–186 (In Russian).
46. Akulovich L. M. *Osnovy avtomatizirovannogo proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroyenii* [Fundamentals of automated design of technological processes in mechanical engineering]. Moscow, INFRA-M Publ., 2012. 487 p. (In Russian).

47. Puzikova M. V., Manmarev D. V., Morkovina S. S. Tools to support technological innovation. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2019, no. 3, pp. 180–186 (In Russian).
48. Bezrukova T. L., Shanin I. I., Kudaeva E. Yu. Development of innovations at the enterprise. *Uspekhi sovremennoy yestestvoznaniya* [Advanced of modern natural science], 2015, no. 1-3, pp. 489–491 (In Russian).
49. *Tsifrovyye tekhnologii v lesnom sektore: materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Digital technologies in the forest sector: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2021. 160 p. (In Russian).
50. Leonovich O. K. *Tekhnologiya derevoobrabotki* [Technology of woodworking]. Minsk, BSTU Publ., 2020. 470 p. (In Russian).

Информация об авторах

Расолько Вероника Эдуардовна – аспирант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: grigorovichveron@gmail.com

Дубоделова Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dubodelovaev@belstu.by

Information about the authors

Rasolko Veronika Eduardovna – PhD student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grigorovichveron@gmail.com

Dubodelova Ekaterina Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dubodelovaev@belstu.by

Поступила 24.10.2024

УДК 674.8

Ч. Патко¹, З. Пастори², И. К. Божелко³, О. В. Мелешко², М. Туфа²¹Будапештский университет технологии и экономики, Венгрия²Университет Шопрона, Венгрия³Белорусский государственный технологический университет**ДРЕВЕСИНА КАК СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ
С НИЗКИМ УРОВНЕМ ВЫБРОСОВ**

Рост массового производства синтетических строительных материалов для энергоэффективных зданий приводит к риску накопления вредных веществ в помещениях. Целью данного исследования является оценка древесины как строительного материала с низким уровнем выбросов летучих органических соединений (ЛОС) и формальдегида. Испытания проводились в энергоэффективном доме с деревянным каркасом, где измеряли концентрации вредных веществ в течение зимних и летних периодов. Основное внимание уделялось влиянию температуры, влажности, вентиляции и мебели на качество воздуха. Концентрация формальдегида варьировалась в пределах 5–55 мкг/м³ и лишь в одном случае превысила допустимый порог, что объяснялось внесением в помещение распиленных древесных строительных материалов. Уровни общего содержания ЛОС изменялись под воздействием факторов окружающей среды, но оставались в рамках международных норм. Работа опирается на данные предыдущих исследований, подчеркивая влияние температуры и влажности на выбросы вредных веществ из строительных материалов, в число которых входит и древесина. Применение таких технологий, как обработка материалов при высоких температурах, добавление поглотителей и использование экологических клеев, способствует снижению уровня эмиссии. В исследовании также анализируются методы улучшения качества воздуха, включающие повышение уровня вентиляции и использование материалов с низким содержанием формальдегида. Результаты подтверждают, что деревянные конструкции безопасны для жилых зданий и способствуют созданию комфортной и экологически чистой среды. Исследование представляет интерес для проектировщиков и строителей, выбирающих материалы для энергоэффективного строительства. Практическая значимость данной публикации заключается в предоставлении рекомендаций по снижению влияния строительных материалов на качество воздуха, что способствует улучшению здоровья и благополучия пользователей.

Ключевые слова: экологичные строительные материалы, деревянные конструкции, качество воздуха в помещениях, формальдегид, летучие органические соединения (ЛОС), энергоэффективное строительство.

Для цитирования: Патко Ч., Пастори З., Божелко И. К., Мелешко О. В., Туфа М. Древесина как строительный материал с низким уровнем выбросов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 105–113.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-11.

Cs. Patko¹, Z. Pásztor², I. Bazhelka³, V. Mialeshka², M. Tufa²¹Budapest University of Technology and Economics (Hungary)²University of Sopron (Hungary)³Belarusian State Technological University**WOOD AS A LOW EMISSION BUILDING MATERIAL**

The growth of mass production of synthetic building materials for energy-efficient buildings leads to the risk of harmful substances accumulating indoors. This study aims to evaluate wood as a building material with low emissions of volatile organic compounds (VOC) and formaldehyde. The tests were conducted in an energy-efficient timber-frame house, where concentrations of harmful substances were measured during winter and summer periods. The study focused on the impact of temperature, humidity, ventilation, and furniture on air quality. Formaldehyde concentrations ranged from 5 to 55 µg/m³, with only one instance exceeding the permissible threshold, attributed to the introduction of cut wooden construction materials into the room. Total VOC levels varied depending on environmental factors but remained within international standards. The study builds on previous research, highlighting the influence of temperature and humidity on the emissions of harmful substances from building materials, including wood. Technologies such as high-temperature treatment of materials, the addition of absorbents, and the use of eco-friendly adhesives were found to reduce emissions. The research also examines methods to improve air quality, including enhancing ventilation and using materials with low formaldehyde content.

The findings confirm that wooden structures are safe for residential buildings and contribute to a comfortable and environmentally friendly indoor environment. This research is of interest to designers and builders selecting materials for energy-efficient construction. The practical significance lies in providing recommendations to minimize the impact of building materials on indoor air quality, thereby promoting the health and well-being of occupants.

Keywords: eco-friendly building materials, wooden structures, indoor air quality, formaldehyde, volatile organic compounds (VOC), energy-efficient construction.

For citation: Patko Cs., Pásztori Z., Bazhelka I., Mialeshka V., Tufa M. Wood as a low emission building material. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 105–113 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-11.

Введение. Глобальное изменение климата и рост энергопотребления привели к созданию энергосберегающих зданий с очень низким коэффициентом воздухообмена. Из-за дешевого массового производства наиболее распространенными строительными материалами являются синтетические материалы. Дома становятся все более удобными и автоматизированными, но остается вопрос: обеспечивают ли эти технические улучшения здоровое жизненное пространство для людей?

Согласно NHAPS (Национальное исследование моделей человеческой деятельности), человек проводит около 90% жизни внутри зданий [1]. Исследователи в области охраны окружающей среды интенсивно изучают качество воздуха в помещениях новых, существующих и переоборудованных домов [2, 3]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, вредные вещества классифицируют по источникам их выбросов. Комитет по оценке строительной продукции в области охраны здоровья впервые определил ЛОС (летучие органические соединения), выделяемые строительными материалами в 2000 г. Сейчас можно определить около 200 различных ЛОС [4]. ЛОС могут вызывать различные заболевания, которые снижают качество жизни и работоспособность людей. Это накладывает финансовую нагрузку на здравоохранение и общество, что требует более строгого контроля качества воздуха внутри зданий [5].

При правильном выборе строительных материалов и технологий можно избежать источников вредных химических веществ. Так, древесина является одним из наиболее экологически чистых видов сырья [6–8]. Однако изделия из конструкционной древесины содержат химические вещества в виде клеев или средств для обработки поверхности, которые выделяют ЛОС [9, 10].

С.-Ю. Ван и другие авторы в своей работе измерили выбросы ЛОС древесностружечной плиты с использованием полимерных 4,4-метилендифенилизоцианата (МДИ) и фенолформальдегидных смол. МДИ – один из наиболее используемых ароматических изоцианатов в мире, применяемых для производства клея. Ежегодно производится

5 млн т МДИ. Полимерная смесь МДИ не представляет риска для здоровья, но может вызывать раздражение [11]. Хотя добавление МДИ в карбамидоформальдегидную смолу (КФС) снижает выделение формальдегида из фанеры [12]. В качестве экологичной альтернативы для склейки инженерной древесины вместо КФС использовали танин – один из наиболее изученных видов сырья как в академических кругах, так и в промышленности для синтеза биоклеев для древесины. Однако характеристики смол на основе танина необходимо улучшать с помощью сшивающих агентов [13]. В работе С. Кима был применен натуральный танин в качестве клея в производстве паркетной доски. Для увеличения прочности связи танина добавляли поливинилацетат (ПВА), дополнительно нанося отверждаемое УФ-излучением покрытие, содержащее уретанакрилат, что привело к значительному снижению выбросов формальдегида [14].

Вулканический пепел (пуццолан) – еще один материал, который добавляют в древесные композиты в качестве поглотителя, снижающего выбросы формальдегида [15]. В новом деревянном доме концентрацию вредных веществ можно снизить с помощью процесса «запекания». Температуру внутри помещения повышали до 32–40°C и поддерживали в течение недели. Это позволило снизить уровень вредных химических веществ в воздухе помещений на 60–90% [16].

Лиственные породы выделяют высокие концентрации уксусной и муравьиной кислот, а хвойные породы выделяют больше терпенов: альфа-пинен, 3-карен и т. д. [17]. Для досок из хвойных пород сушка древесины в печи снижает выбросы ЛОС на 80–93% [18]. Термически обработанная древесина выделяет больше таких ЛОС-компонентов, как фурфурол и фенол, чем необработанная [19]. После вакуумной тепловой обработки общее количество выделяемых ЛОС увеличивается [20].

В рамках данного исследования проведены замеры качества воздуха в новом построенном пассивном деревянном каркасном доме, представлены концентрации ЛОС и формальдегида,

а также рассмотрены данные и выводы других исследований относительно факторов, влияющих на концентрацию ЛОС.

Основная часть. Измерения проводились в тестовом доме, построенном совместно Университетом Шопрона и Ubrankovics Kft в деревне Агфалва (Венгрия) на разных этапах строительного процесса. Для исследований не требовалась никакая специальная подготовка и не надо было нарушать стандартный строительный процесс. Использовалось оборудование Tenax TA (200 мг), выполненное из нержавеющей стали и заполненное высокочувствительными абсорбирующими гранулами. Перед измерениями здание находилось в состоянии покоя не менее 12 ч, без проведения какой-либо рабочей деятельности. Во время измерений запрещена любая трудовая активность и вентиляция. С помощью насоса с точной регулировкой через оборудование пропусклось 100 мл воздуха в течение 60 мин, что составило общий объем 6000 мл. Измерения проводились в соответствии со стандартом ISO 16000-6:2004 в компетентной и аккредитованной лаборатории Wessling, расположенной в Будапеште.

В течение года было проведено 6 измерений (рис. 1). Значения общего содержания летучих органических соединений (ОЛОС) получены путем суммирования отдельно измеренных ЛОС (бензол, толуол, стирол, формальдегид, нафталин, лимонен, альфа-пинен).

Согласно полученным данным, на изменение концентраций ОЛОС влияли температура, относительная влажность в помещении, вентиляция и меблирование. После первого измерения в январе, несмотря на включение подогрева воздуха (отопительный сезон), температура в

помещении не повысилась, что, вероятно, стало причиной снижения значений ОЛОС. Перед четвертым измерением в марте было включено напольное отопление, и температура в помещении поднялась до 21°C, что, предположительно, вызвало рост концентраций ОЛОС. В июне температура в помещении превысила 24°C, что привело к еще большим изменениям концентраций ОЛОС, к тому же на их уровень могла повлиять меблировка комнат в этот период. В июле частое естественное проветривание, вероятно, способствовало снижению высоких концентраций ОЛОС.

На рис. 2 отображены концентрации свободного формальдегида в помещениях.

Во время проведения измерений в феврале концентрация формальдегида в одной из комнат составила 130 мкг/м³, что превысило установленное ВОЗ допустимое значение в 100 мкг/м³. Однако это превышение зафиксировано лишь 1 раз. Причиной могли стать находящиеся в гостиной деревянные материалы, разрезанные на куски. В весенне-летний период концентрация формальдегида оставалась умеренной (15–30 мкг/м³), даже при увеличении температуры и влажности. Влияние температуры и влажности на выбросы формальдегида не является линейным, а их уровень, вероятно, зависит от дополнительных факторов, таких как материалы и вентиляция помещений.

Другие исследования и обсуждение. Выводы данного исследования о влиянии различных факторов, таких как температура, влажность, вентиляция и меблировка, на концентрацию ЛОС и формальдегида в помещении нового каркасного дома соотнесены с выводами исследований других авторов.

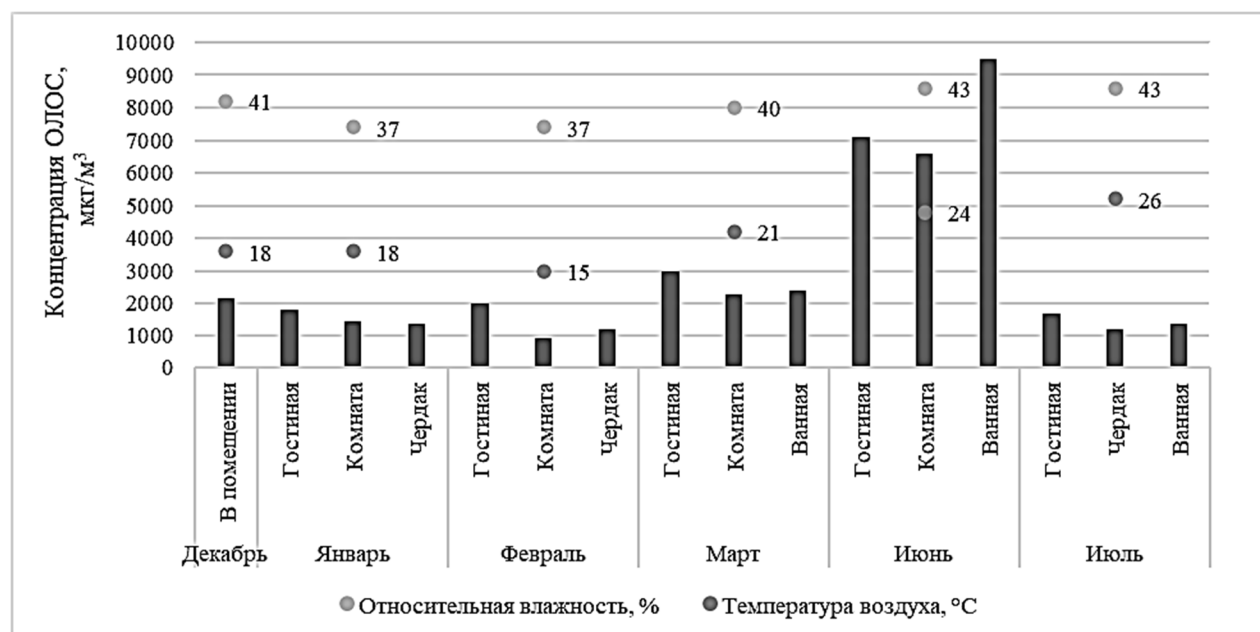


Рис. 1. Общее количество летучих органических соединений согласно проведенным измерениям

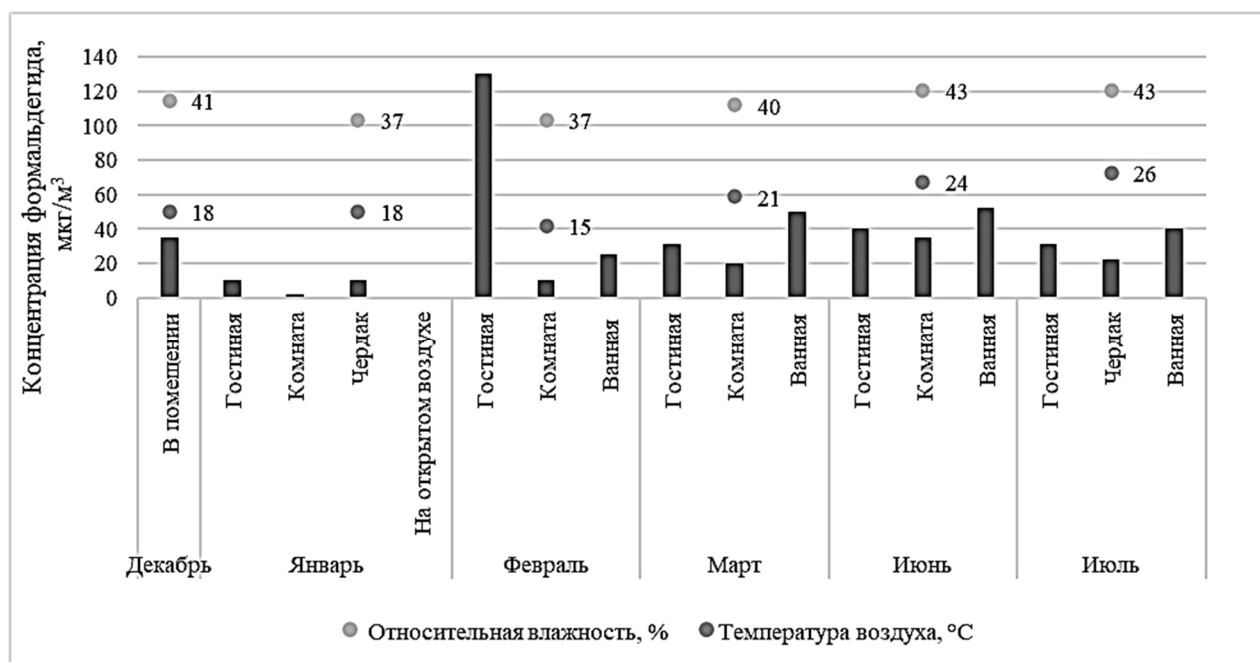


Рис. 2. Концентрация формальдегида в проводимых измерениях

Ю.-К. Ли и соавторы исследовали влияние температуры на уровень формальдегида и выбросов ЛОС из деревянных напольных покрытий. В ходе их работы было установлено, что при температуре 35°C концентрации ЛОС и формальдегида увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению с температурой 25°C [21].

Ш. Хуанг и коллеги обнаружили, что медианная концентрация формальдегида в помещениях после ремонта, проводившегося в городах Китая в период с 2002 по 2015 г., составляла 125 мкг/м³, что превышает рекомендованный ВОЗ порог в 100 мкг/м³. На эти показатели значительно влияли сезонные колебания температуры, особенно в зимний и летний периоды [22]. В. Лян и соавторы изучали выбросы формальдегида из древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) в условиях полномасштабной экспериментальной комнаты. Они выявили, что максимальная концентрация формальдегида наблюдалась в летний период, когда температурные условия способствовали увеличению выбросов, и была приблизительно в 20 раз выше по сравнению с зимними показателями. Это различие объясняется изменениями температуры и влажности в помещении [23]. Таким образом, предыдущие исследования подтверждают значительное влияние температуры на выбросы формальдегида и ЛОС в помещениях. В нашем исследовании концентрации ОЛОС действительно изменялись в летние и зимние месяцы, после повышения температуры воздуха в помещении, во время отопительного сезона. Наряду с другими факторами, температура, вероятно, сыграла основную роль в увеличении концентраций ОЛОС в помещении.

Влажность является одним из ключевых факторов окружающей среды, оказывающих влияние на скорость эмиссии и основные параметры выделения формальдегида и ЛОС из строительных материалов. Экспериментальные данные С. Хуанга и соавторов [24] показали, что при увеличении абсолютной влажности от 4,6 до 19,6 г/м³ концентрация формальдегида, выделяемого древесноволокнистыми плитами средней плотности, увеличивалась в 10 раз. Кроме того, установлена корреляция, описывающая зависимость между скоростью эмиссии и относительной влажностью. Зависимость между влажностью и начальной концентрацией ЛОС также была подтверждена другими исследованиями, как указано в обзорной статье [25]. Согласно этим данным, начальная концентрация выбросов ЛОС увеличивается с ростом влажности, однако влияние влажности на коэффициент диффузии признано незначительным. В нашем исследовании снижение влажности наблюдалось в феврале, а увеличение в летние месяцы. Концентрации ОЛОС уменьшались и увеличивались в эти периоды соответственно. Однако на концентрацию ЛОС также влияли и другие факторы, такие как температура и меблировка помещений.

Мебель выделяет различные ЛОС и формальдегид в воздух, и этот процесс усиливается при повышении температуры, что могло служить дополнительным фактором роста концентрации [26].

В исследовании Д. Кампаноло и соавторов показано, что основные внутренние источники ЛОС и формальдегида связаны со строительными материалами, такими как ковры, напольные покрытия, краски и древесные материалы [27].

Также в исследовании С. Ви и соавторов, проводимом на протяжении 13 лет, проанализированы выбросы ЛОС и формальдегида из строительных материалов. Обои на основе бумаги и древесных волокон показали низкий уровень эмиссии по сравнению с виниловыми обоями. Напольные покрытия, сделанные из древесины, также имели более низкие показатели выбросов ОЛОС и формальдегида [28].

Влияние вентиляции на концентрацию ЛОС в помещении неоднозначно. Ф. Карон и др. [29] в своей работе показали, что скорость вентиляции может существенно влиять на поведение отдельных веществ. Например, выброс формальдегида увеличился с 214,6 до 274,2 мкг/м²·ч при повышении скорости обмена воздуха с 2,5 до 5,5 раза в час. Это связано с тем, что формальдегид обладает более высокими коэффициентами распределения и диффузии по сравнению с другими соединениями. Данное исследование проводилось в лабораторных условиях в камере.

В реальных условиях жильцы могут регулировать естественную вентиляцию, открывая окна и двери, что также влияет на концентрацию ЛОС в помещении. При отсутствии механической вентиляции концентрации ОЛОС в контрольных и тестовых спальнях были на 90 и 74% выше соответственно [30].

В исследовании М. Туомайнена и соавторов [31] изучалось качество воздуха в домах, построенных по финским стандартам внутреннего климата, строительных и отделочных материалов. Система вентиляции работала на полную мощность в течение недели после завершения установки и до заселения жильцов. Измерения проводились до заселения и через 5 месяцев. Результаты показали, что качество воздуха в зданиях с усиленной вентиляцией было выше в том числе и за счет использования материалов с низким уровнем выбросов и контроля влажности. Наибольшие различия обнаружены в уровнях ОЛОС и аммиака.

Исследование В. Го и соавторов [32] показало, что при выборе строительных материалов с низким уровнем выбросов и обеспечении максимальной вентиляции концентрации ЛОС в помещении были в пределах от 0 до 43 мкг/м³. Это говорит о том, что предотвращение загрязнения и тщательный расчет норм вентиляции могут значительно улучшить качество воздуха в помещении.

Х. Джарнстрем и соавторы [33] измеряли концентрации ЛОС, формальдегида и аммиака, а также

параметры воздуха, такие как температуру, влажность и скорость обмена воздуха, сразу после завершения строительства через 6 и 12 месяцев. Было обнаружено 240 ЛОС, из которых наибольшие концентрации имели ксилол и альфа-пинен. Концентрации ОЛОС значительно снизились через 6 месяцев. Концентрации формальдегида и аммиака имели сезонные колебания с более высокими значениями летом.

Для прогнозирования долгосрочных выбросов формальдегида Ч. Хе и соавторы [34] разработали улучшенную модель на основе механизма, учитывающего химические реакции, такие как гидролиз, в процессе выделения формальдегида. Модель продемонстрировала свою эффективность в прогнозировании выбросов формальдегида из древесностружечных плит и мебели, что может быть полезным для оценки долгосрочного воздействия на здоровье человека.

При планировании строительства и выборе строительных материалов необходимо учитывать нормы воздействия вредных веществ, которые различаются в зависимости от страны, а также методы измерений. Для более точного выбора материалов требуется дальнейшее исследование.

Заключение. В рамках настоящего исследования проводились измерения концентраций ЛОС и формальдегида в новом каркасном деревянном доме на протяжении 6 месяцев. Выявлены ключевые факторы, такие как температура, влажность, вентиляция и меблировка, которые оказывают влияние на уровень ЛОС и формальдегида. Результаты показали, что меблировка и температура оказывают наибольшее влияние на концентрации этих веществ. При этом их уровни остаются ниже международных норм, действующих в Венгрии и Беларуси.

Таким образом, можно заключить, что деревянные строительные материалы и элементы интерьера обладают низким уровнем выбросов и не представляют значительной угрозы для здоровья пользователей. Настоящее исследование предоставляет важные данные для дальнейшего изучения факторов, влияющих на качество воздуха в помещениях. Полученные результаты могут быть полезны проектировщикам и строителям при выборе строительных материалов с низким уровнем выбросов ЛОС, таких как древесина, что будет способствовать улучшению экологической безопасности и качества воздуха в жилых зданиях.

Список литературы

1. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants / N. Klepeis [et al.] // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2001. Vol. 11. P. 231–252. DOI: 10.1038/sj.jea.7500165.
2. Evaluation and analysis of volatile organic compounds and formaldehyde emission of building products in accordance with legal standards: A statistical experimental study / S. Wi [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 393, 122381. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122381.

3. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. Formaldehyde in the indoor environment // *Chemical Reviews*. 2010. Vol. 11. P. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
4. AgBB. Updated list of LCI values 2020 in the annex, Evaluation procedure for VOC emissions from building products. June 2021. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/dokumente/agbb_evaluation_scheme_2021.pdf (accessed 27.09.2024).
5. Exposure to volatile organic compounds in offices and in residential and educational buildings in the European Union between 2010 and 2023: A systematic review and health risk assessment / L. Pál [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 945, 173965. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173965.
6. Molnár S. Erdő-fa hasznosítás Magyarországon. Sopron: NyME Erdészeti Tudományos Intézet, 2005. 390 p.
7. Bertheau E., Simon V., Delgado Raynaud C. Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) as Safety Indicators in the Development of Wood-Based Binderless Boards // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 3, 1266. DOI: 10.3390/app14031266.
8. Petersen A., Solberg B. Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden // *Forest Policy and Economics*. 2005. Vol. 7. P. 249–259. DOI: 10.1016/S1389-9341(03)00063-7.
9. Guo H., Murray F., Lee S.-C. Emissions of total volatile organic compounds from pressed wood products in an environmental chamber // *Building and Environment*. 2002. Vol. 37. P. 1117–1126. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00107-X.
10. Sung N., Lee S.-M., Min Y. Decreasing the formaldehyde concentration in indoor air by improving the adhesives used in engineered wood materials in Korean apartment buildings // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2012. Vol. 27, no. 5–6. P. 671–682. DOI: 10.1080/01694243.2012.690659.
11. Properties of low-formaldehyde-emission particleboard made from recycled wood-waste chips sprayed with PMDI/PF resin / S.-Y. Wang [et al.] // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. P. 2472–2479. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.009.
12. Sahoo S. C., Sil A., Dutta A. Synthesis and properties study of the urea-formaldehyde resin modified with PMDI used for manufacturing of wood composite products // *European Chemical Bulletin*. 2023. Vol. 12, no. 10. P. 9875–9880. DOI: 10.48047/ecb/2023.12.10.699.
13. Tannin-based wood panel adhesives / S. Oktay [et al.] // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024. Vol. 130, 103621. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103621.
14. Kim S. Environment-friendly adhesives for surface bonding of wood-based flooring using natural tannin to reduce formaldehyde and TVOC emission // *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. P. 744–748. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.06.062.
15. Kim S. The reduction of indoor air pollutant from wood-based composite by adding pozzolan for building materials // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. P. 2319–2323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.008.
16. Test methods and reduction of organic pollutant compound emissions from wood-based building and furniture materials / S. Kim [et al.] // *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.059.
17. Emission of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood / M. Risholm-Sundman [et al.] // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1998. Vol. 56. P. 125–129.
18. Volatile organic compounds emitted from Scots pine and Norway spruce wood / M. Kovačević [et al.] // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2023. Vol. 81. P. 699–712. DOI: 10.1007/s00107-022-01909-0.
19. Čech P. Comparison of VOC Emissions from Natural Wood and Heat Treated Wood // *Drvna industrija*. 2018. Vol. 69, no. 4. DOI: 10.5552/drind.2018.
20. Color change and emission of volatile organic compounds from Scots pine exposed to heat and vacuum-heat treatment / H. Sivrikaya [et al.] // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 26, 100918. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100918
21. Lee Y.-K., Kim H.-J. The effect of temperature on VOCs and carbonyl compounds emission from wooden flooring by thermal extractor test method // *Building and Environment*. 2012. Vol. 53. P. 95–99. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.016.
22. Indoor formaldehyde concentrations in urban China: Preliminary study of some important influencing factors / S. Huang [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 590–591. P. 394–405. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.187.
23. Liang W., Yang S., Yang X. Long-Term Formaldehyde Emissions from Medium-Density Fiberboard in a Full-Scale Experimental Room: Emission Characteristics and the Effects of Temperature and Humidity // *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49, no. 17. P. 10349–10356. DOI: 10.1021/acs.est.5b02217.
24. Influence of humidity on the initial emittable concentration of formaldehyde and hexaldehyde in building materials: experimental observation and correlation / S. Huang [et al.] // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, 23388. DOI: 10.1038/srep23388.

25. Zhu Y., Guo S., Liang W. A literature review investigating the impact of temperature and humidity on volatile organic compound emissions from building materials // *Building and Environment*. 2024. Vol. 262, 111845. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2024.111845.
26. Measurement of the key parameters of VOC emissions from wooden furniture, and the impact of temperature / Y. Wang [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 259, 118510. DOI: 10.1016/J.ATMOSENV.2021.118510.
27. VOCs and aldehydes source identification in European office buildings – The OFFICAIR study / D. Campagnolo [et al.] // *Building and Environment*. 2017. Vol. 115. P. 18–24. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.01.009.
28. Evaluation and analysis of volatile organic compounds and formaldehyde emission of building products in accordance with legal standards: A statistical experimental study / S. Wi [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393, 122381. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122381.
29. Behaviour of individual VOCs in indoor environments: How ventilation affects emission from materials / F. Caron [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 243, 117713. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117713.
30. The effect of ventilation on volatile organic compounds produced by new furnishings in residential buildings / G. Hernandez [et al.] // *Atmospheric Environment X*. 2020. Vol. 6, 100069. DOI: 10.1016/J.AEAOA.2020.100069.
31. Usefulness of the Finnish classification of indoor climate, construction and finishing materials: comparison of indoor climate between two new blocks of flats in Finland / M. Tuomainen [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2001. Vol. 35. P. 305–313. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00157-6.
32. Guo H., Murray F., Lee S. C. The development of low volatile organic compound emission house – a case study // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38, issue 12. P. 1413–1422. DOI: 10.1016/S0360-1323(03)00156-2.
33. Reference values for indoor air pollution concentrations in new residential buildings in Finland / H. Järnström [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40. P. 7178–7191. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.021.
34. An improved mechanism-based model for predicting the long-term formaldehyde emissions from composite wood products with exposed edges and seams / Z. He [et al.] // *Environment International*. 2019. Vol. 132, 105086. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105086.

References

1. Klepeis N. E., Nelson W. C., Ott W. R., Robinson J. P., Tsang A. M., Switzer P., Behar J. V., Hern S. C., Engelmann W. H. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2001, vol. 11, pp. 231–252. DOI: 10.1038/sj.jea.7500165.
2. Wi S., Kim M. G., Myung S. W., Baik Y. K., Lee K. B., Song H. S., Kwak M. J., Kim S. Evaluation and analysis of volatile organic compounds and formaldehyde emission of building products in accordance with legal standards: A statistical experimental study. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 393, 122381. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122381.
3. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 2010, vol. 110, pp. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
4. AgBB. Updated list of LCI values 2020 in the annex, Evaluation procedure for VOC emissions from building products. June 2021. Available at https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/dokumente/agbb_evaluation_scheme_2021.pdf (accessed 27.09.2024).
5. Pál L., Lovas S., McKee M., Diószegi J., Kovács N., Szűcs S. Exposure to volatile organic compounds in offices and in residential and educational buildings in the European Union between 2010 and 2023: A systematic review and health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 945, 173965. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2024.173965.
6. Molnár S. Erdő-fa hasznosítás Magyarországon. Sopron, NyME Erdészeti Tudományos Intézet, 2005. 390 p.
7. Bertheau E., Simon V., Delgado Raynaud C. Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) as Safety Indicators in the Development of Wood-Based Binderless Boards. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 3, 1266. DOI: 10.3390/app14031266.
8. Petersen A., Solberg B. Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics*, 2005, vol. 7, pp. 249–259. DOI: 10.1016/S1389-9341(03)00063-7.
9. Guo H., Murray F., Lee S.-C. Emissions of total volatile organic compounds from pressed wood products in an environmental chamber. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, pp. 1117–1126. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00107-X.

10. Sung N., Lee S. M., Min Y. Decreasing the formaldehyde concentration in indoor air by improving the adhesives used in engineered wood materials in Korean apartment buildings. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, vol. 27, no. 5–6, pp. 671–682. DOI: 10.1080/01694243.2012.690659.
11. Wang S.-Y., Yang T.-H., Lin L.-T., Lin C.-J., Tsai M.-J. Properties of low-formaldehyde-emission particleboard made from recycled wood-waste chips sprayed with PMDI/PF resin. *Building and Environment*, 2007, vol. 42, pp. 2472–2479. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.009.
12. Sahoo S. C., Sil A., Dutta A. Synthesis and properties study of the urea-formaldehyde resin modified with PMDI used for manufacturing of wood composite products. *European Chemical Bulletin*, 2023, vol. 12, no. 10, pp. 9875–9880. DOI: 10.48047/ecb/2023.12.10.699.
13. Oktay S., Pizzi A., Köken N., Bengü B. Tannin-based wood panel adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, vol. 130, 103621. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103621.
14. Kim S. Environment-friendly adhesives for surface bonding of wood-based flooring using natural tannin to reduce formaldehyde and TVOC emission. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, pp. 744–748. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.06.062.
15. Kim S. The reduction of indoor air pollutant from wood-based composite by adding pozzolan for building materials. *Construction and Building Materials*, 2009, vol. 23, pp. 2319–2323.
16. Sumin K., Yoon-Ki C., Kyung-Won P., Jeong Tai K. Test methods and reduction of organic pollutant compound emissions from wood-based composite products. *Journal of Building Engineering*, 2004. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.008.
17. Risholm-Sundman M., Lundgren M., Vestin E., Herder P. Emission of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1998, vol. 56, pp. 125–129.
18. Kovačević M., Rieder-Gradinger C., Teischinger A., Srebotnik E. Volatile organic compounds emitted from Scots pine and Norway spruce wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2023, vol. 81, pp. 699–712. DOI: 10.1007/s00107-022-01909-0.
19. Čech P. Comparison of VOC Emissions from Natural Wood and Heat Treated Wood. *Drvna Industrija*, 2018, vol. 69, no. 4. DOI: 10.5552/drind.2018.
20. Sivrikaya H., Tesařová D., Jeřábková E., Can A. Color change and emission of volatile organic compounds from Scots pine exposed to heat and vacuum-heat treatment. *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 26, 100918. DOI: 10.1016/j.job.2019.100918.
21. Lee Y.-K., Kim H.-J. The effect of temperature on VOCs and carbonyl compounds emission from wooden flooring by thermal extractor test method. *Building and Environment*, 2012, vol. 53, pp. 95–99. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.016.
22. Huang S., Wei W., Weschler L. B., Salthammer T., Kan H., Bu Z., Zhang Y. Indoor formaldehyde concentrations in urban China: Preliminary study of some important influencing factors. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 590–591, pp. 394–405. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.187.
23. Liang W., Yang S., Yang X. Long-Term Formaldehyde Emissions from Medium-Density Fiberboard in a Full-Scale Experimental Room: Emission Characteristics and the Effects of Temperature and Humidity. *Environmental Science & Technology*, 2015, vol. 49, no. 17, pp. 10349–10356. DOI: 10.1021/acs.est.5b02217.
24. Huang S., Xiong J., Cai C., Xu W., Zhang Y. Influence of humidity on the initial emittable concentration of formaldehyde and hexaldehyde in building materials: experimental observation and correlation. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1038/srep23388.
25. Zhu Y., Guo S., Liang W. A literature review investigating the impact of temperature and humidity on volatile organic compound emissions from building materials. *Building and Environment*, 2024, vol. 262, 111845. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2024.111845.
26. Wang Y., Wang H., Tan Y., Liu J., Wang K., Ji W., Sun L., Yu X., Zhao J., Xu B., Xiong J. Measurement of the key parameters of VOC emissions from wooden furniture, and the impact of temperature. *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 259, 118510. DOI: 10.1016/J.ATMOSENV.2021.118510.
27. Campagnolo D., Saraga D. E., Cattaneo A., Spinazzè A., Mandin C., Mabilia R., Perreca E., Sakellaris I., Canha N., Mihucz V. G., Szigeti T., Ventura G., Madureira J., Fernandes E. de O., de Kluizenaar Y., Cornelissen E., Hänninen O., Carrer P., Wolkoff P., Cavallo D. M., Bartzis J. G. VOCs and aldehydes source identification in European office buildings – The OFFICAIR study. *Building and Environment*, 2017, vol. 115, pp. 18–24. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.01.009.
28. Wi S., Kim M. G., Myung S. W., Baik Y. K., Lee K. B., Song H. S., Kwak M. J., Kim S. Evaluation and analysis of volatile organic compounds and formaldehyde emission of building products in accordance with legal standards: A statistical experimental study. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 393, 122381. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122381.
29. Caron F., Guichard R., Robert L., Verrielle M., Thevenet F. Behaviour of individual VOCs in indoor environments: How ventilation affects emission from materials. *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 243, 117713. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117713.

30. Hernandez G., Wallis S. L., Graves I., Narain S., Birchmore R., Berry T.-A. The effect of ventilation on volatile organic compounds produced by new furnishings in residential buildings. *Atmospheric Environment X*, 2020, vol. 6, 100069. DOI: 10.1016/J.AEAOA.2020.100069.

31. Tuomainen M., Pasanen A.-L., Tuomainen A., Liesivuori J., Juvonen P. Usefulness of the Finnish classification of indoor climate, construction and finishing materials: comparison of indoor climate between two new blocks of flats in Finland. *Atmospheric Environment*, 2001, vol. 35, pp. 305–313. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00157-6.

32. Guo H., Murray F., Lee S. C. The development of low volatile organic compound emission house – a case study. *Building and Environment*, 2003, vol. 38, issue 12, pp. 1413–1422. DOI: 10.1016/S0360-1323(03)00156-2.

33. Järnström H., Saarela K., Kalliokoski P., Pasanen A.L. Reference values for indoor air pollution concentrations in new residential buildings in Finland. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, pp. 7178–7191. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.021.

34. He Z., Xiong J., Kumagai K., Chen W. An improved mechanism-based model for predicting the long-term formaldehyde emissions from composite wood products with exposed edges and seams. *Environment International*, 2019, vol. 132, 105086. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105086.

Информация об авторах

Чилла Патко – кандидат технических наук, доцент факультета архитектуры. Будапештский университет технологии и экономики (наб. Муэгыетем, 3, 1111, г. Будапешт, Венгрия). E-mail: csilla.patko@gmail.com

Пастори Золтан – кандидат технических наук, доцент факультета деревообработки и креативных производств. Университет Шопрона (ул. Байчи-Жилински, 4, 9400, г. Шопрон, Венгрия). E-mail: pasztoryzoltan@gmail.com

Божелко Игорь Константинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bikbstu@mail.ru

Мелешко Ольга Викторовна – аспирант, докторантура Йожефа Чираки по наукам и технологиям древесины, факультет деревообработки и креативных производств. Университет Шопрона (ул. Байчи-Жилински, 4, 9400, г. Шопрон, Венгрия). E-mail: volhamialeshka@outlook.com

Туфа Мебрату – аспирант, докторантура Йожефа Чираки по наукам и технологиям древесины, факультет деревообработки и креативных производств. Университет Шопрона (ул. Байчи-Жилински, 4, 9400, г. Шопрон, Венгрия). E-mail: mebratuifaatufa@gmail.com

Information about the authors

Csilla Patko – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Faculty of Architecture. Budapest University of Technology and Economics (3 Műgyetem rkp., 1111, Budapest, Hungary). E-mail: csilla.patko@gmail.com

Pásztory Zoltán – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Faculty of Wood Engineering and Creative Industries. University of Sopron (4 Bajcsy-Zsilinszky str., 9400, Sopron, Hungary). E-mail: pasztoryzoltan@gmail.com

Bazhelka Ihar – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bikbstu@mail.ru

Mialeshka Volha – PhD student, József Cziráki Doctoral School of Wood Science and Technologies, the Faculty of Wood Engineering and Creative Industries. University of Sopron (4 Bajcsy-Zsilinszky str., 9400, Sopron, Hungary). E-mail: volhamialeshka@outlook.com

Mebratu Tufa – PhD student, József Cziráki Doctoral School of Wood Science and Technologies, the Faculty of Wood Engineering and Creative Industries. University of Sopron (4 Bajcsy-Zsilinszky str., 9400, Sopron, Hungary). E-mail: mebratuifaatufa@gmail.com

Поступила 15.10.2024

УДК 674.812-419

О. К. Леонович, О. В. Коняхина

Белорусский государственный технологический университет

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНТИПИРЕНОВ НА ОТВЕРЖДЕНИЕ КЛЕЕВ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ФАНЕРЫ**

В статье рассмотрены исследования, направленные на изучение влияния различных базовых антипиренов на параметры процесса желатинизации клеевых композиций, применяемых в производстве фанеры. Проанализированы способы повышения огнестойкости фанеры путем пропитки огнезащитными составами шпона перед склеиванием, введением ингибиторов горения в клей, пропиткой фанеры в автоклавах под вакуумом, поверхностной обработкой антипиренами. Приведены основные механизмы огнезащиты и подавления процесса тления древесины. Отмечено, что при использовании антипиренов значительно снижается адгезия клеев к поверхности пропитанного шпона. Описаны различные варианты применения антипиренов, влияющих на скорость склеивания и адгезию к древесному материалу. Подчеркнуто, что применение фтористых и борных соединений значительно снижает прочность клеевого шва. Рассмотрено влияние этих компонентов при использовании в качестве связующих фенольных и фенолрезорциновых смол и изменение кинетики отверждения при использовании солей аммония. Замечено, что применение фтористого натрия значительно замедляет отверждение связующих. Предложено продолжить исследования по повышению огнестойкости фанеры на основе карбамидоформальдегидной смолы с применением различных клеевых композиций и модификаций деполимеризованным гидролизным лигнином и выявить варианты антипиренов, не ослабляющих адгезию связующих и древесного материала. В ходе решения многоаспектной проблемы сделать акцент на изыскании возможных преимуществ, которые могут возникнуть при использовании антипирена в сочетании с модификатором.

Ключевые слова: фанера, антипирен, адгезия, смола, прочность, огнестойкость.

Для цитирования: Леонович О. К., Коняхина О. В. Анализ влияния антипиренов на отверждение клеев в производстве фанеры // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 114–124.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-12.

O. K. Leonovich, O. V. Konyakhina

Belarusian State Technological University

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FIRE RETARDANTS
ON THE CURING OF ADHESIVES IN PLYWOOD PRODUCTION**

The article discusses studies aimed at studying the influence of various basic flame retardants on the parameters of the gelatinization process of adhesive compositions used in the production of plywood. Methods for increasing the fire resistance of plywood are analyzed by impregnating veneer with fire retardant compounds before gluing, introducing fire inhibitors into the glue, impregnating plywood in autoclaves under vacuum, and surface treatment with flame retardants. The basic mechanisms of fire protection and suppression of wood smoldering are given. It has been noted that when using fire retardants, the adhesion of adhesives to the surface of impregnated veneer is significantly reduced. Various options for the use of fire retardants are described, affecting the speed of gluing and adhesion to wood material. It is emphasized that the use of fluoride and boron compounds significantly reduces the strength of the adhesive joint. The influence of these components when using phenolic and phenolresorcinol resins as binders and the change in curing kinetics when using ammonium salts are considered. It has been observed that the use of sodium fluoride significantly slows down the curing of binders. It is proposed to continue research on increasing the fire resistance of plywood based on urea-formaldehyde resin using various adhesive compositions and modifications with depolymerized hydrolytic lignin and to propose options for fire retardants that do not weaken the adhesion of binders and wood material. In solving a multi-aspect problem, focus on finding possible advantages that may arise when using a fire retardant in combination with a modifier.

Keywords: plywood, fire retardant, adhesion, resin, strength, fire resistance.

For citation: Leonovich O. K., Konyakhina O. V. Analysis of the influence of fire retardants on the curing of adhesives in plywood production. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 114–124 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-12.

Введение. Фанера марки ФК является ценным строительным материалом, обладающим высокими прочностными показателями и низким классом эмиссии. Однако горючесть фанеры ограничивает ее применение во многих областях. Возгорание древесины возможно при длительном воздействии температуры 160°C, при наличии огня температура составляет 250°C и выше, а в случае самовоспламенения выше 400°C. Основные способы повышения огнестойкости деревянных изделий – это пропитка замедлителями горения (антипиренами) и нанесение огнезащитных покрытий. На сегодняшний день существует несколько основных способов снижения воспламеняемости фанеры: пропитка отдельных слоев шпона перед склеиванием [1–3], введение огнезащитного состава в клей, используемый в технологическом процессе [4], пропитка фанеры в вакууме [5], обработка поверхности огнезащитным покрытием [6–9]. Задача химических способов снижения горючести древесных материалов связана с уменьшением выхода горючих летучих продуктов, исключением беспламенного горения карбонизованного остатка, тления перед процессом горения и в завершении его. В качестве антипиренов используются бура, борная кислота, диаммоний фосфат, сульфат аммония, хлористый аммоний, магний хлористый (бишофит) и др. [10–18]. С помощью антипиренов можно замедлить или подавить отдельные стадии горения древесного материала. В основе применения антипиренов лежит их плавление или разложение при нагреве.

Качество нового материала, получаемого при глубокой пропитке натуральной древесины, существенно зависит от свойств импрегнирующих компонентов, входящих в пропиточный раствор, а также от режима пропитки и обработки древесины.

Поэтому при выборе компонентов, входящих в пропиточный состав, необходимо учитывать реакционную способность, токсичность, экономичность, т. е. разработанные составы должны улучшать свойства древесины (биостойкость, огнестойкость), повышать физико-механические характеристики, а также обладать хорошей проникающей способностью.

При подборе эффективного состава для огнебиозащиты древесины и деревянных строительных конструкций можно рассматривать, например, составы на водной основе, содержащие 1) карбамид, борную кислоту, натрийкарбоксилцеллюлозу; 2) диаммонийфосфат, карбамид, тебуконазол; 3) буру, борную кислоту, концентрированную уксусную кислоту, тетрафторборат аммония; 4) аммоний фосфорнокислый однозамещенный, или монофосфат щелочного металла, или дифторфосфат, карбамид, борную кислоту, алюминий сернокислый, щавелевую кислоту;

5) аммоний фосфорнокислый, буру, борную кислоту, кальцинированную соду, четвертичные амины, поверхностно-активные вещества; 6) моноаммонийфосфат, мочевины, тетрафторборат; 7) мочевины, медный купорос, аммофос, аммиак.

Возможны другие варианты пропиточных огнебиозащитных средств.

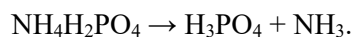
В Беларуси наиболее распространены солевые антипирены. Чаще всего это комбинации диаммонийфосфата, хлорида или сульфата аммония, фторида натрия и других компонентов. Составы формируются на основе солей фосфорной и борной кислоты. В работах различных авторов приводятся методики повышения огнезащитных свойств древесных материалов [19–23].

Рассмотрим механизм огнезащиты на примере диаммонийфосфата технического.

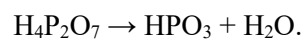
При нагревании он постепенно разлагается на аммиак и фосфорные кислоты. При 130–140°C протекает процесс



При дальнейшем нагревании моноаммонийфосфат начинает диссоциировать до ортофосфорной кислоты, выделяя еще молекулу аммиака:



При температуре, близкой к 260°C, ортофосфорная кислота переходит в пиропосфорную, а при дальнейшем повышении температуры (до 300°C) – в метафосфорную с последовательным выделением воды:

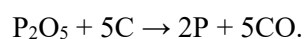
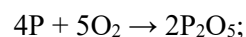
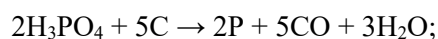


Аммиак, выделяющийся на первых стадиях разложения, образует над поверхностью защищаемой древесины газовую оболочку, затрудняющую поступление к ней кислорода, при этом негорючие, легкоплавкие фосфорные кислоты покрывают волокна древесины защитной пленкой.

Диаммонийфосфат рекомендуется применять в виде 12–20%-ного раствора в смеси с бурой, борной кислотой.

При разложении азотсодержащих антипиренов выделяются газы, не поддерживающие горение и разбавляющие горючие летучие продукты пиролиза древесины.

Особенно хорошо двухзамещенный фосфат аммония защищает древесину от тления после прекращения пламенного горения. Соединения пятивалентного фосфора способны подавлять процессы тления за счет окисления углерода в присутствии ортофосфорной кислоты:



Получаемый таким образом карбонизированный слой устойчив к длительному нагреванию [24–27].

В основу создания огнебиозащитного средства положен химико-технологический процесс взаимодействия 2–3 амидных соединений, полисахаридов соединений с формальдегидом в присутствии ортофосфорной кислоты с непрерывной реакцией образования моносоединений и снижением образования полисоединений за счет использования в составе кислоты. В процессе протекания реакции образуется монометилдициан-диамидофосфат.

Для образования пористого теплоизолирующего слоя на поверхности древесины в пропиточный раствор огнезащитного средства вводятся модифицированные коксообразователи-полисахариды. При термическом воздействии на древесину, пропитанную указанным средством, оно способно при температуре около 150°C образовывать на поверхности непрерывный вспененный слой, толщина которого увеличивается по мере роста температуры до 5–30 мм, так как минеральная кислота, воздействуя на коксообразователь, способствует разложению его на воду, углекислый газ и углерод (кокс) [28–30].

Предложенные варианты повышения огнестойкости применимы и широко используются для обработки массивной древесины, при этом актуально изучить вопрос возможности применения разработанных составов в производстве фанеры, влияния их компонентов на дальнейшую связь с компонентами клеевой композиции на этапе подпрессовки пакетов, на адгезию и показатели клеевой композиции в процессе желатинизации.

Целью исследования является анализ влияния условно базовых антипиренов на отверждение клеев, используемых для производства фанеры, и подбор наиболее приемлемого сочетания с возможностью промышленной реализации.

Основная часть. Одним из затруднений при осуществлении технологического процесса производства фанеры с огнестойкими свойствами является низкая адгезия клеев к поверхности пропитанной древесины. Концентрация солей на поверхности, достигающая 30–70% от веса клея в шве, при нормальном его расходе влияет на кинетику отверждения и поэтому требует специального подбора комбинации антипирена и связующего, для которых концентрация антипирена на поверхности не особенно опасна. В исследованиях по снижению горючести древесных плит этому вопросу уделяют усиленное внимание.

Особое место в ряду имеющихся разработок занимают фосфоорганические реакционно-способные антипирены с алкилфосфорной связью, устойчивой к гидролизу и окислению [31].

Некоторые фосфорсодержащие антипирены также повышают био- и водостойкость древесных материалов. В Российской Федерации теоретические основы получения и использования азотфосфорсодержащих составов для огнезащиты древесины разработаны под руководством А. А. Леоновича [32–35]. Они базируются на изменении механизма термопревращений древесины, на сужении пределов горения и изменении процессов тепло- и массообмена пламени с поверхностью горящего материала благодаря изменению теплофизических характеристик конденсированной фазы; на изменении состава и уменьшении количества и скорости выделения горючих летучих продуктов термораспада субстрата и связующего; подавлении реакций окисления в газовой фазе и развитии карбонизации; увеличении потерь излучением как от пламени, так и с горячей поверхности.

Многочисленные публикации посвящены исследованию возможности применения антипиренов для массивной древесины в производстве клееной древесины [36–40]. Исходя из результатов данных исследований, можно сделать вывод, что обработка огнезащитными составами является фактором, существенно влияющим на технологический процесс производства. Вследствие физико-химического взаимодействия компонентов древесины, антипирена и клеевой композиции для нейтрализации определенных химических реакций требуются корректировки режимов производства.

Установлено, что содержание в фенольном клее всего лишь 0,5% фтористого натрия снижает прочность склеивания до 0,01 МПа. Борные антипирены меньше снижают прочность склеивания. Так, если содержание борной кислоты в клее КБ-3 не превышает 30%, прочность склеивания не снижается. Эти данные подтверждаются результатами испытания клеевых швов древесины, пропитанной борной кислотой с поглощением 75 кг/м³. При таком поглощении антипирена содержание его на поверхности превысило 30% веса клея, и прочность склеивания оказалась невысокой – 0,4 МПа. Таким образом, результаты испытаний прочности склеивания пропитанной древесины подтверждаются результатами испытаний образцов, склеенных клеями с добавкой данного антипирена [41].

Для выяснения причин малой прочности клеевых соединений антипиренованной древесины были изучены реологические характеристики и кинетика отверждения клеев КБ-3 и ФР-12 в присутствии антипиренов. Было обнаружено, что добавка 1–2% борной кислоты несколько ускоряет рост вязкости клея КБ-3, не меняя в принципе кинетики его отверждения. Такая же добавка кислоты к фенольной смоле «Б» вызывает

постепенное отверждение. Соли аммония существенно меняют кинетику отверждения клея: через 40 мин после добавления антипирина вязкость клея КБ-3 уменьшается до уровня, превышающего вязкость основного компонента (фенолформальдегидной смолы) не более чем на 3–5%, и клей при этом не отверждается. Для фенольной смолы «Б» без отвердителя при добавлении 10% сульфата аммония характерна подобная же картина. Особенно сильно действует на клей КБ-3 фтористый натрий. Уже при содержании последнего в количестве 0,25% скорость отверждения клея увеличивается в 2 раза, а при содержании 0,5% отверждение не наблюдается совсем [42].

Значительно меньше антипирины влияют на отверждение резорцинового клея ФР-12, что обусловлено его большей стабильностью. При введении борных антипиренов время отверждения этого клея увеличивается пропорционально содержанию солей. Диаммонийфосфат и фтористый натрий не изменяют времени отверждения даже при 50%-ном их содержании в клее [43, 44].

В литературном источнике [11] предложен способ склеивания древесины, обработанной антипирином, предусматривающий покрытие склеиваемой поверхности пленкой жидкого полимера с последующим ее отверждением. Так, нанесение пленки клея КБ-3 на поверхность древесины, обработанной борными антипиринами, повысило прочность склейки березового шпона с 0,3 до 0,6 МПа (применяли клей КБ-3). Еще лучше древесину, пропитанную борными антипиринами, склеивает клей УФФ, разработанный в Иркутском политехническом институте. Прочность склеивания достигает 0,9 МПа, разрушение происходит только по древесине. Достаточно высокую прочность склеивания фанеры (0,7 МПа) обеспечивает эпоксидный клей на основе смолы ЭД-5; разрушение идет на 27% по древесине. Предложенные клеи можно также применять для склеивания трудногорючей фанеры, что подтверждено экспериментально.

Проведены работы по пропитке древесины некоторыми огнестойкими полимерами и исследована возможность склеивания пропитанных заготовок. Обнаружено, что огнестойкость древесины существенно повышается при поглощении 0,223 г/см³ кремнийорганической жидкости ГКЖ-10 и 0,142 г/см³ жидкости ГКЖ-11 [45].

В качестве антипирина опробована также карбамидная смола КФ-SO (крепитель формовочных смесей). Опыты показали, что пропитанная этими веществами древесина хорошо клеится резорциновыми, фенольными, эпоксидными клеями, специально подбираемыми в зависимости от используемого антипирина. Так как, например, щелочность жидкостей ГКЖ-10, ГКЖ-11

нейтрализует действие катализатора в клее КБ-3 и приостанавливает отверждение, для данных антипиренов более пригодны резорциновые клеи. Древесину, обработанную крепителем КФ-90, хорошо склеивают клеи УФФ, КБ-3, ФР-100; прочность клеевого шва при скалывании равна 0,9–1,0 МПа, разрушение по древесине 63–100%. Эксплуатационные свойства клеевых соединений древесины оценивали ускоренным старением и длительным экспонированием. В частности, испытания образцов древесины, обработанной смолой КФ-90 и склеенных клеем КБ-3 и клеем ФР-12, показали, что при ускоренном старении стойкость клеевых швов сравнима со стойкостью контрольных непропитанных образцов. Прочность клеевых швов древесины, обработанной борными соединениями и склеенной клеем ЭД-5Г, за год экспонирования в комнате уменьшилась на 50%. Проведены испытания на старение образцов древесины, обработанной солями аммония и склеенной клеем ФР-12 с повышенным содержанием параформа. Испытания показали, что конструкции из такой древесины можно эксплуатировать в условиях, исключающих непосредственное увлажнение клеевого шва. Это же требование предъявляется и к эксплуатации древесины, антипирированной борными соединениями. Древесину, антипирированную смолой КФ-90 и склеенную клеями КБ-3 и ФР-12, по данным ускоренного старения, можно эксплуатировать на открытом воздухе [45].

Анализ полученных результатов показывает, что можно подобрать несколько комбинаций антипиренов – клеев, для которых допустима высокая концентрация солей на поверхности древесины. Предельные значения этой концентрации устанавливаются исходя из кинетики отверждения, сопоставляемой с показателями прочности склеивания. Значения предельной концентрации, вызывающие изменения кинетики отверждения, близки по порядку величин к значениям концентрации, существенно влияющим на прочность склеивания. Такая методика оценки влияния концентрации солей помогает предварительно выявить совместимость антипиренов с клеями [43, 44].

Исследования по этой методике показали, что по действию на клей антипирины можно разделить на следующие группы:

- 1) не влияющие на физико-механические характеристики готовой продукции (соли аммония – карбамидный клей К-17). Прочность соединений при этом сопоставима с прочностью контрольного склеивания непропитанных образцов;

- 2) значительно снижающие прочность склеивания. Эти антипирины могут быть разделены на 2 группы:

- взаимодействующие с отвердителем клея (бура – контакт Петрова);

– вступающие в реакцию с полимером (соли аммония – клей КБ-3);

3) нейтрально или слабо влияющие на адгезию и прочность клеевого шва. При формировании адгезионных связей присутствие этих антипиренов в большом количестве сказывается отрицательно. К этой группе можно отнести борную кислоту при содержании ее в древесине менее 75 кг/м^3 .

Подобное разделение антипиренов и клеев на группы условно, но оно помогает при решении технологических задач по склеиванию древесины, обработанной антипиреном.

Интерес представляет работа по повышению огнестойкости фанеры на основе карбамидоформальдегидной смолы с применением различных клеевых композиций и модификаций деполимеризованным гидролизным лигнином. Авторами установлено, что присутствие в композиции смолы с деполимеризованными лигнинами стабилизирует клеевую композицию, увеличивает срок ее жизнедеятельности и позволяет применять ее при технологии склеивания фанеры, предусматривающей подпрессовку, т. е. адгезия с древесиной не снижается, а прочность клеевого шва

значительно возрастает [46–49]. Актуально продолжить исследование в направлении подбора антипирена для модифицированной клеевой композиции и разработки технологической карты для включения в общую технологическую схему изготовления фанеры марки ФК.

Заключение. В результате анализа исследований в области использования различных антипиренов, применяемых для повышения огнестойкости фанеры, отмечается значительное влияние антипиренов на технологические параметры процесса отверждения и результаты физико-механических испытаний готовой продукции независимо от группы выбранных составов.

Предложено продолжить исследования по повышению огнестойкости фанеры на основе карбамидоформальдегидной смолы с применением различных клеевых композиций и модификаций деполимеризованным гидролизным лигнином и предложить варианты антипиренов, при использовании которых технологические параметры процесса отверждения возможно скорректировать режимами технологии производства.

Список литературы

1. Treatment of natural wood veneers with nano-oxides to improve their fire behavior / A. B. Frances Bueno [et al.] // 2nd International Conference on Structural Nano Composites. Madrid, 2014. P. 64.
2. Flame retardant treated plywood / O. Brexa [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 1999. No. 64 (3). P. 529–533.
3. Laufenberg T., Ayrilmis N., White R. Fire and bending properties of blockboard with fire retardant treated veneers // Holz als Roh- und Werkstoff. 2006. No. 64. P. 137–143.
4. Cheng R.-X., Wang Q.-W. The influence of FRW-1 fire retardant treatment on the bonding of plywood // Journal of Adhesion Science and Technology. 2011. No. 25 (14). P. 1715–1724.
5. Mechanical properties of fire-retardant-treated plywood after cyclic temperature exposure / S. L. Levan [et al.] // Forest Products Journal. 1996. No. 46 (5). P. 64–71.
6. Effects of intumescent formulation of vinyl acetate-based coating on flame-retardancy of thin painted red lauan (*Parashorea* spp.) plywood / C. S. Chuang [et al.] // XXIII World Congress. Seoul, Korea, 2010. P. 53.
7. Балакин М. И., Бирюков В. Г., Мишков С. Н. Применение огнезащитных покрытий для снижения пожарной опасности фанеры // Технологии техносферной безопасности. 2014. Вып. 2 (54). С. 1–5. URL: <https://agps-2006.narod.ru/ttb/-2/35-02-14.ttb.pdf> (дата обращения: 18.07.2024).
8. Шидловский Г. Л. Огнезащита материалов и конструкций: учеб. пособие. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 123 с.
9. Павлович А. В., Дринберг А. С., Машляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. М.: ЛКМ-пресс, 2018. 488 с.
10. Быканова М. С., Егорова Н. В. Новые фосфорсодержащие антипирены для огнезащиты древесины // Дни студенческой науки: сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов Ин-та строительства и архитектуры, Москва, 12–16 марта 2018 г. М., 2018. С. 663–665.
11. Газизов А. М., Синегубова Е. С., Кузнецова О. В. Изучение огнестойкости композиционных материалов // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: сб. тр. XIII Междунар. Евраз. симп., Екатеринбург, 21–23 сент. 2018 г. Екатеринбург, 2018. С. 73–76. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/7830> (дата обращения: 18.07.2024).
12. Газизов А. М., Садыкова А. М., Садыков А. И. Пределы огнестойкости древесины в зависимости от времени пропитки // Нефтегазовое дело. 2023. № 4. С. 5–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54410396> (дата обращения: 19.07.2024).
13. Газизов А. М., Дудниченко И. И., Хафизов Ф. Ш. Применение кремнеземного наполнителя для повышения огнестойкости древесины // Нефтегазовое дело. 2020. № 1. С. 42–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42421839> (дата обращения: 19.07.2024).

14. Гвоздяков В. С., Офицерова Л. И., Маевская П. А. Методы повышения огнестойкости каркасов из древесины и примеры их применения для жилых и общественных зданий // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 10–13 марта 2015 г. Томск, 2015. Ч. 1. С. 336–341. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32838228> (дата обращения: 18.07.2024).
15. Маковей В. А. Применение огнезащиты материалов, изделий и конструкций и современные тенденции в ее совершенствовании // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2015. № 4 (24). С. 28–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25006494> (дата обращения: 18.07.2024).
16. Мальцева Е. М. Огнезащитные силикатные составы для дерева // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. тр. XV Рос. ежегод. конф. молодых науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Москва, 16–19 окт., 2018 г. М., 2018. С. 472–473.
17. Полищук Е. Ю. Обеспечение комплексной безопасности деревянных конструкций с использованием современных средств и методов огнебиозащиты // Строение, свойства и качество древесины: сб. материалов VI Междунар. симп., посвящ. 50-летию Регион. координац. совета по современным проблемам древесиноведения, Красноярск, 10–16 сент. 2018 г. Новосибирск, 2018. С. 168–171.
18. Арцыбашева О. В. Огнестойкость деревянных конструкций с огнезащитными пропиточными составами // Технология техносферной безопасности. 2018. № 1 (77). С. 12–21.
19. Арцыбашева О. В., Сивенков А. Б. Интенсивность обугливания древесины с огнезащитой // Аспирант. 2016. № 8. С. 121–123. URL: <https://nauka-prioritet.ru/wp-content/uploads/2016/09/%D0%A1%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8F%D0%B1%D1%80%D1%8C-20161.pdf#page=121> (дата обращения: 18.07.2024).
20. Бойтемиров Ф. А. Экспериментальное исследование несущей способности и деформативности конструкций повышенной коррозионной стойкости и предела огнестойкости // Естественные и технические науки. 2015. № 2 (80). С. 133–135.
21. Дубинина Н. Н., Ермолин В. Н., Баяндин М. А. Влияние глубины пропитки древесины антипиренами на ее огнестойкость // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 23–24 окт. 2017 г. Красноярск, 2017. С. 285–288. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37192793> (дата обращения: 18.07.2024).
22. Макишев Ж. К., Сивенков А. Б. Огнестойкость клееных деревянных конструкций типа LVL // Технологии техносферной безопасности. 2015. Вып. 3 (61). С. 1–5. URL: <https://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-3/36-03-15.ttb.pdf> (дата обращения: 18.07.2024).
23. Устименко К. А., Смирнов П. Н. Огневые испытания и расчет предела огнестойкости конструкций из бруса клееного из шпона // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 89–94. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48507029> (дата обращения: 19.07.2024).
24. Bai Y., Zhang J., Zhang X. Scaling study on the fire resistance of cross-laminated timber floors // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 85. P. 108. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400247X> (date of access: 19.07.2024).
25. Zachar M. Determination of fire-environmental parameters of selected wooden composites. Annals of Warsaw University of Life Sciences // Forestry and Wood Technology. 2014. No. 87. P. 250–255. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/250_Annals87.pdf (date of access: 18.07.2024).
26. Шелоумов А. В. Технология экологически доброкачественных огнезащищенных древесных плит с использованием фосфор- и алюминийсодержащих связующих: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 23.05.2017. СПб., 2017. 35 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/tekhnologiya-ekologicheskii-dobrokachestvennykh-ognezashchishchennykh-drevesnykh-plit-s-ispol> (дата обращения: 18.07.2024).
27. Shijie Hou, Dapeng Liu, Yukuan Shen. An environment-friendly, fire-resistant, thermal-insulating and mechanical-robust wood with anisotropic capacitive pressure-sensitive performance // Materials Today Communications. 2023. Vol. 36. P. 106. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235249282301262X> (date of access: 19.07.2024).
28. Henek V., Venkrbec V., Novotny M. Fire Resistance of Large-Scale Cross-Laminated Timber Panels // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 95. No. 6. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/95/6/062004/meta> (date of access: 18.07.2024).
29. Mineralization of wood by calcium carbonate insertion for improved flame retardancy / V. Merk [et al.] // Holzforschung. 2016. Vol. 70. No. 9. P. 867–876. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hf-2015-0228/html> (date of access: 18.07.2024).
30. Shi Yanchao, Wang Guojian. Influence of molecular weight of PEG on thermal and fire protection properties of PEPA-containing polyether flame retardants with high water solubility // Progress in Organic Coatings. 2016. Vol. 90. P. 390–398. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.08.005. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944015300746> (date of access: 18.07.2024).

31. Тычино Н. А., Яцукович А. Г. Огнезащитная пропиточная композиция для древесины, образующая пористый теплоизолирующий слой на ее поверхности // Пожаровзрывобезопасность. 1999. Т. 8, № 1. С. 35–39.
32. Леонович А. А., Шпаковский В. Г. Древесностружечные плиты. Огнезащита и технология: монография. СПб.: Лань, 2018. 160 с.
33. Леонович А. А. Основные направления и принципы модифицирования древесных материалов. СПб.: Лань, 2017. 95 с.
34. Леонович А. А., Шелоумов А. В., Шпаковский В. Г. Создание древесных композиционных материалов пониженной горючести. СПб.: Лань, 2019. 160 с.
35. Леонович А. А., Захаров С. С. Модифицирование шпона амидофосфатом для изготовления огнезащитной водостойкой фанеры // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2019. № 227. С. 260–270. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39385115> (дата обращения: 18.07.2024).
36. Effect of different fire retardants on Birch plywood properties / P. Bekhta [et al.] // Technicka Univerzita vo Zvolene. 2016. No. 58 (1). P. 59–66. URL: https://df.tuzvo.sk/sites/default/files/07-01-16_1_0.pdf (date of access: 18.07.2024).
37. Филиппова А. О. Повышение огнезащитности фанеры путем пропитки шпона антипиренами с последующим его склеиванием // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Екатеринбург, 23–24 апр. 2014 г. Екатеринбург, 2014. Ч. 1. С. 189–192. URL: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3246/1/Filippova.pdf> (дата обращения: 18.07.2024).
38. Анализ огнестойкости клееной древесины (CLT-панелей) / В. В. Одегов [и др.] // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 10–13 апр. 2020 г. Новосибирск, 2020. С. 53–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44233932> (дата обращения: 19.07.2024).
39. Боровицкая А. В., Цыбакин С. В. К вопросу огнестойкости деревянных конструкций, пропитанных минеральным составом // Развитие науки и практики в контексте глобальных вызовов: сб. ст. 75-й Междунар. науч.-практ. конф., Караваево, 25 янв. 2024 г. Караваево, 2024. С. 127–131. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=670968> (дата обращения: 19.07.2024).
40. Grześkowiak W. Ł., Przybylska M. The fireproof degree of plywood protection depending on the impregnation method // Annals WULS – SGGW. Forestry and Wood Technology. 2018. No. 104. P. 26–30. URL: https://www.researchgate.net/profile/VicenteIbanez/publication/330846543_Using_robotics_for_complex_furniture_fatigue_tests/links/5d8cc9ca299bf10cff129418/Using-robotics-for-complex-furniture-fatigue-tests.pdf#page=28 (date of access: 18.07.2024).
41. Нуркулов Ф. Н., Джалилов А. Т. Фосфор-борсодержащие олигомерные антипирены для древесины и древесных композиционных материалов // Олигомеры-2015: сб. тез. докл. V Междунар. конф.-шк. по химии и физикохимии олигомеров, Волгоград, 1–6 июня 2015 г. Волгоград, 2015. С. 241.
42. Быканова М. С., Егорова Н. В. Производные фосфоновых кислот – новые антипирены // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. материалов XXI Междунар. науч. конф., Москва, 25–27 апр. 2018 г. М., 2018. С. 214–216. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35151417&selid=35151488> (дата обращения: 18.07.2024).
43. Бирюков В. Г., Мишков С. Н., Соболев А. В. Огнезащитные клееные материалы на основе древесины // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2014. № 3. С. 28–31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ognezaschischyonnye-kleyonye-materialy-na-osnove-drevesiny/viewer> (дата обращения: 18.07.2024).
44. Скакунов А. С., Циркина О. Г. Огнестойкость древесины и способы ее повышения // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Иваново, 19 окт. 2023 г. Иваново, 2023. С. 392–396. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=62055430> (дата обращения: 19.07.2024).
45. Варанкина Г. С., Русаков Д. С., Артеменков А. М. Прочность клеевых соединений в экстремальных условиях эксплуатации // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 10. С. 25–28. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=46695143> (дата обращения: 02.08.2024).
46. Коняхина О. В., Леонович О. К. Новый отвердитель и акцептор формальдегида карбамидоформальдегидных смол из древесных отходов гидролизного производства // Лес – Наука – Инновации – 2022: тез. докл. Междунар. молодеж. форума по лесопром. образованию, Минск, 6–9 дек. 2022 г. Минск, 2022. С. 243–247.

47. Леонович О. К., Коняхина О. В. Эффективность применения деполимеризованных гидролизных лигнинов в производстве фанеры // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 87-й науч.-техн. конф. преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 фев. 2023 г. Минск, 2023. С. 176–179.

48. Коняхина О. В. Применение композиций деполимеризованных гидролизных лигнинов при выпуске плитных материалов // 74-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: тез. докл., Минск, 17–22 апр. 2023 г. Минск, 2023. С. 150–153.

49. Леонович О. К., Божелко И. К., Коняхина О. В. Снижение эмиссии формальдегида водостойкой фанеры // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (240). С. 194–200. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-21.

Referenses

1. Frances Bueno A. B., Navarro Banon M. V., Martinez de Morentin L., Moratalla Garcia J. Treatment of natural wood veneers with nano-oxides to improve their fire behavior. *2nd International Conference on Structural Nano Composites*. Madrid, 2014, p. 64.

2. Grekha O., Horvartova E., Besinova O., Lenochki P. Flame retardant treated floating. *Polymer Degradation and Stabilities*, 1999, no. 64 (3), pp. 529–533.

3. Laufenberg T., Ayrilmis N., White R. Fire and bending properties of blockboard with fire retardant treated veneers. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006, no. 64, pp. 137–143.

4. Cheng R.-X., Wang Q.-W. The influence of FRW-1 fire retardant treatment on the bonding of plywood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, no. 25 (14), pp. 1715–1724.

5. Levan S. L., Kim J. M., Nagel R. J., Evans J. W. Mechanical properties of fire-retardant-treated plywood after cyclic temperature exposure. *Forest Products Journal*, 1996, no. 46 (5), pp. 64–71.

6. Chuang C.-S., Tsai K.-C., Yang T.-H., Wang M.-K., Ko C.-H. Effects of intumescent formulation of vinyl acetate-based coating on flame-retardancy of thin painted red lauan (*Parashorea* spp.) plywood. *XXIII World Congress*. Seoul, Korea, 2010, p. 53.

7. Balakin M. I., Biryukov V. G., Mishkov S. N. The use of fire retardant coatings to reduce the fire hazard of plywood. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2014, issue 2 (54), pp. 1–5. Available at: <https://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-2/35-02-14.ttb.pdf> (accessed 18.07.2024) (In Russian).

8. Shidlovsky G. L. *Ognezashchita materialov i konstruksiy* [Fire protection of materials and structures]. St. Petersburg, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2022. 123 p. (In Russian).

9. Pavlovich A. V., Drinberg A. S., Mashlyakovskiy L. N. *Ognezashchitnyye vspuchivayushchiyesya lakokrasochnyye pokrytiya* [Fire-retardant intumescent paint and varnish coatings]. Moscow, LKM-press Publ., 2018. 488 p. (In Russian).

10. Bykanova M. S., Egorova N. V. New phosphorus-containing flame retardants for fire protection of wood. *Dni studentcheskoy nauki: sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov Instituta stroitel'stva i arkhitektury* [Days of student science: collection of reports scientific-technical conferences based on the results of scientific-research works of students of the Institute of Construction and Architecture]. Moscow, 2018, pp. 663–665 (In Russian).

11. Gazizov A. M., Sinegubova E. S., Kuznetsova O. V. Study of fire resistance of composite materials. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka: sbornik trudov XIII Mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the 21st century: collection of works XIII International Eurasian Symposium]. Ekaterinburg, 2018, pp. 73–76. Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/7830> (accessed 18.07.2024) (In Russian).

12. Gazizov A. M., Sadykova A. M., Sadykov A. I. Fire resistance limits of wood depending on the impregnation time. *Neftegazovoye delo* [Oil and Gas Business], 2023, no. 4, pp. 5–16. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54410396> (accessed 19.07.2024) (In Russian).

13. Gazizov A. M., Dudnichenko I. I., Khafizov F. Sh. The use of silica filler to increase the fire resistance of wood. *Neftegazovoye delo* [Oil and Gas Business], 2020, no. 1, pp. 42–52. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42421839> (accessed 19.07.2024) (In Russian).

14. Gvozdyakov V. S., Ofitserova L. I., Mayevskaya P. A. Methods for increasing the fire resistance of wood frames and examples of their application for residential and public buildings. *Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost' kak material'nyy bazis modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya ekonomiki: sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Investments, construction, real estate as the material basis for modernization and innovative development of the economy: collection of articles. materials VIII International scientific-practical conference]. Tomsk, 2018, part 1, pp. 336–341. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32838228> (accessed 18.07.2024) (In Russian).

15. Makovey V. A. The use of fire protection of materials, products and structures and current trends in its improvement. *Chrezvychaynyye situatsii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'* [Emergency situations: industrial and environmental safety], 2015, no. 4 (24), pp. 28–36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25006494> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
16. Maltseva E. M. Fire retardant silicate compounds for wood. *Fiziko-khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov: sbornik trudov XV Rossiyskoy yezhegodnoy konferentsii molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Physico-chemistry and technology of inorganic materials: collection of articles of XV Russian annual conference young researchers and graduate students (with international participation)]. Moscow, 2018, pp. 472–473 (In Russian).
17. Polishchuk E. Yu. Ensuring comprehensive safety of wooden structures using modern means and methods of fire and biological protection. *Stroyeniye, svoystva i kachestvo drevesiny: sbornik materialov VI Mezhdunarodnogo simpoziuma, posvyashchennogo 50-letiyu Regional'nogo koordinatsionnogo soveta po sovremennym problemam drevesinovedeniya* [Structure, properties and quality of wood collection materials of the VI International Symposium, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordination Council on modern problems of wood science]. Novosibirsk, 2018, pp. 168–171 (In Russian).
18. Artsybasheva O. V. Fire resistance of wooden structures with fire retardant impregnating compounds. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technologies of technosphere safety], 2018, no. 1 (77), pp. 12–21 (In Russian).
19. Artsybasheva O. V., Sivenkov A. B. Intensity of charring of wood with fire protection. *Aspirant* [Postgraduate student], 2016, no. 8, p. 121–123. Available at: <https://nauka-prioritet.ru/wp-content/uploads/2016/09/%D0%A1%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8F%D0%B1%D1%80%D1%8C-20161.pdf#page=121> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
20. Boitemirov F. A. Experimental study of the load-bearing capacity and deformability of structures with increased corrosion resistance and fire resistance. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences], 2015, no. 2 (80), pp. 133–135 (In Russian).
21. Dubinina N. N., Ermolin V. N., Bayandin M. A. The influence of the depth of impregnation of wood with fire retardants on its fire resistance. *Lesnoy i khimicheskiy komplekсы – problemy i resheniya: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Forestry and chemical complexes – problems and solutions: collection materials All-Russian scientific-practical conference]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 285–288. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37192793> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
22. Makishev Zh. K., Sivenkov A. B. Fire resistance of laminated timber structures type LVL. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2015, issue 3 (61), pp. 1–5. Available at: <https://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-3/36-03-15.ttb.pdf> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
23. Ustimenko K. A., Smirnov P. N. Fire tests and calculation of the fire resistance limit of structures made of laminated veneer lumber. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2022, no. 4, pp. 89–94. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48507029> (accessed 19.07.2024) (In Russian).
24. Bai Y., Zhang J., Zhang X. Scaling study on the fire resistance of cross-laminated timber floors. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 85, p. 108. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400247X> (accessed 19.07.2024).
25. Zachar M. Determination of fire-environmental parameters of selected wooden composites. *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology*, 2014, no. 87, pp. 250–255. Available at: file:///C:/Users/User/Downloads/250_Annals87.pdf (accessed 18.07.2024).
26. Sheloumov A. V. *Tekhnologiya ekologicheskikh dobrokachestvennykh ogneshchishchennykh drevesnykh plit s ispol'zovaniyem fosfor- i alyuminiysoderzhashchikh svyazuyushchikh. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Technology of environmentally benign fire-resistant wood boards using phosphorus- and aluminum-containing binders. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. St. Petersburg, 2017. 35 p. Available at: <https://www.dissercat.com/content/tekhnologiya-ekologicheskikh-dobrokachestvennykh-ogneshchishchennykh-drevesnykh-plit-s-ispol> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
27. Shijie Hou, Dapeng Liu, Yukuan Shen. An environment-friendly, fire-resistant, thermal-insulating and mechanical-robust wood with anisotropic capacitive pressure-sensitive performance. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 36, p. 106. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235249282301262X> (accessed 19.07.2024).
28. Henek V., Venkrbec V., Novotny M. Fire Resistance of Large-Scale Cross-Laminated Timber Panels. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 95, no. 6. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/95/6/062004/meta> (accessed 18.07.2024).
29. Merk V., Chanana M., Gaan S., Burgert I. Mineralization of wood by calcium carbonate insertion for improved flame retardancy. *Holzforschung*, 2016, vol. 70, no. 9, pp. 867–876. Available at: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hf-2015-0228/html> (accessed 18.07.2024).

30. Shi Yanchao, Wang Guojian. Influence of molecular weight of PEG on thermal and fire protection properties of PEPA-containing polyether flame retardants with high water solubility. *Progress in Organic Coatings*, 2016, vol. 90, pp. 390–398. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944015300746> (accessed 18.07.2024).
31. Tychino N. A., Yatsukovich A. G. Fire-retardant impregnating composition for wood, forming a porous heat-insulating layer on its surface. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 1999, vol. 8, no. 1, pp. 35–39 (In Russian).
32. Leonovich A. A., Shpakovsky V. G. *Drevesnostruzhechnyye plity. Ognезashchita i tekhnologiya: monografiya* [Particle boards. Fire protection and technology: monograph]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2018. 160 p. (In Russian).
33. Leonovich A. A. *Osnovnyye napravleniya i printsipy modifitsirovaniya drevesnykh materialov* [Directions and principles of modification of wood materials]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2017. 95 p. (In Russian).
34. Leonovich A. A., Sheloumov A. V., Shpakovsky V. G. *Sozdaniye drevesnykh kompozitsionnykh materialov ponizhennoy goryuchesti* [Creation of wood composite materials of reduced flammability]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019. 160 p. (In Russian).
35. Leonovich A. A., Zakharov S. S. Modification of veneer with amidophosphate for the production of fire-resistant waterproof plywood. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2019, no. 227, pp. 260–270. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39385115> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
36. Bekhta P., Bryn O., Sedliacik J., Novak I. Effect of different fire retardants on Birch plywood properties. *Technicka Univerzita vo Zvolene*, 2016, no. 58 (1), pp. 59–66. Available at: https://df.tuzvo.sk/sites/default/files/07-01-16_1_0.pdf (accessed 18.07.2024).
37. Filippova A. O. Increasing the fire resistance of plywood by impregnating the veneer with fire retardants and then gluing it. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: sbornik materialov X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i aspirantov i konkursa po programme “Umnik”* [Scientific creativity of youth – the forestry complex of Russia: collection materials X All-Russian scientific-practical conference students and graduate students and the competition for the “Umnik” program]. Ekaterinburg, 2014, part 1, pp. 189–192. Available at: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3246/1/Filippova.pdf> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
38. Odegov V. V., Kazak V. I., Tsetsunyak A. I., Plyasunova M. A., Pavlik A. V. Analysis of fire resistance of laminated timber (CLT panels). *Aktual'nyye voprosy arkhitektury i stroitel'stva: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current issues of architecture and construction: materials of the XIII International scientific-practical conference]. Novosibirsk, 2020, pp. 53–60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44233932> (accessed 19.07.2024) (In Russian).
39. Borovitskaya A. V., Tsybakin S. V. On the issue of fire resistance of wooden structures impregnated with a mineral composition. *Razvitiye nauki i praktiki v kontekste global'nykh vyzovov: sbornik statey 75-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Development of science and practice in the context of global challenges: collection of articles from the 75th International scientific-practical conference]. Karavaevo, 2024, pp. 127–131. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=670968> (accessed 19.07.2024) (In Russian).
40. Grześkowiak W. Ł., Przybylska M. The fireproof degree of plywood protection depending on the impregnation method. *Annals WULS – SGGW. Forestry and Wood Technology*, 2018, no. 104, pp. 26–30. Available at: https://www.researchgate.net/profile/VicenteIbanez/publication/330846543_Using_robotics_for_complex_furniture_fatigue_tests/links/5d8cc9ca299bf10cff129418/Using-robotics-for-complex-furniture-fatigue-tests.pdf#page=28 (accessed 18.07.2024).
41. Nurkulov F. N., Jalilov A. T. Phosphorus-boron-containing oligomeric flame retardants for wood and wood composite materials. *Oligomery-2015: sbornik tezisev dokladov V Mezhdunarodnoy konferentsii-shkoly po khimii i fizikokhimii oligomerov* [Oligomers-2015: collection abstract report V International conference-school on chemistry and physical chemistry of oligomers]. Volgograd, 2015, p. 241 (In Russian).
42. Bykanova M. S., Egorova N. V. Derivatives of phosphonic acids are new flame retardants. *Stroitel'stvo – formirovaniye sredy zhiznedeyatel'nosti: sbornik materialov XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Construction – the formation of a living environment: collection of materials of the XXI International scientific conference]. Moscow, 2018, pp. 214–216. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35151417&selid=35151488> (accessed 18.07.2024) (In Russian).
43. Biryukov V. G., Mishkov S. N., Sobolev A. V. Fire-retardant laminated wood-based materials. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya* [Fires and emergencies: prevention, liquidation], 2014, no. 3, pp. 28–31. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ognезaschischyonnyekleyonye-materialy-na-osnove-drevesiny/viewer> (accessed 18.07.2024) (In Russian).

44. Skakunov A. S., Tsirkina O. G. Fire resistance of wood and ways to increase it. *Sovremennyye pozharobezopasnyye materialy i tekhnologii: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern fireproof materials and technologies: collection of materials of the VI International scientific-practical conference]. Ivanovo, 2023, pp. 392–396. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=62055430> (accessed 19.07.2024) (In Russian).
45. Varankina G. S., Rusakov D. S., Artemenkov A. M. Strength of adhesive joints under extreme operating conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2021, no. 10, pp. 25–28. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=46695143> (accessed 02.08.2024) (In Russian).
46. Konyakhina O. V., Leonovich O. K. New hardener and formaldehyde acceptor for urea-formaldehyde resins from wood waste from hydrolysis production. *Les – Nauka – Innovatsii – 2022: tezisy dokladov Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma po lesopromyshlennomu obrazovaniyu* [Forest – Science – Innovation – 2022: abstracts of reports of the International Youth Forum on timber industry education], Minsk, 2022, pp. 243–247 (In Russian).
47. Leonovich O. K., Konyakhina O. V. Efficiency of using depolymerized hydrolytic lignins in plywood production. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forest Engineering, Materials Science, and Design: proceedings of the 87th scientific and technical conference of faculty, researchers, and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 176–179 (In Russian).
48. Konyakhina O. V. Application of compositions of depolymerized hydrolytic lignins in the production of panel materials. *74-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya uchashchikhsya, studentov i magistrantov: tezisy dokladov* [74th scientific and technical conference of students, students and undergraduates: abstracts]. Minsk, 2023, pp. 150–153 (In Russian).
49. Leonovich O. K., Bazhelka I. K., Konyakhina O. V. Reducing formaldehyde emissions from waterproof plywood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 1 (240), pp. 194–200 (In Russian).

Информация об авторах

Леонович Олег Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: OKL2001@mail.ru

Коняхина Ольга Вадимовна – магистрант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ikarija88@mail.ru

Information about the authors

Leonovich Oleg Konstantinovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: OKL2001@mail.ru

Konyakhina Olga Vadimovna – Master's degree student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ikarija88@mail.ru

Поступила 24.10.2024

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ	5
Пушкин А. А., Коцан В. В., Толкач И. В., Сидельник Н. Я., Севрук П. В. Методика прогноза развития лесных пожаров на основе геоинформационных систем.....	5
Толкач И. В., Таркан А. В., Коцан В. В., Пушкин А. А., Цай С. С. Таблицы динамики средних таксационных показателей чистых модальных сосняков Беларуси.....	15
ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО	24
Гарбарук Д. К., Углынец А. В., Судник А. В. Состояние чистых древостоев сосны на юго-востоке Беларуси в условиях отсутствия лесохозяйственной деятельности	24
ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ.....	37
Татун Е. В., Носников В. В. Влияние предпосевной обработки семян березы повислой (<i>Betula pendula</i>) на всхожесть и биометрические показатели посадочного материала.....	37
ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	48
Сазонов А. А., Нестюк А. М., Бабуль Д. А., Богаченко П. А., Жданович С. А., Зур А. С., Пацукевич П. В. Диагностика гнилевых болезней в ельниках Беларуси	48
ТУРИЗМ И ЛЕСООХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО.....	59
Смолярко Е. О., Юшкевич Н. Т. Опыт использования фотоловушек в целях мониторинга животного мира на примере локальной популяций барсука (<i>Meles meles</i>).....	59
ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	69
Насковец М. Т., Ким Ю. А., Штепа В. Н., Тявловская Т. М., Жлобич П. Н. Оценка влияния лесных колесных движителей на работоспособность грунтовых поверхностей подъездных путей	69
Дупанов С. А., Леонович О. К., Божелко И. К., Генюш И. В. Подготовка и консервация археологической древесины на «Археологическом комплексе: городище, селище» (X–XI, XVII–XIX вв.).....	75
Шошин А. О., Штоллманн В., Ярмолик С. В. Обоснование параметров мобильной канатной трелевочной установки для заболоченных условий	83
ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	97
Расолько В. Э., Дубоделова Е. В. Методы и средства управления на деревообрабатывающих предприятиях.....	97
Патко Ч., Пастори З., Божелко И. К., Мелешко О. В., Туфа М. Древесина как строительный материал с низким уровнем выбросов	105
Леонович О. К., Коняхина О. В. Анализ влияния антипиренов на отверждение клеев в производстве фанеры.....	114

CONTENTS

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY	5
Pushkin A. A., Kotsan V. V., Tolkach I. V., Sidelnik N. Ya., Sevruck P. V. The methodology for forecasting the progression of forest fires based on geoinformation systems	5
Tolkach I. V., Tarkan A. V., Kotsan V. V., Pushkin A. A., Tsai S. S. Tables of dynamics of average taxation indexes of pure modal pine forests of Belarus	15
FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE	24
Garbaruk D. K., Uglyanets A. V., Sudnik A. V. The state of pure pine stands in the south-east of Belarus in the absence of forestry activity	24
FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING	37
Tatun Ya. U., Nosnikov V. V. Effect of preparation of silver birch (<i>Betula pendula</i>) seeds for sowing on sowing qualities and biometric parameters of seedlings	37
FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING	48
Sazonov A. A., Nestyuk A. M., Babul' D. A., Bogachenko P. A., Zhdanovich S. A., Zur A. S., Patsukevich P. V. Diagnostics of rott diseases in spruce forests of Belarus	48
TOURISM AND FOREST HUNTING	59
Smolyarko E. O., Yushkevich N. T. Camera trapping experience in wildlife monitoring by example of badger (<i>Meles meles</i>) settlement	59
TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS	69
Naskovets M. T., Kim Yu. A., Shtepa V. N., Tyavlovskaya T. M., Zhlobich P. N. Assessment of the impact of forest wheel movers on the operability of the dirt surfaces of access roads	69
Dupanov S. A., Leonovich O. K., Bazhelka I. K., Genyush I. V. Preparation and conservation of archaeological wood at the "Archaeological Complex: hillfort, settlement" (X–XI, XVII–XIX centuries)	75
Shoshyn A. A., Štollmann V., Yarmolik S. V. Determination of parameters of a mobile cable skidding unit for waterlogged forest areas	83
WOODWORKING INDUSTRY	97
Rasolko V. E., Dubodelova E. V. Methods and means of management in woodworking enterprises	97
Patko Cs., Pásztor Z., Bazhelka I., Mialeshka V., Tufa M. Wood as a low emission building material	105
Leonovich O. K., Konyakhina O. V. Analysis of the influence of fire retardants on the curing of adhesives in plywood production	114

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *Д. А. Кускильдина*
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 15.01.2024. Формат 60×84¹/₈.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 14,8. Уч.-изд. л. 15,8.
Тираж 43 экз. Заказ 12.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
ЛП № 38200000001984.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.