

ISSN 2519-402X



ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал



Серия 1

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО,
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ПЕРЕРАБОТКА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ

№ 1 (276) 2024 год

Рубрики номера:

Управление лесами, лесоустройство
и информационные системы в лесном хозяйстве

Лесная экология и лесоводство

Лесовосстановление и лесоразведение

Лесозащита и садово-парковое строительство

Лесопромышленный комплекс.

Транспортно-технологические вопросы

Деревообрабатывающая промышленность



Минск 2024

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 (276) 2024 год

Выходит два раза в год

Минск 2024

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

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

Редакционная коллегия журнала:

Жарский И. М., кандидат химических наук, профессор (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Черная Н. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Прокопчук Н. Р., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Водопьянов П. А., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор философских наук, профессор, Республика Беларусь;
Новикова И. В., доктор экономических наук, профессор, Республика Беларусь;
Наркевич И. И., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Куликович В. И., кандидат филологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Барчик Стэфан, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Харша Ратнавир, доктор наук, профессор, Королевство Норвегия;
Кох Барбара, доктор наук, профессор, Федеративная Республика Германия;
Щекин А. К., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Российская Федерация;
Маес Воутер, доктор химических наук, профессор, Королевство Бельгия;
Бир Петр, доктор технических наук, профессор, Республика Польша;
Горинштейн Ш., доктор наук, профессор, Государство Израиль;
Эркаев А. У., доктор технических наук, профессор, Республика Узбекистан;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Каклаускас А., доктор экономических наук, профессор, Литовская Республика;
Каухова И. Е., доктор фармацевтических наук, профессор, Российская Федерация;
Жантасов К. Т., доктор технических наук, профессор, Республика Казахстан;
Хассель Л. Г., доктор наук, профессор, Королевство Швеция;
Флюрик Е. А., кандидат биологических наук, доцент (секретарь), Республика Беларусь.

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;
Звягинцев В. Б., кандидат биологических наук, доцент, 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;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Парфенов В. И., академик НАН Беларуси, доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Булавик И. М., доктор сельскохозяйственных наук, Республика Беларусь;
Кох Барбара, доктор наук, профессор, Федеративная Республика Германия;
Герц Э. Ф., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Пайвинен Ристо, доктор наук, профессор, Финляндская Республика;
Саевич К. Ф., доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Сарнацкий В. В., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Валентиниане Инга, кандидат технических наук, доцент, Литовская Республика;
Усень В. В., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Республика Беларусь;
Коробко Е. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Вавилов А. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Бир Петр, доктор технических наук, профессор, Республика Польша;
Барчик Стэфан, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Петр Коледа, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Золтан Пастори, доктор наук, профессор, Венгрия;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Богданович Н. И., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Латышевич И. А., кандидат технических наук, доцент (ответственный секретарь), Республика Беларусь;
Гордей Д. В., кандидат биологических наук (секретарь), Республика Беларусь.

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 (276) 2024

Published biannually

Minsk 2024

Publisher – educational institution “Belarusian State Technological University”

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

Editorial (Journal):

Zharskiy I. M., PhD (Chemistry), Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;
Chernaya N. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Prokopchuk N. R., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Republic of Belarus;
Vodop’yanov P. A., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Philosophy), Professor, Republic of Belarus;
Novikova I. V., DSc (Economics), Professor, Republic of Belarus;
Narkevich I. I., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Kulikovich V. I., PhD (Philology), Associate Professor, Republic of Belarus;
Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Barčík Štefan, DSc, Professor, Slovak Republic;
Harsha Ratnaweera, DSc, Professor, Kingdom of Norway;
Koch Barbara, DSc, Professor, Federal Republic of Germany;
Shchekin A. K., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Russian Federation;
Maes Wouter, DSc (Chemistry), Professor, Kingdom of Belgium;
Beer Piotr, DSc (Engineering), Professor, Republic of Poland;
Gorinshteyn Sh., DSc, Professor, State of Israel;
Erkayev A. U., DSc (Engineering), Professor, Republic of Uzbekistan;
Bashkirov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Kaklauskas A., DSc (Economics), Professor, Republic of Lithuania;
Kaukhova I. E., DSc (Pharmaceutics), Professor, Russian Federation;
Zhantasov K. T., DSc (Engineering), Professor, Republic of Kazakhstan;
Hassel L. G., DSc, Professor, Kingdom of Sweden;
Flyurik E. A., PhD (Biology), Associate Professor (secretary), Republic of Belarus.

Editorial (Issue):

Chernaya N. V., DSc (Engineering), Professor (managing editor), Republic of Belarus;
Kozlov N. G., DSc (Chemistry), Professor (sub-editor), Republic of Belarus;
Zvyagintsev V. B., PhD (Biology), Associate Professor, 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;
Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Parfenov V. I., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;
Bulavik I. M., DSc (Agriculture), Republic of Belarus;
Koch Barbara, DSc, Professor, Federal Republic of Germany;
Gerts E. F., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Paivinen Risto, DSc, Professor, Republic of Finland;
Saeovich K. F., DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;
Sarnatskiy V. V., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Valentiniane Inga, PhD (Agriculture), Associate Professor, Republic of Lithuania;
Usenya V. V., DSc (Agriculture), Professor, Republic of Belarus;
Korobko E. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Vavilov A. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Beer Piotr, DSc (Engineering), Professor, Republic of Poland;
Barčík Štefan, DSc, Professor, Slovak Republic;
Petr Koleda, DSc, Professor, Slovak Republic;
Zoltán Pásztory, DSc, Professor, Hungary;
Bashkirov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Bogdanovich N. I., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Latyshevich I. A., PhD (Engineering), Associate Professor (executive editor), Republic of Belarus;
Gordey D. V., PhD (Biology) (secretary), Republic of Belarus.

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, В. П. Машковский,
Н. Я. Сидельник, П. В. Севрук**

Белорусский государственный технологический университет

БАЗА ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В рамках разработки методических рекомендаций по прогнозированию распространения лесных пожаров одним из первых этапов работ является создание базы данных с их детальной характеристикой. С целью определения объектов исследований проведен анализ зарегистрированных лесных пожаров на основании ведомственной документации Министерства лесного хозяйства и Министерства по чрезвычайным ситуациям. Полевые исследования охватили 10 лесохозяйственных учреждений Министерства лесного хозяйства. В полевых условиях на основании предварительно подготовленных картографических материалов с помощью GNSS-приемника проводилась съемка фактических границ пожаров и уточнялись таксационные характеристики древостоев. В камеральных условиях на основании пространственного анализа определялась ближайшая к месту возгорания метеорологическая станция и по времени начала тушения и ликвидации лесного пожара собиралась информация о метеорологических показателях во время распространения лесного пожара. Вся собранная информация накапливается в базе данных и разделяется на 3 части: метеорологические данные, лесоводственно-таксационные данные и общие данные о лесном пожаре. Подготовленная база данных включает в себя детальную характеристику 101 лесного пожара, произошедшего в лесном фонде Республики Беларусь за 2018–2022 гг. Собранные в полевых условиях характеристики позволяют с различных сторон рассмотреть процесс распространения лесного пожара и разработать алгоритмы их прогнозирования. Методика предусматривает совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах. Данный подход позволит постоянно увеличивать точность пространственно-временного моделирования возможного развития лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар, лесное насаждение, математическая модель, база данных, метеорологические показатели, эллиптическая модель, информационная система.

Для цитирования: Пушкин А. А., Коцан В. В., Машковский В. П., Сидельник Н. Я., Севрук П. В. База данных характеристик лесных пожаров // 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.

**A. A. Pushkin, V. V. Kotsan, V. P. Mashkovsky,
N. Ya. Sidelnik, P. V. Sevruck**

Belarusian State Technological University

THE DATABASE OF THE FOREST FIRE CHARACTERISTICS

As part of the development of methodological recommendations for predicting the spread of forest fires, one of the first stages of work is the creation of a database with their detailed characteristics. In order to identify research objects, an analysis of registered forest fires was carried out on the basis of departmental documentation

of the Ministry of Forestry and the Ministry of Emergency Situations. Field research covered ten forestry institutions of the Ministry of Forestry. In the forest, based on previously prepared cartographic materials, the actual boundaries of the fires were surveyed using a GNSS receiver and the taxational stands characteristics were clarified. In the office conditions, based on the spatial analysis, the meteorological station closest to the place of forest ignition was determined and based on the time of the start of extinguishing and eliminating the forest fire, information about meteorological indicators during the spread of the forest fire was collected. All collected information is accumulated in the database and divided into three parts: meteorological data, forestry and taxation data and general data on forest fire. The prepared database includes a detailed description of 101 forest fires that occurred in the forest fund of the Republic of Belarus for the period 2018–2022. The characteristics collected in the field will allow us to consider the process of spreading a forest fire from different sides and develop algorithms for their forecasting. The methodology provides for the improvement of computational algorithms, taking into account subsequent updates of the database, which includes new information about fires occurring in the forest fund. This approach will allow to constantly increase the accuracy of the spatio-temporal modeling of the possible development of forest fires.

Keywords: forest fire, forest stand, mathematical model, database, meteorological indicators, elliptical model, information system.

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

Введение. Пожары являются одним из наиболее значимых факторов, оказывающих негативное воздействие на состояние, динамику, экологическое равновесие лесных фитоценозов и причиняющих лесному хозяйству значительный материальный и экологический ущерб.

Лесные насаждения Республики Беларусь в силу своего возрастного и породного состава, сильного антропогенного воздействия потенциально пожароопасны (более 70% лесов отнесены к наиболее пожароопасным I–III классам природной пожарной опасности) [1]. Так, за 2022 г. в лесном фонде произошло 593 лесных пожара общей площадью 454,7 га, средняя площадь пожара составила 0,77 га [2].

Одним из наиболее эффективных инструментов по минимизации ущерба от лесного пожара является оперативное принятие мер для ликвидации возгораний на основании прогноза его развития.

Математическое моделирование лесных пожаров является одной из самых сложных областей моделирования в силу многообразия и сложности физических процессов, протекающих в зоне пожара и в атмосфере над пожаром, а также из-за влияния погодных условий, возможного распространения пожара на большой площади и других факторов [3, 4].

Конечной целью проведения исследований и разработок базы данных характеристик лесных пожаров является разработка методических рекомендаций по прогнозированию их развития с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий, определяющих порядок моделирования развития поверхностных пожаров, возникающих на территории земель лесного фонда. В основу разработки положена

концепция эллиптической модели распространения лесного пожара, расположение и размеры которой определяются в зависимости от лесоводственно-таксационных характеристик лесных насаждений по данным лесоустройства и метеорологических показателей, определяемых по ближайшей к зарегистрированному возгоранию метеостанции. Определение координат потенциальных возгораний на территории лесного фонда предусматривается на основе использования метеорологических космических аппаратов.

Основная часть. Первым этапом при разработке методики прогнозирования распространения лесных пожаров является сбор материалов о фактических возгораниях в лесном фонде и создание на их основе базы данных характеристик лесных пожаров.

База данных должна стать информационной платформой разработки и совершенствования методических рекомендаций прогнозирования развития лесных пожаров и формируется с целью создания моделей развития лесных пожаров и повышения их прогностической точности.

Основными требованиями, предъявляемыми к создаваемой базе данных характеристик лесных пожаров, являются: содержание показателей, оказывающих влияние на скорость распространения лесных пожаров; возможность непосредственного определения используемых показателей по данным лесохозяйственных учреждений, лесоустройства, метеорологических станций, а также измерений в полевых условиях; наращивание объемов данных путем добавления показателей новых лесных пожаров.

На этапе подготовительных работ был проведен анализ всей имеющейся информации о

лесных пожарах из отчетности Министерства по чрезвычайным ситуациям и Министерства лесного хозяйства РБ. Дополнительно использовались данные о тепловых аномалиях, зафиксированных космическими летательными аппаратами (MODIS и др.) [5, 6]. На основании этих данных за период 2018–2022 гг. был подготовлен точечный векторный слой, с помощью которого подбирались объекты для проведения полевых исследований (рис. 1). Проведенный анализ картографических материалов выявил лесохозяйственные учреждения, на территории которых наиболее целесообразно проводить полевые исследования по сбору экспериментальных данных.

В лесхозах изучались книги учета и акты о лесных пожарах, на основании которых собрана информация по адресной привязке зарегистрированных пожаров (лесничество, квартал, выдел), а также данные о виде пожара, дате и времени его обнаружения, времени начала тушения пожара и его ликвидации. Эти данные легли в основу списка объектов для полевых исследований.

Для каждого лесхоза в геоинформационной системе QGIS готовился отдельный проект, который включал векторные лесные карты и атри-

бутивные данные с повыделной характеристикой таксационных выделов [7]. С целью использования в полевых исследованиях все проекты сохранялись в памяти мобильных устройств и через приложения QField применялись для поиска затронутых пожарами лесных насаждений на местности [8]. Пример сформированной карты, используемой для поиска объектов и проведения полевых исследований, представлен на рис. 2.

При проведении полевых обследований границы мест возникновения лесных пожаров легко опознаваемы по следам нагара на стволах хвойных пород, сохраняющимся до 4 лет. В большинстве случаев границы лесных пожаров опахивались плугом ПКЛ-70, что упрощало их установление.

Для точного картографирования границ лесных пожаров использовался GNSS приемник Triumph-2 [9]. Картирование проводилось в кинематическом режиме с интервалом записи данных 1 с (рис. 3).

Эти фотографии позволили уточнить характеристику горючих материалов на участках, пройденных лесными пожарами, для их дальнейшей классификации.

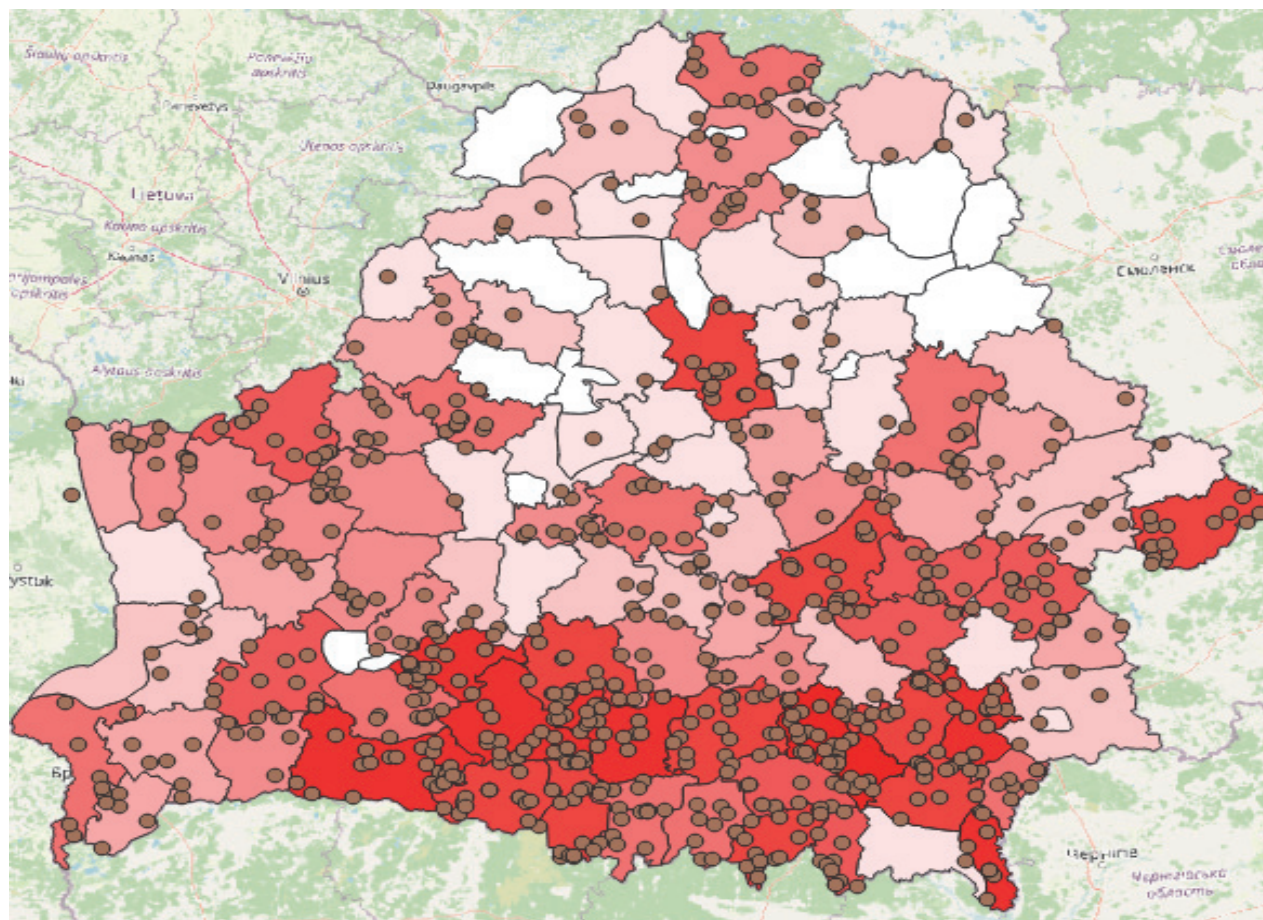


Рис. 1. Тематическая карта государственных лесохозяйственных учреждений по количеству зафиксированных на их территории лесных пожаров (за 2018–2022 гг.)



Рис. 2. Фрагмент карты полевых исследований на территории Бобруйского лесхоза

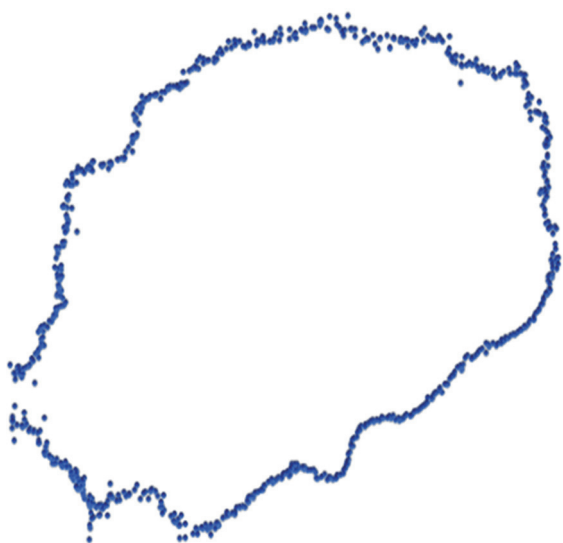


Рис. 3. Точечный векторный слой границ лесного пожара, снятый приемником Triumph-2

Каждый контур лесного пожара записывался в отдельный файл и при дальнейшей обработке в QGIS формировались полигональные объекты всех обследуемых лесных пожаров.

Также при проведении полевых исследований проводилась фотосъемка последствий лесных пожаров с привязкой к геопространственной основе и последующее создание проектов в QGIS (рис. 4).

В процессе полевых работ проведено обследование и картирование границ пожаров в лесных насаждениях разного возраста, породного состава и типов условий местопроизрастания.

Вся собранная полевая информация была обработана и помещена в базу данных характеристик лесных пожаров.



Рис. 4. Последствия низового пожара в средневозрастном сосновом насаждении

Таким образом, были подготовлены материалы и проведены полевые изыскания на территории 10 лесохозяйственных учреждений, подведомственных Министерству лесного хозяйства Республики Беларусь: Бобруйского, Борисовского, Вилейского, Воложинского, Любанского, Пуховичского, Стародорожского, Столбцовского, Старобинского и Червеньского лесхозов.

Подготовленная на основании собранной информации база данных состоит из следующих информационных компонентов (рис. 5):

- метеорологические данные;
- лесоводственно-таксационные данные;
- общие данные о лесном пожаре.

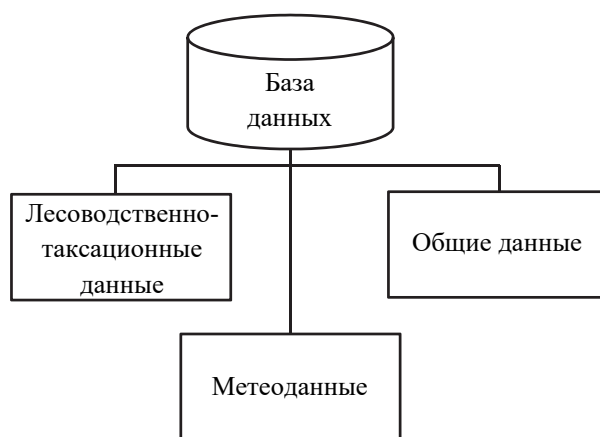


Рис. 5. Схема информационных компонентов базы данных лесных пожаров

Метеорологические данные, вносимые в базу, отбирались на основании даты и времени возникновения и ликвидации лесного пожара по информации, которая регистрировалась ближайшей к лесному пожару метеостанцией [10, 11] и определялась на основании пространственного анализа. На начальном этапе обработки собранных данных проводился корреляционный анализ, в результате которого были отобраны показатели, имеющие наибольшее влияние на скорость распространения фронта пожара:

- скорость ветра;
- направление ветра (румб направления, откуда дует ветер);
- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- накопленное количество осадков за сутки;
- дата схода снежного покрова.

Скорость ветра определяет соотношение сторон эллипса, в форме которого планируется моделировать распространение лесного пожара. Также при распространении пожара на открытых участках скорость ветра имеет на него прямое влияние, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции при статистическом анализе.

Направление ветра используется для определения размещения эллипса лесного пожара в пространстве. Длинная ось эллипса размещается по направлению ветра.

Остальные метеорологические показатели используются для определения индекса влажности топлива. Он представляет собой влажность подстилки и других видов топлива и оценивает относительную легкость воспламенения и воспламеняемость топлива в полдень [12].

Лесоводственно-таксационные данные, которые заносятся в создаваемую базу данных, включают лесоводственно-таксационную характеристику лесных насаждений, затронутых лесными пожарами. Выделы определялись на основании оверлейных операций при наложении контура лесного пожара на слой лесотаксационных выделов. Далее устанавливалась доля каждого выдела в общей площади лесного пожара. Для каждого выдела, затронутого пожаром, из лесоустроительных данных в базу записывались следующие показатели:

- вид земель;
- преобладающая порода;
- коэффициент состава преобладающей породы;
- возраст.

Для контроля собранных данных перечисленные таксационные показатели уточнялись при натурном обследовании пожарищ, так как они определяют качественные и количественные характеристики лесных горючих материалов [13–15].

Вид земель участка, на котором произошел лесной пожар, используется для его отнесения к покрытым и не покрытым лесом землям. Вид зе-

мель определяет механизм влияния ветра на скорость распространения пожара на открытых и закрытых участках местности.

В пределах покрытых лесом земель на основании преобладающей породы, коэффициента состава и возраста вносимые в базу данных насаждения классифицируются по группе накопленных в них горючих материалов.

В результате предварительного анализа собранных экспериментальных данных было выделено 10 категорий объектов моделирования, для которых существует статистическое различие в топливных ресурсах и влиянии метеорологических показателей на скорость распространения лесного пожара:

- сосновые молодняки весной и осенью (до 20 лет);
- сосновые молодняки летом (до 20 лет);
- сосновые насаждения весной и осенью (20 лет и старше);
- сосновые насаждения летом (20 лет и старше);
- еловые насаждения весной и осенью;
- еловые насаждения летом;
- лиственные лесные насаждения весной и осенью;
- лиственные лесные насаждения летом;
- не покрытые лесом земли (вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) весной и осенью;
- не покрытые лесом земли (вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) летом.

Также для определения возможных препятствий развития лесного пожара как естественного, так и искусственного происхождения предусматривается использование векторных картографических слоев, отображающих размещение квартальных просек, дорог, рек, ручьев, каналов, противопожарных разрывов и минерализованных полос.

Общие данные о лесном пожаре – это характеристики пожара, используемые для расчета его фактической скорости. Они включают следующие показатели (таблица):

- дата возникновения пожара;
- площадь лесного пожара на начало тушения;
- площадь лесного пожара на момент ликвидации;
- время начала тушения;
- время ликвидации;
- отношение осей эллипса;
- расстояние, пройденное лесным пожаром с момента возгорания до начала тушения (длина большей полуоси эллипса пожара на момент начала тушения);
- расстояние, пройденное пожаром с момента возгорания до ликвидации (длина большей полуоси эллипса пожара на момент ликвидации);
- максимальная скорость фронта пожара.

Фрагмент данных об общих показателях лесных пожаров

Наименование лесхоза	Дата возникновения пожара	Время начала тушения	Время ликвидации	Длительность пожара, мин	Площадь пожара на начало тушения, га	Площадь пожара на момент ликвидации, га	Полуось эллипса ликвидации (a_2), м	Полуось эллипса ликвидации (b_2), м	Полуось эллипса начала тушения (a_1), м	Полуось эллипса начала тушения (b_1), м	Максимальная скорость пожара, м/мин	Доля выдела в площади пожара, %
1. Бобруйский	01.07.19	13:30	14:10	40	0,2	0,5	44,71	35,61	28,28	22,52	0,33	0,25
2. Вилейский	06.08.20	14:20	17:10	170	0,5	1,8	75,71	75,71	39,90	39,90	0,21	0,32
3. Столбцовский	07.04.20	16:30	17:28	58	1,1	2,9	119,56	77,24	73,64	47,57	0,51	0,95
4. Любанский	28.03.20	13:51	14:33	42	0,2	0,2	28,28	22,52	28,28	22,52	0,00	1,00

На основании даты возникновения пожара определяется сезон: весна, осень или лето. Накопленный материал показывает, что при одних и тех же метеорологических показателях, и лесотаксационных характеристиках участка возгорания средняя скорость весеннего (осеннего) лесного пожара значительно выше этого показателя летом, что связано с наличием в летний период большого количества зеленой фитомассы, которая препятствует распространению огня. В весенний (осенний) период, наоборот, в лесном фонде скапливается большое количество горючих материалов, а полог древостоя становится более редким, что способствует проникновению ветра и увеличению скорости распространения огня.

Такие показатели, как площадь лесного пожара на начало тушения, площадь лесного пожара на момент ликвидации, время начала тушения, время ликвидации определялись на основании документации лесохозяйственных учреждений.

Отношение осей эллиптической модели распространения лесного пожара определяется на основании уравнения (1):

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

где LB – отношение большей оси эллипса к малой; v – скорость ветра, км/ч.

На основе значения скорости ветра, определяемой по ближайшей метеостанции, рассчитывается отношение большей оси эллипса к малой (LB). Полученное таким образом отношение осей заносится в базу данных как характеристика лесного пожара.

По данным о площади лесного пожара на момент начала тушения определяется значение большей полуоси эллипса на момент начала тушения лесного пожара. В формулу площади эллипса (2) подставляется значение большей полу-

оси (формула (4)), выраженное из формулы (3). В результате получается уравнение (5), из которого выражается значение малой полуоси эллиптической модели распространения лесного пожара (формула (6)):

$$S = \pi ab / 10\,000, \quad (2)$$

где S – площадь эллипса, га; a – длина большой полуоси, м; b – длина малой полуоси, м.

$$LB = a / b; \quad (3)$$

$$a = LB / b; \quad (4)$$

$$S = 2\pi b LB / 10\,000; \quad (5)$$

$$b = \sqrt{(10\,000 / \pi LB)}. \quad (6)$$

На основе значения малой полуоси с использованием уравнения (5) определяется значение большей полуоси, которое отражает расстояние, пройденное пожаром с момента возгорания до начала тушения (d_1).

По известной площади пожара на момент ликвидации таким же способом определяется значение большой полуоси эллипса ликвидации, которое является расстоянием, пройденным пожаром с момента возгорания до ликвидации (d_2). Рассчитанные значения расстояния, пройденного лесным пожаром, заносятся в базу данных характеристик лесных пожаров.

Скорость продвижения фронта пожара, рассчитанная только по данным, полученным в лесохозяйственных учреждениях на основании актов о лесных пожарах, будет иметь заниженное значение, поскольку в это время лесной пожар тушится и скорость его распространения снижается. Во избежание данной погрешности рассчитывается максимальная скорость распространения лесного пожара.

Для определения максимальной скорости используются элементы Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров CFFBPS [16]. Данная система прогнозирования была успешно адаптирована к условиям Российской Федерации сотрудниками Института космических исследований РАН [17].

Обследование пожаров в натуре позволяет определить расстояния, пройденные пожаром, к моменту их обнаружения и к моменту ликвидации. Используя эти данные, можно определить параметры модели изменения скорости распространения пожара.

Общий вид данной модели можно представить уравнением (7):

$$ROS_t = ROS_{eq} (1 - e^{-at}), \quad (7)$$

где ROS_t – скорость распространения кромки пожара, км/ч; ROS_{eq} – максимально возможная скорость распространения пожара, км/ч; a – коэффициент, характеризующий темп увеличения скорости распространения пожара на начальном этапе его развития; t – время, прошедшее с момента возникновения пожара, мин.

Характер изменения скорости распространения пожара, представленный данным уравнением, предполагает быстрое увеличение скорости на начальном этапе и дальнейшее ее замедление. Затем скорость распространения пожара медленно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимально возможному значению ROS_{eq} . Данная модель имеет два параметра. Первый (ROS_{eq}) представляет собой максимально возможную скорость распространения кромки пожара в данных условиях. Второй параметр (a) характеризует темп увеличения скорости распространения пожара на начальном этапе его развития.

К сожалению, имеющихся данных по каждому из пожаров недостаточно для того, чтобы определить оба параметра уравнения (7). В прогнозной модели динамики природных пожаров CFFBPS для объектов горения с открытым пологом известные экспериментальные данные показывали, что максимальная скорость горения (90% от максимально возможной скорости распространения кромки пожара в данных конкретных условиях) достигалась за период времени, составляющий от 10 до 40 мин. В среднем этот период составлял 20 мин. В связи с этим для параметра a в модели (7) использовалось значение 0,115. Тогда при величине аргумента $t = 20$ мин (время, прошедшее с момента возникновения пожара) скорость распространения кромки пожара (ROS_t) будет составлять 90% от максимально возможной величины (ROS_{eq}).

Для объектов горения с закрытым пологом ситуация была сложнее, потому что в таких объ-

ектах первоначально возникающие низовые пожары могли через некоторое время переходить в верховые. Это приводило к тому, что динамика скорости распространения кромки пожара характеризовалась двойственностью, так как максимально возможная скорость распространения низового и верхового пожаров разная. В результате время, необходимое для достижения максимально возможной скорости распространения пожара, было больше, чем для объектов с открытым пологом, и характеризовалось более высокой изменчивостью.

В Беларуси подавляющее большинство пожаров низовые, и данные, на основе которых проводятся исследования, относятся преимущественно к низовым пожарам. В связи с этим при настройке модели (7) на конкретные объекты использовалось значение параметра $\alpha = 0,115$.

Для определения величины второго параметра (ROS_{eq}) с помощью уравнения (7) получим выражение для расстояния, пройденного кромкой пожара за период времени t от момента возгорания. Для этого надо найти определенный интеграл от скорости распространения кромки пожара в интервале времени от 0 до t :

$$\begin{aligned} D_t &= \int_0^t (ROS_z) dz = \int_0^t ROS_{eq} (1 - e^{-az}) dz = \\ &= ROS_{eq} \left(t + \frac{e^{-at}}{a} \right) - ROS_{eq} \left(0 + \frac{e^{-a0}}{a} \right) = \\ &= ROS_{eq} \left(t + \frac{e^{-at}}{a} - \frac{1}{a} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где D_t – расстояние, пройденное пожаром за период времени t , прошедший от момента возгорания, м.

Для каждого пожара, информация о котором заносится в базу данных, известно расстояние, пройденное кромкой пожара за время, прошедшее от его начала до момента обнаружения пожара (d_1) и от возникновения до прекращения горения (d_2). Подставляя эти значения в уравнение (9), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} d_1 = ROS_{eq} \left(t_1 + \frac{e^{-at_1}}{a} - \frac{1}{a} \right), \\ d_2 = ROS_{eq} \left(t_2 + \frac{e^{-at_2}}{a} - \frac{1}{a} \right), \end{cases} \quad (9)$$

где t_1 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до момента его обнаружения, мин; t_2 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до момента его окончания, мин.

Разделив первое уравнение системы (9) на второе и учитывая, что период времени, прошедший от момента обнаружения пожара до прекращения горения, известен ($\Delta t = t_2 - t_1$), получим уравнение (10) с одним неизвестным t_1 :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1 + \frac{e^{-at_1}}{a} - \frac{1}{a}}{t_1 + \Delta t + \frac{e^{-a(t_1 + \Delta t)}}{a} - \frac{1}{a}}, \quad (10)$$

где d_1 – расстояние, пройденное пожаром за время от возгорания до момента начала тушения, м; d_2 – расстояние, пройденное пожаром от возникновения до прекращения горения (ликвидации пожара), м; t_1 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до момента его обнаружения (начала тушения), мин; a – параметр, равный 0,115, который приводит к тому, что при величине аргумента $t_1 = 20$ мин (время, прошедшее с момента возникновения пожара) скорость его распространения будет составлять 90% от максимально возможной величины; Δt – период времени, прошедший от момента обнаружения пожара до прекращения горения (ликвидации пожара), мин.

Таким образом, для каждого пожара, информация о котором заносится в базу данных, решалось уравнение (10) методом половинного деления [18]. Значение t_1 определялось с точностью до 30 с.

Выразив максимально возможную скорость распространения кромки пожара из первого уравнения системы (9), получим формулу (11) для вычисления параметра (ROS_{eq}):

$$ROS_{eq} = \frac{d_1}{t_1 + \frac{e^{-at_1}}{a} - \frac{1}{a}}, \quad (11)$$

С помощью уравнения (11) максимальная скорость распространения лесного пожара (ROS_{eq})

вычислялась для всех объектов, включаемых в базу данных характеристик лесных пожаров.

Рассчитанные значения максимальной скорости распространения пожара (ROS_{eq}) вносятся в базу данных как общие показатели лесного пожара и в последующем используются при моделировании его скорости распространения.

Заключение. На данном этапе исследований проведены полевые изыскания и подготовлены экспериментальные данные по характеристике лесных пожаров, на основании которых создана база данных. Данная база будет использована в дальнейших исследованиях для проведения статистического анализа зависимости скорости распространения лесных пожаров от лесоводственно-таксационных и метеорологических показателей, которые лягут в основу алгоритмов расчета скорости распространения лесного пожара и определения параметров эллиптической модели его развития.

Подготовленная база данных включает в себя характеристику 101 лесного пожара, произошедшего в лесном фонде Республики Беларусь за 2018–2022 гг.

С целью повышения точности прогнозирования развития лесных пожаров целесообразно предусматривать совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах. Данный подход позволит постоянно увеличивать 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 // Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <https://www.mlh.by/press-service/news/9825/> (дата обращения: 13.09.2023).
3. Рихтер И. Э. Лесная пирология с основами радиэкологии: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 1996. 290 с.
4. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
5. MeteoEye Hotspots – сервис обнаружения тепловых аномалий. URL: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (дата обращения: 12.09.2023).
6. Карта пожаров: Продвинутое приложение для оперативного спутникового мониторинга пожаров. URL: <https://fires.ru/> (дата обращения: 12.09.2023).
7. Краткое введение в ГИС // QGIS Documentation. URL: https://docs.qgis.org/3.4/ru/docs/gentle_gis_introduction/vector_attribute_data.html (дата обращения: 27.08.2023).
8. QField: приложение. URL: <https://qfield.org/> (дата обращения: 13.09.2023).
9. Триумф-2 // JAVAD. URL: <https://www.javad.com/jgnss/products/receivers/triumph-2.html> (дата обращения: 12.09.2023).
10. Погода в 243 странах мира // Расписание Погоды. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 18.08.2023).
11. Леонович И. И. Метеорологические станции Республики Беларусь. Минск: БНТУ, 2013. 137 с.

12. Background Information // Canadian Wildland Fire Information System. 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: 13.09.2023).

13. Технические указания по заполнению карточек таксации при таксации леса. Минск: Белгослес, 2019. 125 с.

14. Справочник таксатора / В. С. Мирошников [и др.]. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.

15. Юркевич И. Д., Гельтман В. С. География, типология и районирование лесной растительности Беларуси. Минск: Наука и техника, 1965. 288 с.

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. Заварыкин В. М., Житомирский В. Г., Лапчик М. П. Численные методы. 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.by/press-service/news/9825/> (accessed 13.09.2023) (In Russian).

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

4. 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).

5. MeteoEye Hotspots – service for detection of the thermal anomalies. Available at: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (accessed 12.09.2023) (In Russian).

6. Fire Map: an advanced platform for operational satellite monitoring of fires. Available at: <https://fires.ru/> (accessed 12.09.2023) (In Russian).

7. Brief introduction to GIS. Available at: https://docs.qgis.org/3.4/ru/docs/gentle_gis_introduction/vector_attribute_data.html (accessed 27.08.2023) (In Russian).

8. QField: Application. Available at: <https://qfield.org/> (accessed 13.09.2023) (In Russian).

9. Triumph-2. Available at: <https://www.javad.com/jgnss/products/receivers/triumph-2.html> (accessed 12.09.2023) (In Russian).

10. Weather in 243 countries. Available at: <https://rp5.ru> (accessed 18.08.2023) (In Russian).

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

12. Background Information. Available at: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi?wbdisable=true#:~:text=The%20Fine%20Fuel%20Moisture%20Code,the%20flammability%20of%20fine%20fuel> (accessed 13.09.2023).

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

14. Miroshnikov V. S., Trull O. A., Yermakov V. E., Dol'skiy L. V., Kostenko A. G. *Spravochnik takstatora* [Taxi driver's directory]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p. (In Russian).

15. 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 tekhnika Publ., 1965. 288 p. (In Russian).

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., Loupian E. A. Regional optimization of the parameters of a forecast model of wildfires 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., Zhitomirskiy 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 (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: pushkin@belstu.by

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

Машковский Владимир Петрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mashkovsky@belstu.by

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

Сеvрук Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, 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

Mashkovsky Vladimir Petrovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Senior Researcher, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mashkovsky@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

Sevrup 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 15.10.2023

УДК 630*522:630*587.5

И. В. Толкач, Е. А. Шульга

Белорусский государственный технологический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ И ДИАМЕТРОВ КРОН ДЕРЕВЬЕВ
ПО ДАННЫМ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ**

Разработка методов таксации насаждений, основанных на передовых технологиях аэро- и космической съемок лесов, является одним из основных направлений современных научных исследований. Основная цель работы заключается в определении высот и диаметров кроны деревьев по материалам лидарной съемки, выполненной воздушным сканером AlphaAir 450, установленным на квадрокоптере Matrice 300 RTK на 3-осевом стабилизированном подвесе. Объектами исследования послужили насаждения сосны и пихты Центрального лесничества Негорельского учебно-опытного лесхоза. Обработка данных лазерного сканирования выполнялась в географической информационной системе SAGA. В результате исследования предложена методика обработки данных лазерного сканирования для определения высот и диаметров кроны деревьев; построены регрессионные уравнения связи между показателями, измеренными в ходе полевых работ, и показателями, полученными по данным лидарной съемки. В качестве регрессионного уравнения хорошие результаты аппроксимации показали линейные уравнения, коэффициент детерминации которых объясняет изменчивость высот и диаметров кроны деревьев не ниже 80,16 и 87,96% соответственно. Апробированная методика может быть использована для целей инвентаризации лесов и получения достаточно точных данных о труднодоступных насаждениях и лесах, загрязненных радионуклидами.

Ключевые слова: лазерное сканирование, высота дерева, диаметр кроны дерева, облако точек, цифровая модель высот.

Для цитирования: Толкач И. В., Шульга Е. А. Определение высот и диаметров кроны деревьев по данным лидарной съемки // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 15–21.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-2.

I. V. Tolkach, E. A. Shulga

Belarusian State Technological University

**DETERMINATION OF HEIGHTS AND DIAMETERS
OF TREE CROWNS FROM LIDAR DATA**

The development of methods of plantation taxation based on advanced technologies of aerial and space forest survey is one of the main directions of modern scientific research. The main objective of the work is to determine the heights and diameters of tree crowns based on lidar survey materials, performed by the AlphaAir 450 airborne scanner, mounted on a Matrice 300 RTK quadcopter on a 3-axis stabilized suspension. The objects of the study were pine and fir plantations of the Central Forestry Department of the Negorelsky experimental forestry. Processing of laser scanning data was carried out in the geographic information system SAGA. As a result of the study, the methodology of laser scanning data processing for determining the heights and diameters of tree crowns was proposed; regression equations of the relationship between the indicators measured during field work and the indicators obtained from lidar survey data were constructed. As a regression equation, linear equations showed good approximation results, the coefficient of determination of which explains the variability of tree crown heights and diameters not lower than 80.16 and 87.96%, respectively. The tested methodology can be used for the purposes of forest inventory and obtaining sufficiently accurate data on hard-to-reach plantations and forests contaminated with radionuclides.

Keywords: laser scanning, tree height, tree crown diameter, point cloud, digital elevation model.

For citation: Tolkach I. V., Shulga E. A. Determination of heights and diameters of tree crowns from lidar data. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 15–21 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-2.

Введение. В современном лесоустройстве и лесном хозяйстве Республики Беларусь широко используются материалы дистанционного зондирования, полученные с воздушных и космиче-

ских летательных аппаратов, а также ГИС-технологии, обеспечивающие обработку как цифровых снимков оптического диапазона, так и пространственных данных лазерного сканирования [1, 2].

Улучшение характеристик материалов дистанционного зондирования и появление новых типов пространственных данных открывает широкие возможности для управления природными ресурсами, включая решение задач инвентаризации и управления лесами. Сегодня большое количество исследований направлено на разработку методик обработки и применения материалов дистанционного зондирования для решения практических задач лесного хозяйства [3]. Для решения задач инвентаризации лесов рассматриваются материалы аэрофотосъемки [4], космической съемки [5], лазерной съемки [6].

Лазерное сканирование является одним из самых современных и производительных методов измерений и позволяет создавать цифровую трехмерную модель объекта, представив его набором точек с пространственными координатами. Технология основана на использовании новых геодезических приборов – лазерных сканеров, измеряющих координаты точек поверхности объекта со скоростью порядка нескольких десятков тысяч точек в секунду и формирующих набор данных, называемый «облаком точек». В процессе съемки для каждой из них записываются три координаты (XYZ) и численный показатель интенсивности отраженного сигнала в определенном спектральном диапазоне, который определяется свойствами поверхности сканируемого объекта [7]. К основным преимуществам данного метода можно отнести высокую производительность, детализацию и точность данных, возможность дистанционного использования оборудования и получения данных, а также снижение доли полевых работ в общих трудозатратах.

Исследования по использованию лазерного сканирования для получения таксационных характеристик отдельных деревьев и насаждений в Беларуси находятся на начальной стадии, хотя применение материалов лазерного сканирования в лесном хозяйстве позволит вывести изучение структуры лесных насаждений на принципиально новый уровень. В настоящее время существует ряд задач теоретического плана, без решения которых внедрение лидарной съемки в сферу лесного хозяйства и лесоустройства не обеспечит необходимую точность получаемых данных. А именно, требуется разработка методик обработки данных лазерного сканирования, практических рекомендаций по применению лазерной съемки для лесной таксации, регрессионных моделей связи между таксационными показателями, полученными в результате обработки данных лазерного сканирования и измеренными в полевых условиях.

Основная часть. Главной целью исследования является определение высот и диаметров

крон деревьев по материалам лазерного сканирования. В исследовании использованы материалы лидарной съемки части лесов Негорельского учебно-опытного лесхоза. Съемка выполнена воздушным сканером AlphaAir 450, конструктивно включающим сканирующую головку Livox Avia, высокоточный инерциальный модуль (IMU), встроенную 24-мегапиксельную камеру. Сканер AlphaAir 450 обеспечивает абсолютную точность от 5 до 10 см при шумах не более 30% [8]. Сканирование производится на большие расстояния (до 450 м) с высокой плотностью точек на измеряемой поверхности, которая при высоте полета 100 м составляет около 280 точек/м² [9]. Общая площадь отсканированного участка лесного фонда составила 50 га, съемка выполнена с высоты 100 м. В результате сканирования получено облако точек, средняя плотность которого с учетом перекрытий полос съемки составила 326 точек на 1 м².

Для получения таксационных показателей насаждений по материалам лазерного сканирования построена цифровая модель высот деревьев. В качестве программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования использована географическая информационная система SAGA (System for Automated Geo-Scientific Analysis), являющаяся свободно-распространяемым программным обеспечением (ПО) с открытым исходным кодом и обеспечивающая возможность редактирования пространственных данных. Благодаря совместной с Laserdata GmbH разработке, SAGA позволяет не только визуализировать, но и анализировать данные облака точек. Есть возможность для проведения классификации без обучения, выборки данных по заданному признаку, интерполяции с учетом количества зарегистрированных импульсов и диапазонов их значений [10]. Обработка данных лазерной съемки выполнена в несколько этапов.

Первичный анализ данных лазерного сканирования показал, что в соответствии с целью исследования (определение высот и диаметров крон деревьев) полученная плотность 326 точек на 1 м² является избыточной и может быть снижена. В связи с этим на первом этапе обработки данных лазерного сканирования произведен случайный отбор, после чего средняя плотность облака точек уменьшилась в 14 раз и составила 23 точки на 1 м². Данной плотности достаточно для проведения исследования [9].

На втором этапе исключены точки маршрута, не содержащие информацию о цвете, путем выборки пустых значений в поле Color, а также посредством селектирования удалены имеющиеся шумы и выбросы точек, высоты которых значительно отличались от средних высот

поверхности земли и полога древостоя. Оставшиеся точки классифицировались средствами программного обеспечения SAGA GIS по поверхности земли, и после дополнительного удаления выбросов и шумов формировалась векторная цифровая модель рельефа участка.

На следующем этапе векторная цифровая модель рельефа на основании средних значений точек преобразовывалась в растровый формат с размером ячеек 5,0×5,0 м. Формирование цифровой растровой модели поверхности полога древостоя производилось аналогичным способом, однако размер ячеек составлял 0,3×0,3 м и в качестве значения принималось максимальное.

Из-за неравномерной плотности облака точек полученные растры имели незаполненные участки. Образовавшиеся пустоты заполнялись с помощью инструмента Close Gaps (закрывать пробелы). На завершающем этапе был выполнен расчет раstra цифровой модели высот деревьев как разности цифровых моделей полога древостоя и рельефа с использованием калькулятора растров [11]. Измерения высот и диаметров крон деревьев по данным лазерного сканирования выполнялись средствами SAGA GIS.

Объектами исследования являлись одновозрастные насаждения сосны и пихты. Для получения истинных таксационных показателей насаждений на территории Центрального лесничества Негорельского учебно-опытного лесхоза было заложено 4 таксационно-дешифровочные пробные площади. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев на пробных площадях представлена в табл. 1.

Отвод и таксация пробных площадей выполнялись в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки» [12]. Пробная площадь закладывалась в наиболее однородной по таксационным показателям части выдела. На данной площади проводился сплошной пересчет деревьев по породам, ступеням толщины, качественным категориям и степени участия крон деревьев в формировании видимого на аэрофотоснимке полога древостоя.

На каждой пробной площади производился обмер учетных деревьев. У каждого дерева были измерены диаметры на высоте груди (d_m), высота дерева (h), диаметр кроны (d_k), высота до наибольшего диаметра кроны (h_{dk}), высота до начала кроны ($h_{нк}$), протяженность кроны (l_k), а также определены густота, вертикальная и горизонтальная формы крон [13]. Для измеренных деревьев на пробных площадях рассчитаны основные статистические показатели. Данные статистического анализа отображены в табл. 2. Анализ средних значений показывает занижение высот и диаметров крон деревьев по данным лазерного сканирования относительно показателей, измеренных на местности. Среднеквадратическое отклонение по всем показателям не превышает 2,30 м. Коэффициент вариации для измеренных высот деревьев и высот деревьев по данным лазерного сканирования изменяется от 5,69 до 9,19% и от 5,22 до 9,58% соответственно, для фактических диаметров крон и диаметров по данным лазерного сканирования – от 15,66 до 24,76% и от 15,91 до 24,76% соответственно. Асимметрия и эксцесс в выборках варьируют для высот от –2,79 до 1,77, для диаметров крон деревьев от –1,46 до 3,50.

Таблица 1

**Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев
на пробных площадях**

№ ПП	Квартал/ выдел	Площадь ПП, га	Тип леса	ТУМ	Характеристика по элементам леса							
					Элемент леса	Коэффициент участия, %	A, лет	H _{ср} , м	D _{ср} , см	П	Бонитет	M, м³/га
1	38/17	0,24	П. кис.	Д2	П	100	29	15,0	26,0	0,77	Ia	218
2	39/7	1,00	С. ор.	В2	С	66	75	29,2	32,8	0,42	Ia	219
					Е	13		20,3	18,2	0,12		44
					Б	20		28,8	29,7	0,16		67
					Итого по ПП № 2					100		
3	39/20	0,49	С. кис.	С2	С	100	71	27,3	31,3	0,84	Ia	400
4	39/24	0,77	С. кис.	С2	С	55	34	15,8	18,3	0,42	Ia	108
					Е	45		15,6	15,6	0,35		89
Итого по ПП № 4						100				0,77		197

Примечание. ПП – пробная площадь; ТУМ – тип условий местопроизрастания; A – возраст; $H_{ср}$ – средняя высота; $D_{ср}$ – средний диаметр; P – полнота; M – запас.

Таблица 2

**Основные статистические показатели распределения высот
и диаметров крон деревьев на ПП**

Параметры	Высота дерева по данным		Диаметр кроны дерева d_k	Диаметр кроны дерева по данным лазерного сканирования $d_{k, \text{las}}$
	полевых работ h	лазерного сканирования h_{las}		
ПП № 1				
Среднее значение, м	14,75	14,55	5,23	4,80
Среднеквадратическое отклонение, м	1,36	1,39	0,91	0,92
Коэффициент вариаций, %	9,19	9,58	17,47	19,25
Минимальное значение, м	12,00	11,60	3,00	2,50
Максимальное значение, м	17,80	17,70	8,80	8,10
Асимметрия	1,45	1,45	1,14	0,85
Экссесс	−1,23	−0,98	3,50	2,34
ПП № 2				
Среднее значение, м	30,72	30,71	5,07	4,83
Среднеквадратическое отклонение, м	1,85	1,89	0,79	0,77
Коэффициент вариаций, %	6,01	6,16	15,66	15,91
Минимальное значение, м	26,80	26,60	3,00	2,70
Максимальное значение, м	34,10	33,90	6,50	6,30
Асимметрия	−0,41	−1,32	−1,46	−1,54
Экссесс	−0,48	−0,28	0,77	1,32
ПП № 3				
Среднее значение, м	29,13	28,79	4,61	4,42
Среднеквадратическое отклонение, м	2,24	2,30	1,03	1,05
Коэффициент вариаций, %	7,69	7,99	22,26	23,68
Минимальное значение, м	21,8	21,10	3,00	3,00
Максимальное значение, м	32,9	33,10	7,80	7,80
Асимметрия	−2,79	−3,40	2,62	2,65
Экссесс	1,77	2,84	1,10	1,33
ПП № 4				
Среднее значение, м	17,70	16,92	4,40	3,98
Среднеквадратическое отклонение, м	1,01	0,88	1,09	0,99
Коэффициент вариаций, %	5,69	5,22	24,76	24,76
Минимальное значение, м	15,00	14,40	1,80	1,80
Максимальное значение, м	19,30	18,30	7,10	6,50
Асимметрия	−1,05	−1,47	0,03	0,86
Экссесс	0,02	0,16	1,03	1,04

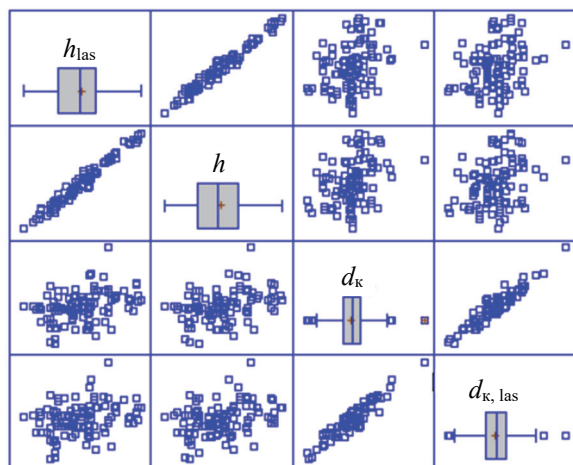
Также на всех пробных площадях для измеренных показателей и показателей по данным лазерного сканирования выполнен корреляционный анализ. Результаты корреляционного анализа для ПП № 1 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа ПП № 1

Параметры	h	h_{las}	d_k	$d_{k, las}$
h	1	0,986	0,346	0,274
h_{las}	0,986	1	0,366	0,298
d_k	0,346	0,366	1	0,938
$d_{k, las}$	0,274	0,298	0,938	1

Анализ табл. 3 показывает высокую зависимость между диаметрами крон деревьев, полученными в ходе полевых работ и определенными по данным лазерного сканирования. То же самое можно сказать и о зависимости между высотами. Наименьший коэффициент корреляции наблюдается между значениями высот и диаметров крон деревьев по данным лазерного сканирования. Целесообразно строить регрессионное уравнение между показателями с высоким коэффициентом корреляции. Корреляционная матрица для ПП № 1 отображена на рисунке, где наглядно показаны зависимости между показателями.



Корреляционная матрица для ПП № 1

Формирование моделей связи между данными, полученными в процессе лазерного сканирования и в полевых условиях, выполнено с использованием методов математической статистики. В ходе исследования апробированы различные функции: линейная, параболические функции 2-го и 3-го порядков [14, 15]. При моделировании связей между фактическими высотами деревьев и высотами, полученными по данным лазерного сканирования, а также между диаметрами крон в полевых условиях и по данным лазерного сканирования наилучшие результаты показывает линейная функция ($y = a + bx$). Параметры функции связи высот ($h = a + bh_{las}$) приведены в табл. 4, а параметры функции связи диаметров крон ($d_k = a + bd_{k, las}$) — в табл. 5.

Полученные уравнения значимы по коэффициенту Фишера. Все параметры приведенных уравнений весомы по t -критерию. Коэффициент детерминации для линейного уравнения связи высот варьирует от 80,16 до 97,25%. Стандартная ошибка изменяется от 0,23 до 0,88 м. Для линейного уравнения связи диаметров крон деревьев коэффициент детерминации изменяется в

диапазоне от 87,96 до 97,45%. Стандартная ошибка меняется от 0,17 до 0,32 м.

Регрессионное уравнение зависимости диаметров деревьев от их высот и диаметров крон, полученных по данным лазерного сканирования, имеют невысокий коэффициент детерминации (от 5 до 52%). Вероятно, это связано с тем, что выполнены измерения господствующих деревьев, имеющих приблизительно одинаковые размеры, кроны которых были хорошо видны как по трехмерным моделям полого древостоя, полученным на основе данных лазерного сканирования, так и на аэрофотоснимках в оптическом диапазоне.

Заключение. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы: 1) снижение количества точек лидарной съемки обеспечивает более высокую скорость обработки данных и получение достаточно точных значений высот и диаметров крон деревьев; 2) отмечается высокая корреляция между высотами по данным полевых работ и лазерного сканирования, а также между диаметрами крон измеренными и определенными по данным лазерного сканирования. В связи с этим целесообразно строить регрессионное уравнение между данными показателями. Низкая связь наблюдается между высотами, полученными в ходе полевых работ, и диаметрами крон деревьев по данным лазерного сканирования; 3) регрессионные уравнения связи характеризуются высоким коэффициентом детерминации: для высот — от 80,16 до 97,25%, для диаметров крон — от 87,96 до 97,45%, и невысокой стандартной ошибкой: для высот — от 0,23 до 0,88 м, для диаметров крон деревьев — от 0,17 до 0,32 м; 4) высоты и диаметры крон деревьев могут быть получены с высокой точностью на основе регрессионных моделей связи с показателями, измеренными на цифровой растровой модели высот деревьев, а также определенными по апробированной в этом исследовании методике на основе данных лазерного сканирования.

Таблица 4

Параметры линейной функции связи высот ($h = a + bh_{las}$)

Параметры	ПП № 1	ПП № 2	ПП № 3	ПП № 4
Коэффициент a	0,803106	2,30492	2,83491	0,44164
Коэффициент b	0,958609	0,92528	0,89586	1,02020
Коэффициент детерминации R^2 , %	97,25	89,86	84,83	80,16
Критерий Фишера F	60,65	15,47	16,72	11,72
Стандартная ошибка SE , м	0,23	0,60	0,88	0,46

Таблица 5

Параметры линейной функции связи диаметров крон ($d_k = a + bd_{k, las}$)

Параметры	ПП № 1	ПП № 2	ПП № 3	ПП № 4
Коэффициент a	0,77774	0,20881	0,33194	0,19175
Коэффициент b	0,92894	1,00603	0,96798	1,05794
Коэффициент детерминации R^2 , %	87,96	94,85	97,45	91,51
Критерий Фишера F	27,57	22,30	43,75	19,14
Стандартная ошибка SE , м	0,32	0,18	0,17	0,32

Список литературы

1. Толкач И. В. Основные направления развития системы лесоустройства и методов инвентаризации лесов Беларуси // Труды БГТУ. 2015. № 1 (174): Лесное хоз-во. С. 50–53.
2. Переволоцкая Т. В. Геоинформационные системы в лесном хозяйстве. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. 40 с.
3. Толкач И. В., Саевич Ф. К. Спектральные и яркостные характеристики основных лесообразующих пород на снимках сканера LEICA ADS100 // Труды БГТУ. 2016. № 1 (183): Лесное хоз-во. С. 24–27.
4. Жирин В. М., Князева С. В., Эйлина С. П. Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat // Исследование земли из космоса. 2016. № 5. С. 10–20.
5. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев / В. Ф. Ковязин [и др.] // Изв. вузов. Лесной журн. 2020. № 6. С. 42–54.
6. Черниковский Д. М., Алексеев А. С. Определение средних высот и запасов древостоев на основе обработки информации топографической радарной съемки, цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // Тр. СПИИРАН. 2019. Вып. 18, т. 2. С. 416–443.
7. Руденко Ю. М., Богданец Е. С. Актуальность лидарной съемки на данном этапе развития лазерного сканирования // Технические науки – от теории к практике: материалы LVIII междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 20 апр. 2016 г. Новосибирск, 2016. № 5, ч. I. С. 20–29.
8. Воздушный сканер AlphaAir 450 // CHCNAV. URL: <https://www.chcnave.com/product-page/alphaair-450> (дата обращения: 31.01.2023).
9. Шульга Е. А., Толкач И. В. Распределение облака точек лидарной съемки в пологом и под пологом древостоев // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 478–481.
10. Открытая настольная ГИС SAGA – общая характеристика // GIS-Lab. URL: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (дата обращения: 02.10.2023).
11. Шульга Е. А. Построение цифровой модели высот по данным лазерного сканирования // Сб. науч. работ 74-й науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов, Минск. 17–22 апр. 2023. С. 22–24.
12. Пробные площади лесоустройственные. Метод закладки: ОСТ 56-69-83. М.: Стандарты, 1983. 23 с.
13. Толкач И. В. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве. Минск: БГТУ, 2012. 337 с.
14. Математические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В. Л. Черных [и др.] // ЛАНБ. Электронно-библиотечная система. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=39601 (дата обращения: 02.10.2023).
15. Ожич О. С., Толкач И. В., Коцан В. В. Использование регрессионных моделей для оценки таксационных показателей древостоев при аналитико-измерительном дешифрировании // Лесное хоз-во: материалы 84-й науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию юбилею БГТУ и Дню белорус. науки (с междунар. участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. Минск, 2020. С. 26–27.

References

1. Tolkach I. V. Main directions of development of forest inventory system and methods of forest inventory in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1 (174): Forestry, pp. 50–53 (In Russian).
2. Perevolotskaya T. V. *Geoinformatsionnyye sistemy v lesnom khozyaystve* [Geoinformation systems in forestry]. Gomel, GGU named after F. Skorina Publ., 2012. 40 p. (In Russian).
3. Tolkach I. V., Sayevich F. K. Spectral and brightness characteristics of the main forest-forming rocks on the LEICA ADS100 scanner images. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1 (183): Forestry, pp. 24–27 (In Russian).
4. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eidlina S. P. Assessment of the influence of tree canopy morphology and relief on the spectral characteristics of forests using Landsat data. *Issledovaniye zemli iz kosmosa* [Earth Exploration from Space], 2016, no. 5, pp. 10–20 (In Russian).
5. Kovyazin V. F., Vinogradov K. P., Kitsenko A. A., Vasilyeva E. A. Airborne laser scanning for specifying the taxation characteristics of forest stands. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [News of universities. Forest journal], 2020, no. 6, pp. 42–54 (In Russian).
6. Chernikhovskiy D. M., Alekseev A. S. Determination of average heights and reserves of forest stands on the basis of information processing of topographic radar survey, digital elevation models and GIS-technologies. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2019, issue 18, vol. 2, pp. 416–443 (In Russian).
7. Rudenko Yu. M., Bogdanets E. S. Relevance of lidar imaging at this stage of development of laser scanning. *Tekhnicheskkiye nauki – ot teorii k praktike: materialy LVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy*

konferentsii [Technical Sciences – from theory to practice: materials of the LVIII International scientific-practical conference]. Novosibirsk, 2016, no. 5 (53), part I, pp. 20–29 (In Russian).

8. AlphaAir 450 air scanner. Available at: <https://www.chcnv.by/product-page/alphaair-450> (accessed 31.01.2023) (In Russian).

9. Shulga E. A., Tolkach I. V. Distribution of lidar point cloud in the canopy and under the canopy of stands. *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 professors, research workers and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 478–481 (In Russian).

10. Open desktop GIS SAGA – general characteristic. Available at: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (accessed 02.10.2023) (In Russian).

11. Shulga E. A. Construction of the digital model of heights by laser scanning data. *Sbornik nauchnykh rabot 74-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii uchashchikhsya, studentov i magistrantov* [Collection of scientific works of the 74th scientific-technical conference of pupils, students and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 22–24 (In Russian).

12. OST 56-69-83. Sample areas of forest inventory. Method of laying. Moscow, Standarty Publ., 1983. 23 p. (In Russian).

13. Tolkach I. V. *Aerokosmicheskiye metody v lesnom khozyaystve* [Aerospace methods in forestry]. Minsk, BSTU Publ., 2012. 337 p. (In Russian).

14. Chernyh V. L., Vlasova N. A., Kiseleva N. G., Vorozhcov D. M. Mathematical methods in forestry and landscape construction. Available at: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=39601 (accessed 02.10.2023) (In Russian).

15. Ozhich O. S., Tolkach I. V., Kotsan V. V. Use of regression models to assess the taxation indices of forest stands during analytical and measurement interpretation. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 84-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letnemu yubileyu BGTU i Dnyu belorusskoy nauki (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forestry: materials of the 84th scientific and technical conference, dedicated to the 90th anniversary of the Belarusian State Technology University and the Day of Belarusian science (with international participation)]. Minsk, 2020, pp. 26–27 (In Russian).

Информация об авторах

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

Шульга Екатерина Александровна – магистрант кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: katherinashulga01@gmail.com

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

Shulga Ekaterina Alexandrovna – master's degree student, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katherinashulga01@gmail.com

Поступила 15.10.2023

ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО

FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE

УДК 614.841.42:630(476)

П. Н. Гоман

Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным
ситуациям Республики Беларусь

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Лесные пожары относятся к стихийным бедствиям, негативно воздействующим на природные экосистемы, экологию и окружающую среду. Вследствие пожаров наносится значительный экономический и социальный ущерб, уничтожается растительный и животный мир.

Лесной фонд Республики Беларусь в силу породного и типового состава является чрезвычайно пожароопасным. Структура и запас лесного горючего материала, его природная предрасположенность к воспламенению и поддержанию процесса горения способствуют возникновению пожаров и их развитию. Наиболее тяжелая ситуация с лесными пожарами складывается в пожароопасный сезон, когда погодные условия способствуют возникновению и развитию горения. Кроме того, на участках лесного фонда, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС и имеющих ограничения лесохозяйственной деятельности, происходит процесс накопления горючих материалов, что повышает риск возникновения крупных пожаров.

В результате проведенного анализа установлено, что основными природными факторами, влияющими на лесопожарную ситуацию, являются осадки, ветер, температура воздуха и рельеф местности. Осадки определяют влажность лесного горючего материала и его способность к воспламенению. Ветер повышает скорость распространения пожара. Температура окружающей среды в комплексе с глобальным потеплением климата влияют на возникновение и продолжительность пожароопасного сезона. Рельеф местности в зависимости от крутизны склона может как повышать интенсивность горения, так и понижать ее. Комплексное воздействие указанных факторов оказывает определяющее влияние на возникновение и развитие лесных пожаров в Республике Беларусь.

Ключевые слова: лесной пожар, природные экосистемы, продукты горения, глобальное потепление, противопожарная защита.

Для цитирования: Гоман П. Н. Факторы, определяющие возникновение и распространение лесных пожаров в Республике Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 22–30.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-3.

P. N. Goman

University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus

FACTORS DETERMINING THE OCCURRENCE AND THE SPREAD OF FOREST FIRES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Forest fires are natural disasters that negatively affect natural ecosystems, ecology and the environment. As a result of fires, significant economic and social damage is inflicted, flora and fauna are destroyed.

The forest fund of the Republic of Belarus, due to its species and type composition, is extremely fire hazardous. The structure and supply of forest combustible material, its natural predisposition to ignite and maintain the combustion process contribute to the occurrence of fires and their development. The most difficult situation with forest fires develops in the fire season, when weather conditions contribute to the emergence and development of combustion. In addition, in areas of the forest fund that have been exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant, in the conditions of limited forestry activities, there is a process of accumulation of combustible materials, which increases the risk of major fires.

As a result of the analysis, it was found that the main natural factors affecting the forest fire situation are precipitation, wind, air temperature and terrain. Precipitation determines the moisture content of forest combustible material and its ability to ignite. Wind speeds up the spread of fire. Ambient temperature in combination with global climate warming affect the occurrence and duration of the fire season. The terrain, depending on the steepness of the slope, can both increase the intensity of burning and lower it. The complex impact of these factors has a decisive influence on the occurrence and development of forest fires in the Republic of Belarus.

Keywords: forest fire, natural ecosystems, combustion products, global warming, fire protection.

For citation: Goman P. N. Factors determining the occurrence and the spread of forest fires in the Republic of Belarus. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 22–30 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-3.

Введение. В последние годы по причине глобального потепления климата в ряде стран мира, в том числе в Беларуси, обстановка с лесными пожарами особенно обострилась. Вследствие пожаров ухудшается экология регионов, уничтожаются природные экосистемы, населенные пункты, погибают спасатели и население. Особую опасность при этом представляют пожары на радиоактивно загрязненных территориях, составляющих около 16% лесного фонда Беларуси, которые приводят к повторной миграции радионуклидов, в том числе на территории соседних стран, что является серьезной международной проблемой [1]. За последние десять лет в Беларуси произошло более 6 тыс. лесных пожаров; площадь, пройденная огнем, превысила 33 тыс. га, что обуславливает необходимость повышения уровня противопожарной защиты лесов [2–4].

Основная часть. Важным направлением для оценки уровня пожарной опасности в лесу является определение факторов, влияющих на возникновение и распространение пожаров. На интенсивность горения в лесу оказывают влияние характеристики лесного горючего материала (далее – ЛГМ) (структура, запас, влажность, теплопроводная способность), а также осадки, ветер, температура воздуха, рельеф местности.

По характеру влияния на возникновение и распространение пожара ЛГМ подразделяют [5]:

- 1) на основные проводники горения;
- 2) материалы, поддерживающие горение;
- 3) материалы, задерживающие распространение горения.

К числу основных проводников горения относят мхи, лишайники, опад, сухостой, валежник, хвою крон насаждений. Материалами, поддерживающими горение, являются трава и кустарники, хвойный подрост и подлесок, которые могут отчасти повышать общую интенсивность пожара. Задерживать распространение огня в лесу склонны многолетний люпин, спирея, ольха серая, липа, осина и другие растения, которые из-за особенностей своего химического состава и высокого содержания влаги подавляют процесс горения и снижают общую интенсивность пожара [6].

Помимо вида склонной к горению растительности на возникновение и распространение лесных пожаров существенное влияние оказывает запас ЛГМ, а также его состояние. Возрастные и типологические параметры накопления горючих материалов в наиболее пожароопасных сосновых и еловых насаждениях Беларуси, включая сосняки на загрязненных радионуклидами территориях, исследованы В. В. Усеной. Так, по данным [6–8], наибольшее количество ЛГМ наземной группы установлено в сосновых насаждениях в возрасте от 31 до 40 лет, которое в абсолютно сухом состоянии в зависимости от типа леса составляет 1,5–2,8 кг/м², что отвечает усредненной толщине слоя в 3 см при его плотности 75 кг/м³. Меньшее количество горючего материала характерно для сосняка с лишайниковым покровом 0,9–1,5 кг/м². Для мшистого и верескового типов леса запас наземного горючего материала близок и варьируется от 0,8–2,4 до 1,1–2,7 кг/м² с увеличением возраста леса с 5 до 80 лет соответственно.

Формирование лесной подстилки происходит в течение первых десяти лет жизни насаждений и в дальнейшем напочвенный покров изменяется незначительно. В еловых древостоях запас напочвенного покрова выше, чем в сосновых, и для насаждений в возрасте 40–60 лет он достигает 4,4 кг/м². На территориях, загрязненных радионуклидами, из-за недостаточности профилактических мероприятий, запас ЛГМ наземной группы может достигать свыше 5,0 кг/м² [7]. По данным публикации [5], для Ленинградской, Новгородской, Архангельской и других областей европейской части России запас ЛГМ в сосняках лишайниковых колеблется в пределах 0,9–1,4 кг/м², что свидетельствует о схожести породного и типового состава лесов данных регионов с насаждениями Беларуси. В более влажных хвойных лесах Западной Сибири и Красноярского края запас напочвенного покрова сравним с запасом в сосновых лесах Беларуси возрастной категории 11–30 лет и составляет порядка 2,0 кг/м² [7, 9].

Таким образом, породный состав, тип и возраст леса, а также периодичность проведения

лесохозяйственных работ предопределяют формирование проводящего огонь напочвенного покрова и, как следствие, предрасположенность лесных территорий к возникновению и распространению пожаров.

Основными природными факторами, которые влияют на лесопожарную обстановку, являются осадки, ветер и температура воздуха.

Осадки определяют влажность ЛГМ в период пожароопасного сезона и играют важную роль в возникновении и распространении лесных пожаров. Кроме того, сведения об изменении влажности ЛГМ необходимы для решения ряда других вопросов, связанных с организацией охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. В отечественной и зарубежной литературе достаточно полно освещен вопрос о влиянии осадков на влажность ЛГМ [8, 10].

Так, на рис. 1 и 2 представлена влажность напочвенного покрова после осадков в лесу для двух типов соснового леса [10].

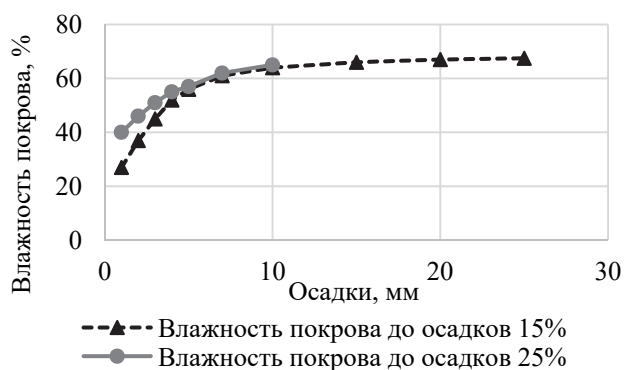


Рис. 1. Влажность лесного напочвенного покрова (лишайник, запас 0,96 кг/м²) в сосняке лишайниковом IV–V классов возраста

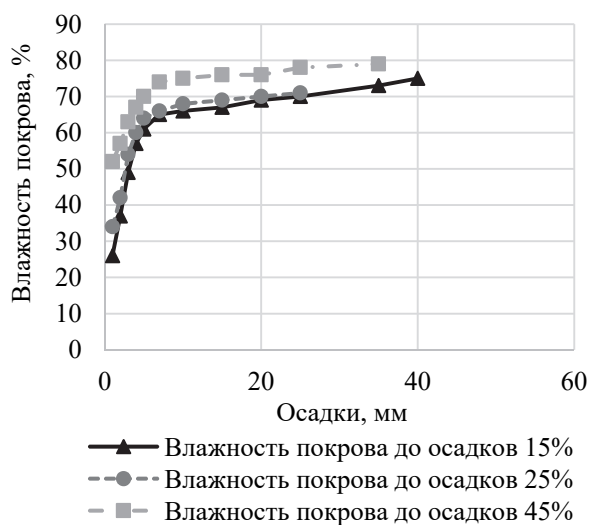


Рис. 2. Влажность лесного напочвенного покрова (мох Шребера, запас 0,84 кг/м²) в сосняке черничном IV–V классов возраста

Как можно видеть на данных рисунках, значительное увеличение влажности напочвенного покрова наблюдается при малых осадках от 1 до 5 мм. Дальнейший рост осадков не приводит к существенному изменению влажности ЛГМ. При этом начальный уровень влажности также влияет на способность ЛГМ впитывать воду. Для ЛГМ с начальной влажностью 15 и 25% характерен более активный набор влаги при осадках до 5 мм по сравнению с ЛГМ влажностью 45%, что отражено на рис. 2.

На рис. 3 и 4 представлена влажность лесной подстилки после осадков в сосняке лишайниковом и сосняке черничном [10].

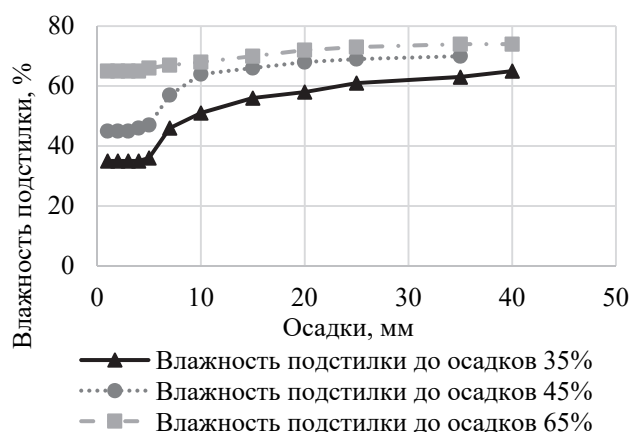


Рис. 3. Влажность лесной подстилки (запас 1,5 кг/м²) в сосняке лишайниковом IV–V классов возраста

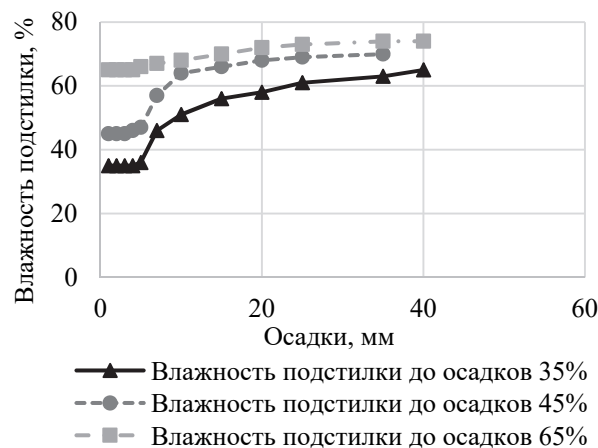


Рис. 4. Влажность лесной подстилки (запас 1,6–2,0 кг/м²) в сосняке черничном IV–V классов возраста

Следует отметить, что в отличие от напочвенного покрова влажность лесной подстилки в большей степени зависит от типа леса. Так, в сосняке лишайниковом существенный рост влажности подстилки наблюдается при возрастании осадков от 1 до 5 мм, а в сосняке черничном – от 5 до 10 мм.

В случае отсутствия атмосферных осадков на протяжении нескольких суток наблюдается снижение относительной влажности воздуха и подсушивание горючих материалов до состояния возгорания. Зависимость влажности ЛГМ от количества сухих дней после дождя представлена в табл. 1 [8].

Отдельно следует обратить внимание на критические пороги влажности ЛГМ. Изучению способности ЛГМ накапливать и удерживать влагу посвящено множество работ, отражающих большое количество данных, которые часто трудно сопоставить. Возможно, измерения проводились в разное время и по различным методикам. Так, по данным [11] нижний порог влажности для лишайников и мхов составляет 6–8 и 28–57% соответственно. В работе [12] указывается, что лишайники впитывают воды в 2,5 раза больше своего воздушного веса, что соответствует их максимальному порогу влажности в 250%. Для мхов предельная влажность еще выше и колеблется в диапазоне 500–700%. Исследованиями В. И. Рутковского установлено, что напочвенный покров из лишайников может удерживать до 4,5 мм осадков, а из мхов – до 10 мм [13]. Интересны наблюдения И. С. Мелехова, который установил, что спустя 6 дней после дождя влажность лишайников на вырубке понижается до 13,3%, а мха – до 20% [14].

С точки зрения обеспечения пожарной безопасности важным является минимальный по-

рог влажности ЛГМ, при котором возможно его воспламенение. Так, по данным В. Г. Нестерова пожарная опасность опада в сосновом лесу утрачивается при достижении им влажности 47% [15, 16]. В целом, как показывает практика, подавляющее количество лесных пожаров происходит при влажности ЛГМ менее 30% [17].

Ветер способствует высыханию ЛГМ, увеличивает скорость распространения горения, особенно верховых лесных пожаров. При одной и той же влажности ЛГМ в разных типах леса количество тепла, выделяемого в единицу времени, из-за ветра увеличивается в 6–25 раз, скорость продвижения кромки пожара – в 3–19 раз, глубина кромки – в 3–12 раз, а высота пламени в 2–5 раз [17]. Кроме того, ветер приводит к возникновению новых очагов горения путем переноса горящих частиц. Образующаяся над зоной горения конвекционная колонка содержит горящие ветки, кору, пучки хвои и листья, которые поднимаются над лесным пологом, а затем опускаются на напочвенный покров на расстоянии 200–300 м и более от основного очага горения (в зависимости от скорости ветра и наклона конвекционной колонки) и создают так называемые пятнистые пожары [8, 17].

Интенсивность низовых пожаров в зависимости от скорости ветра и влажности ЛГМ приведена в табл. 2 [17].

Таблица 1

**Изменение влажности ЛГМ после выпадения атмосферных осадков
(на открытой местности / под пологом леса), %**

Горючий материал	День после дождя				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Лишайники	90 / 128	44 / 86	14 / 38	12 / 18	10 / 18
Зеленые мхи	105 / 225	72 / 174	32 / 90	16 / 24	12 / 16
Сучья	33 / 57	17 / 23	15 / 17	13 / 15	12 / 15
Хвоя	33 / 70	15 / 32	13 / 24	12 / 18	11 / 17
Листва	65 / 68	20 / 28	15 / 20	13 / 18	11 / 17
Опад	55 / 57	17 / 23	14 / 18	11 / 13	10 / 12

Таблица 2

Интенсивность низовых пожаров в зависимости от основных природных факторов

Скорость ветра, м/с	Показатели горения при различной влажности напочвенного покрова, %											
	до 30				от 30 до 50				свыше 50			
	<i>q</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>q</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>q</i>	<i>v</i>	<i>h</i>	<i>l</i>
Сосняк лишайниково-мшистый												
0,5	2,6	0,7	0,5	0,5	2,0	0,6	0,3	0,4	1,0	0,5	0,2	0,2
1,5	8,5	2,1	1,4	1,9	5,2	1,7	1,0	1,2	2,3	1,1	0,6	0,7
2,5	16,0	3,9	1,8	2,9	8,8	2,9	1,4	1,9	4,3	1,7	1,1	1,1
Сосняк зеленомошный												
0,5	1,3	0,5	0,6	0,5	0,2	0,3	0,4	0,3	–	–	–	–
1,5	3,0	1,1	1,0	1,0	0,6	0,6	0,5	0,4	–	–	–	–
Сосняк багульниковый												
0,5	3,0	0,7	1,3	0,9	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5	11,1	2,3	2,0	1,8	–	–	–	–	–	–	–	–
2,5	20,9	4,3	2,3	2,7	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. *q* – количество тепла, выделяемое 1 пог. м кромки пожара в 1 мин, тыс. ккал; *v* – скорость продвижения фронтальной кромки пожара, м/мин; *h* – высота пламени, м; *l* – глубина кромки пожара, м.

Как можно видеть в табл. 2, увеличение скорости ветра с 0,5 до 3,5 м/мин приводит к существенному изменению основных показателей горения. Так, например, при влажности ЛГМ до 30% в сосняке лишайниково-мшистом теплопроводная способность ЛГМ увеличивается в 9 раз, а скорость продвижения фронта пожара, высота пламени и глубина кромки в 3,3, 3,4 и 7,2 раза соответственно. Данные закономерности характерны и для других типов леса и диапазонов влажности ЛГМ.

Следует отметить, что скорость ветра под пологом насаждений зависит от их строения, высоты и сомкнутости. При этом больше всего на скорость ветра в лесу влияет состав насаждений, т. е. представленность в нем той или иной породы. Так, в работе [17] приведены результаты опытного измерения скорости ветра при одинаковой высоте и сомкнутости полога для ельника зеленомошного и сосняка брусничного (табл. 3).

Как следует из табл. 3, кроны деревьев способствуют уменьшению скорости ветра в 5–6 раз до значений 0,8–1,1 м/с. Под пологом леса скорость ветра еще ниже и достигает 0,6 м/с для ельника зеленомошного и 0,8 м/с для сосняка брусничного.

Температура воздуха и глобальное изменение климата оказывают влияние на пожарную опасность в лесу через дефицит влаги. Почти повсеместно наблюдается увеличение числа жарких дней и тепловых волн. Нагретый на солнце ЛГМ теряет влагу и горит быстрее. В современном мире в условиях глобального потепления количество катастрофических пожаров продолжает увеличиваться. В исследованиях [18] указывается, что к 2030 г. число экстремальных пожаров в мире увеличится на 14% по сравнению с 2010–2020 гг., к 2030 г. этот рост может достичь 30%, а к концу столетия – 50%.

Во время лесных пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество углекислого газа, что способствует парниковому эффекту. Еще больше его выделяется при горении торфяников, которые являются большими «складами» углерода. Кроме того, углекислый газ образуется и после пожаров: погибшие, но не до конца сгоревшие деревья гниют, разлагаются и выделяют углекислый газ. В зависимости от региона количество углекислого газа, вырабатываемого

после пожара, может быть даже больше, чем при самом горении. В результате сильнее «нагревается» Земля, что повышает пожарную опасность природных экосистем.

Также во время лесных пожаров образуется значительное количество сажи. Ветер переносит ее на большие расстояния, вплоть до льдов Арктики. Осевшая на льдах сажа способствует его таянию, что приводит к снижению ледяного покрова и, как следствие, препятствует охлаждению планеты, вызывая потепление климата.

Отдельно следует отметить, что леса улучшают состав воздуха. Поврежденные пожаром природные экосистемы слабеют, медленнее восстанавливаются, меньше поглощают углекислого газа и выделяют кислорода, а значит, не помогают замедлить изменение климата.

Таким образом, получается замкнутая система: глобальное потепление напрямую влияет на увеличение числа лесных пожаров, а пожары, в свою очередь, способствуют изменению климата [19].

В Республике Беларусь темпы глобального потепления в 3,5 раза выше мировых [20]. С 1976 г. среднегодовая температура воздуха растет со скоростью 0,63°C за 10 лет, что является самым высоким темпом роста среди стран Содружества Независимых Государств. В результате произошло смещение агроклиматических областей страны (рис. 5) [21]. Северная область разделилась и практически исчезла с территории Беларуси. На ее смену в 2016 г. пришла так называемая «новая» область, характеризующаяся участившимися летними засухливыми периодами, территория которой продолжает расти [22]. Согласно представленным в работе [23] прогнозам, к 2030 г. северная область исчезнет, четвертая «новая» область расширится, а на юге появится еще более теплая пятая область. При этом, по данным прогноза, к 2060 г. от южной области останется незначительная часть на севере страны, остальные области сместятся на север, а на юге Беларуси появится еще более теплая агроклиматическая область с суммой среднесуточных температур воздуха за год более 3000°C (суммируются значения среднесуточных температур воздуха в дни, когда она составляла более +10°C). В этой связи особо повышается риск возникновения масштабных лесных пожаров.

Таблица 3

Влияние состава насаждения на изменение скорости ветра

Тип леса	Состав	Высота, м	Сомкнутость	Скорость ветра, м/с, при высоте наблюдения над поверхностью земли, м			
				21,4	13,6	10,2	5,1
Ельник зеленомошный	9Е1Б	17	0,7	5,5	1,1	0,3	0,6
Сосняк брусничный	10С	17	0,7	5,2	0,8	0,6	0,8

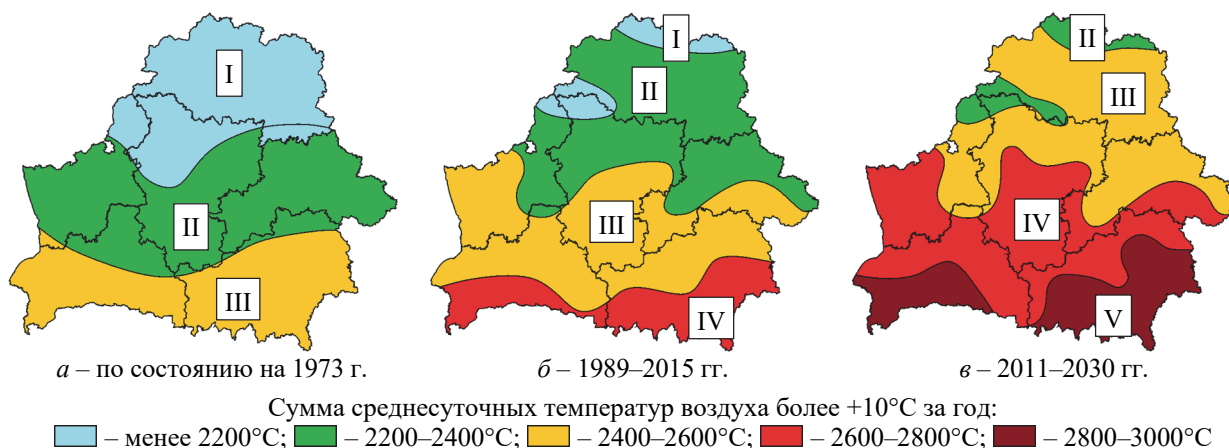


Рис. 5. Границы агроклиматических областей на территории Республики Беларусь:
 I – северная; II – центральная; III – южная; IV, V – новые агроклиматические области

Рельеф местности также оказывает влияние на лесопожарную ситуацию. Пожар распространяется значительно быстрее вверх по склону, чем вниз или по равнине. Это объясняется тем, что ЛГМ, расположенный на склоне выше зоны горения, при воздействии открытого огня или лучистого теплового потока от фронта пламени прогревается и воспламеняется быстрее. Кроме того, при пожаре возникает движение воздуха, который направлен вверх по склону и увеличивает интенсивность горения. Влияние крутизны склона на скорость распространения кромки пожара показано в табл. 4 [24].

Таблица 4

Влияние крутизны склона на скорость распространения кромки пожара относительно равнинной местности

Крутизна склона	Увеличение скорости распространения кромки пожара
5°	В 1,2 раза
10°	В 1,6 раза
15°	В 2,1 раза
20°	В 2,9 раза
25°	В 4,1 раза

Как можно видеть в табл. 4, увеличение крутизны склона до 25° приводит к росту скорости распространения кромки пожара в 4,1 раза. Однако на крутых склонах число пожаров снижается, так как они выступают в виде барьеров для развития огня [25]. Это объясняется созданием на крутых склонах неблагоприятных условий для роста растений, что уменьшает запас ЛГМ и общую интенсивность горения.

Важное значение также имеет расположение склонов. Например, южные склоны под воздействием солнечного излучения прогреваются значительно сильнее северных, в результате чего обеспечивается низкое влагосодержание ЛГМ и повышается риск возникновения пожаров.

Также следует отметить, что при распространении пожара вверх по склону горящие ЛГМ могут скатываться вниз и создавать новые очаги огня, что существенно усложняет процесс тушения.

Закключение. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Основными факторами, способствующими возникновению лесных пожаров в Республике Беларусь, являются осадки, ветер, температура воздуха, рельеф местности, а также природная предрасположенность ЛГМ к воспламенению и поддержанию процесса горения.

2. В условиях глобального потепления климата в ближайшие годы возможно увеличение числа лесных пожаров в Республике Беларусь и, как следствие, усиление их негативного воздействия на экологию и окружающую среду.

3. Для повышения уровня противопожарной защиты природных экосистем на современном этапе требуется разработка комплекса мероприятий, направленных на совершенствование системы мониторинга и прогнозирования лесных пожаров, разработку современных технологий их тушения, оптимизацию системы лесопожарного районирования территории страны и повышение качества управления силами и средствами при реагировании на возникающие возгорания.

Список литературы

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь / И. В. Медведева [и др.]. Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2021. 203 с.
2. Количество лесных пожаров с 2000 по 2016 гг. // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=163103> (дата обращения: 21.04.2023).

3. Количество лесных пожаров с 2017 по 2021 гг. // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=144108> (дата обращения: 21.04.2023).
4. Общая площадь, пройденная лесными пожарами // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=144102> (дата обращения: 21.04.2023).
5. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии: сб. науч. тр. Красноярск, 1970. С. 5–58.
6. Усеня В. В. Лесоводственно-пирологические основы охраны лесов от пожаров Республики Беларусь: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Гомель, 2003. 284 с.
7. Усеня В. В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2002. 206 с.
8. Усеня В. В., Каткова Е. Н., Ульдинович С. В. Лесная пирология. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2011. 264 с.
9. Молчанов В. П. Определение запасов горючих материалов в пологе сосновых насаждений // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. 1965. С. 108–118.
10. Вонский С. М., Вересова И. М., Жданко В. А. Влияние осадков на изменение влажности и горимости лесного напочвенного покрова и подстилки // Лесные пожары и технические средства борьбы с ними. 1974. С. 66–72.
11. Серебренников П. П., Матренинский В. В. Лесные пожары и борьба с ними. М.: Гослестехиздат, 1937. 177 с.
12. Корчагин А. А. Условия возникновения пожаров и горимость лесов европейского Севера // Ученые зап. ЛГУ. 1954. С. 182–322.
13. Рутковский В. И. Исследование задержания осадков травяным и моховым покровом // Метеорология и гидрология. 1936. № 2. С. 52–56.
14. Мелехов И. С. Опыт изучения лесных пожаров в лесах Севера. Архангельск: АЛТИ, 1939. 39 с.
15. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения. Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
16. Нестеров В. Г., Гриценко М. В., Шабунина Т. А. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // Метеорология и гидрология. 1968. № 9. С. 102–104.
17. Арцыбашев Е. С. Лесные пожары и борьба с ними. М.: Лесная пром-ть, 1974. 152 с.
18. Леса горят: глобальное потепление ведет к росту пожаров // Ведомости. Экология. URL: <https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2022/02/23/910622-lesa-goryat-globalnoe-poteplenie-vedet-k-rostu-pozharov> (дата обращения: 21.04.2023).
19. Как связаны изменение климата и лесные пожары // Гринпис. URL: <https://greenpeace.ru/blogs/2021/07/21/kak-svyazany-izmenenie-klimata-i-lesnye-pozhary> (дата обращения: 21.04.2023).
20. В Беларуси темпы глобального потепления в 3,5 раза выше мировых // Сайт белорусских исследований Thinktanks.by. URL: <https://thinktanks.by/publication/2022/03/23/v-belarusi-tempy-globalnogo-potepleniya-v-35-raza-vyshe-mirovyh.html> (дата обращения: 21.04.2023).
21. Совершенствование информационных систем о природных пожарах Республики Беларусь и Российской Федерации / С. Л. Кравцов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7, № 1. С. 86–106. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.86.
22. Что происходит с изменением климата в Беларуси? // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.undp.org/ru/belarus/chno-proiskhodit-s-izmeneniem-klimata-v-belarusi> (дата обращения: 21.04.2023).
23. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата // ClimaEast. URL: <https://climate.ecopartnerstvo.by/sites/default/files/2017-09/%5BRUS%5D%20Agriculture%20Climate%20Change%20Zoning%20in%20Belarus.pdf> (дата обращения: 21.04.2023).
24. Сегодня А. М., Булга А. Д. Справочное руководство по ликвидации лесных и торфяных пожаров. Гродно: Гродн. обл. упр. МЧС Респ. Беларусь, 2012. 160 с.
25. Янец П. К., Гададь С. Ж., Иванов С. А. Моделирование риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия) методами ГИС // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 37–42.

References

1. Medvedeva I. V., Kukharevich E. I., Vasilevskaya Zh. N., Dovnar O. A., Tarasyuk N. V., Lapkovskaya T. V., Mazayskaya I. A., Palkovskaya E. M., Zdrok E. A. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus* [Environmental protection in the Republic of Belarus]. Minsk, Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus' Publ., 2021. 203 p. (In Russian).

2. The number of forest fires from 2000 to 2016. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=163103> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
3. The number of forest fires from 2017 to 2021. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=144108> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
4. Total area covered by forest fires. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=144102> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
5. Kurbatsky N. P. Investigation of the quantity and properties of forest combustible materials. *Voprosy lesnoy pirologii* [Questions of forest pyrology]. Krasnoyarsk, 1970, pp. 5–58 (In Russian).
6. Usenya V. V. *Lesovodstvenno-pirologicheskiye osnovy okhrany lesov ot pozharov Respubliki Belarus*. Dissertatsiya doktora sel'skokhozyaystvennykh nauk [Forestry and pyrological bases of forest protection from fires of the Republic of Belarus. Dissertation DSc (Agriculture)]. Gomel, 2003. 284 p. (In Russian).
7. Usenya V. V. *Lesnyye pozhary, posledstviya i bor'ba s nimi* [Forest fires, consequences and fight against them]. Gomel, Institut lesa NAN Belarusi Publ., 2002. 206 p. (In Russian).
8. Usenya V. V., Katkova E. N., Ul'dinovich S. V. *Lesnaya pirologiya* [Forest pyrology]. Gomel, Institut lesa NAN Belarusi Publ., 2011. 264 p. (In Russian).
9. Molchanov V. P. Determination of reserves of combustible materials in the canopy of pine plantations. *Sovremennyye voprosy okhrany lesov ot pozharov i bor'by s nimi* [Modern issues of forest fire protection and control], 1965, pp. 108–118 (In Russian).
10. Vonsky S. M., Veresova I. M., Zhdanko V. A. The effect of precipitation on changes in humidity and burnability of forest ground cover and litter. *Lesnyye pozhary i tekhnicheskiye sredstva bor'by s nimi* [Forest fires and technical means of combating them], 1974, pp. 66–72 (In Russian).
11. Serebrennikov P. P., Matreninskiy V. V. *Lesnyye pozhary i bor'ba s nimi* [Forest fires and fighting them]. Moscow, Goslestekhzdat Publ., 1937. 177 p. (In Russian).
12. Korchagin A. A. Conditions of occurrence of fires and the burning of forests of the European North. *Uchenye zapiski LGU* [Scientific notes of LSU], 1954, pp. 182–322 (In Russian).
13. Rutkovsky V. I. Investigation of precipitation retention by grass and moss cover. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1936, no. 2, pp. 52–56 (In Russian).
14. Melekhov I. S. *Opyt izucheniya lesnykh pozharov v lesakh Severa* [Experience in studying forest fires in the forests of the North]. Arkhangelsk, ALTI Publ., 1939. 39 p. (In Russian).
15. Nesterov V. G. *Gorimost' lesa i metody yeye opredeleniya* [Forest flammability and methods for its determination]. Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1949. 76 p. (In Russian).
16. Nesterov V. G., Gritsenko M. V., Shabunina T. A. Using the dew point temperature when calculating the forest burnability index. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1968, no. 9, pp. 102–104 (In Russian).
17. Artsybashev E. S. *Lesnyye pozhary i bor'ba s nimi* [Forest fires and fighting them]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 152 p. (In Russian).
18. Forests are burning: global warming is leading to an increase in fires. Available at: <https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/news/2022/02/23/910622-lesa-goryat-globalnoe-poteplenie-vedet-k-rostu-pozharov> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
19. How are climate change and forest fires related. Available at: <https://greenpeace.ru/blogs/2021/07/21/kak-svjazany-izmenenie-klimata-i-lesnye-pozhary> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
20. In Belarus, the rate of global warming is 3.5 times higher than the world. Available at: <https://thinktanks.by/publication/2022/03/23/v-belarusi-tempy-globalnogo-potepleniya-v-35-raza-vyshe-mirovyh.html> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
21. Kravtsov S. L., Popova A. K., Markova D. S., Lepesevich E. V., Reshetnik S. V. Improving information systems on wildfires in the Republic of Belarus and the Russian Federation. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MCHS Belarusi* [Journal of Civil Protection], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 86–106. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.86 (In Russian).
22. What is happening with climate change in Belarus? Available at: <https://www.undp.org/ru/belarus/chto-proiskhodit-s-izmeneniyem-klimata-v-belarusi> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
23. Agro-climatic zoning of the territory of Belarus taking into account climate change. Available at: <https://climate.ecopartnerstvo.by/sites/default/files/2017-09/%5BRUS%5D%20Agriculture%20Climate%20Change%20Zoning%20in%20Belarus.pdf> (accessed 21.04.2023) (In Russian).
24. Segodnik A. M., Bulva A. D. *Spravochnoye rukovodstvo po likvidatsii lesnykh i torfyanykh pozharov* [Reference guide for the elimination of forest and peat fires]. Grodno, Grodnenskoye oblastnoye upravleniye MCHS Respubliki Belarus' Publ., 2012. 160 p. (In Russian).

25. Yanets P. K., Gadal S. Zh., Ivanov S. A. Modeling of forest fire risk in the Republic of Sakha (Yakutia) by GIS methods. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2019, no. 11, pp. 37–42 (In Russian).

Информация об авторе

Гоман Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной безопасности. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, Республика Беларусь). E-mail: g-pn83@mail.ru

Information about the author

Goman Pavel Nikolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Industrial Safety. University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley str., 220118, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: g-pn83@mail.ru

Поступила 21.10.2023

УДК 630.935.4*338.14

Г. Я. Климчик, П. В. Шалимо, О. Г. Бельчина

Белорусский государственный технологический университет

ОЦЕНКА КОСВЕННОГО УЩЕРБА ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В СОСНЯКАХ

В статье рассмотрены вопросы оценки и учета потерь от лесных пожаров. В современных условиях интенсивного техногенного развития, прогрессирующей урбанизации, развития транспортных сетей и массового посещения лесов населением пожарная опасность только возрастает. В настоящее время при оценке ущерба, нанесенного лесными пожарами, учитываются только прямые затраты, что не отражает всей картины убытков. Поэтому необходимость разработки методики оценки потерь от лесных пожаров не вызывает сомнения. Нами предложены шкалы для определения косвенных потерь основных компонентов и лесной подстилки от пожаров в сосняках и методика их расчета.

Ключевые слова: лесной пожар, прямой и косвенный ущерб, эколого-экономические показатели, депонирование углерода.

Для цитирования: Климчик Г. Я., Шалимо П. В., Бельчина О. Г. Оценка косвенного ущерба от лесных пожаров в сосняках // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 31–38.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-4.

G. Ya. Klimchik, P. V. Shalimo, O. G. Bel'china

Belarusian State Technological University

ASSESSMENT OF DAMAGE FROM FOREST FIRES IN PINE FORESTS

The article deals with the issues of assessing and accounting for losses from forest fires. In modern conditions of intensive technogenic development, progressive urbanization, the development of transport networks and massive visits to forests by the population, the fire danger will only increase. Currently, when assessing the damage caused by forest fires, only direct costs are taken into account, which does not reflect the whole picture of losses. Therefore, the need to develop a methodology for assessing losses from forest fires is beyond doubt. We have proposed scales for determining indirect losses of the main components and forest litter in pine forests and a method for calculating them from forest fires.

Keywords: forest fire, direct and indirect damage, environmental and economic indicators, carbon sequestration.

For citation: Klimchik G. Ya., Shalimo P. V., Bel'china O. G. Assessment of damage from forest fires in pine forests. *Proceeding of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 31–38 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-4.

Введение. Процесс горения лесных материалов сопровождается потреблением воздуха, необходимого для поддержания пирогенного разложения веществ, выбросом в атмосферу продуктов пиролиза и тепловым излучением. В дымовых газах, пылевых выбросах и других продуктах горения всегда содержатся различные вещества горения и разложения. Все они приводят к загрязнению атмосферы, воды и почвы, что вызывает нарушение экологического баланса и негативные последствия в природной среде. Лесные пожары воздействуют на почву, где на различную глубину сгорает ее плодородный слой и растительность. Возрастает вероятность возникновения процессов эрозии. При этом горит не один вид горючего материала, а целый комплекс компонентов различных комбинаций и влажности. Для них характерна различная пирологическая характеристика, которая включает

пространственную неоднородность, массу, удельную объемную плотность, теплотворную способность, фракционный состав и другие показатели. Это непосредственно влияет на процессы горения, вид и интенсивность лесного пожара.

Общая масса лесных горючих материалов, которые готовы к воспламенению, изменяется во времени в зависимости от состояния отдельных частей насаждения. Древостой оказывает влияние на микроклимат под пологом, задерживает осадки, препятствует проникновению солнечной радиации, снижает скорость ветра, что сказывается на видовом разнообразии растительного покрова и, как следствие, лесных горючих материалов.

В хвойных насаждениях из-за наличия большого количества летучих веществ пожар распространяется стремительно и может повреждать

все насаждение – от почвенного покрова и до вершины основного полога. По мнению различных исследователей [1–7], главными закономерностями распределения того или иного вида горючих материалов по площади являются таксационные, лесоводственные и фитоценоотические особенности участков каждого типа леса.

Вид возникшего пожара, его интенсивность и дальнейшее распространение определяются запасами и влажностью горючих материалов, которые исследовались А. А. Молчановым, Н. П. Кубратским, И. В. Гуняженко, И. Э. Рихтером, В. В. Усеной, Г. Я. Климчиком и др. [5–12].

Основная часть. По нашим и другим исследованиям [4–6, 13–15], ключевым показателем, который определяет способность горючего материала к возникновению загорания, является его влагосодержание, зависящее от лесорастительных условий и метеорологических факторов.

В современных условиях глобального потепления климата и урбанизации населения, развития дорожной сети и транспортной оснащённости населения вероятность возникновения лесных пожаров будет только возрастать. Основная причина возгораний – несоблюдение правил пожарной безопасности во время работы и отдыха в лесу. Большинство лесных пожаров приходится на ранневесенний и летний периоды, что связано с массовыми посещениями населением лесов в период активной вегетации весной и во время созревания и сбора грибов и ягод летом.

При проведении первоочередных лесохозяйственных мероприятий по повышению продуктивности поврежденных пожарами древостоев необходимо учитывать особенности их минерального питания и сохранения плодородия почвы.

В лесах Беларуси лесные пожары, как правило, носят характер стихийного бедствия, и представляют собой один из основных путей быстрого возвращения углерода, азота и зольных элементов из экосистемы в атмосферу или в недоступные для этой экосистемы почвенные горизонты.

Поэтому в настоящее время и в Беларуси, и во всех странах мира большое внимание уделяется изучению депонирования углерода, азота и зольных элементов в напочвенном покрове, что обусловлено изменением газового состава атмосферного воздуха в результате хозяйственной деятельности, лесных пожаров и влияния других факторов.

Еще в 1973 г. Н. П. Курбатский отмечал [16, с. 20], что «исследования последствий воздействия огня на лес с практической точки зрения необходимы для определения ущерба от пожаров и обоснования затрат на охрану лесов. В теоретическом аспекте пожары должны рассматриваться как один из важнейших факторов возникновения, формирования и современного состояния лесов и даже как фактор формирования биологических

свойств многих представителей лесной флоры в геологическом прошлом». Он считал, что на основе детальных исследований последствий пожаров необходимо разработать улучшенную методику учета убытков от них.

На современном этапе в связи с успешной разработкой средств прогнозирования пожароопасных ситуаций по-прежнему остаются нерешенными многие экологические вопросы детерминационного характера, не только причины и материалы возгорания в лесах, но и факторы влияния последствий пожаров на биоту и биогенно-эдафические свойства, характер изменений биоразнообразия напочвенного покрова, структуру и биоэнергетический потенциал. В некоторых случаях, в связи с интенсивным лесовозобновительным процессом и адаптацией к неблагоприятным внешним факторам, повышается устойчивость лесных сообществ к повторным пожарам. Следствием огневого воздействия являются послепожарные сукцессии древесной и травянистой растительности. Первыми появляются и получают широкое распространение виды, типичные для гарей, занимающие сначала пограничные участки и далее переходящие в пространства выгоревшей территории. Позднее происходит заселение пожарных видами, характерными для нетронутых пожаром коренных лесов.

В связи с тем что лесные почвы сосняков в нижней части профиля и почвообразующие породы имеют легкий гранулометрический состав, зольные элементы будут мигрировать с дождевыми и грунтовыми водами за пределы почвенного профиля, что вызовет снижение ее плодородия и приведет к экономическим и экологическим потерям после прохождения низовых пожаров в сосновых насаждениях, которые значительно превосходят учитываемый в настоящее время прямой ущерб. С учетом этого сумма потерь, которая является основанием для предъявления виновному в возникновении судебного иска, не должна вызывать сомнения. Поэтому в нее кроме прямых потерь нужно, на наш взгляд, включить и косвенные потери, естественно-экономические показатели которых могут быть учтены и рассчитаны с обеспечением юридически достаточного уровня точности.

Вопросы целостной всесторонней экономико-экологической оценки лесов, синтезирующей все многообразие проявлений данного естественного феномена, на сегодняшний день остаются наименее изученными.

Главная причина отставания разработки данной проблемы состоит в исключительной сложности самого объекта оценки, его многоуровневости и многоаспектности и, как следствие, в трудностях, связанных с проведением подобной оценки обычными способами.

Поэтому возникает необходимость поиска новых научно обоснованных методов оценки потерь на землях лесного фонда. Это даст возможность привлекать разные компоненты леса в рыночные отношения, научно обосновывать их потери.

Но такая методология оценки экологических и социальных функций леса недостаточно разработана. Отсутствует определенная увязка данных функций с реально существующими экономическими и социальными процессами. Не определены соответствующие критерии, которые выражают экологические функции леса экономическими показателями. Это приводит к тому, что разные хозяйственные решения, которые принимаются, не всегда оказываются эффективными.

Изложенные выше обстоятельства свидетельствуют о правомерности экономической оценки на основе суммарных затрат, необходимых для восстановления и выращивания лесных насаждений, которые используются как средства производства в области материального производства и существенно влияют на повышение его эффективности. Сейчас косвенные показатели в целом не учитываются, что не позволяет определить их долю в общественном продукте.

С другой стороны, методика определения комплексных экологических потерь от низовых лесных пожаров должна соответствовать следующим научно-техническим и прикладным требованиям:

1) отличаться простотой практического использования штатными работниками по охране леса, оперативностью и однозначностью определения как прямых, так и косвенных потерь от лесных пожаров;

2) обеспечивать объективную оценку потерь как от одного конкретного пожара, так и от их любой совокупности (комбинации);

3) результаты вычисления комплексных потерь должны быть точными, адекватно восприниматься, и для их оценки должно использоваться минимально-достаточное количество исходной информации.

В то же время современные методики и инструкции по определению потерь от лесных пожаров не позволяют определить общие потери.

Для полноценного использования планируемого подхода необходимо создание многоуровневой и точной базы данных о потерях каждого из элементов в зависимости от таксационных характеристик насаждений, ТУМ и интенсивности пожара.

Количественная оценка параметров нередко бывает трудоемкой, поэтому применяют методы косвенного учета, при которых оценивается не само множество компонентов насаждения, а какая-нибудь их особенность.

Одним из косвенных методов учета напочвенного покрова является определение проективного покрытия. На практике проективное покрытие определяется визуально и выражается в процентах.

Очень часто с косвенными методами совмещают визуальные, которые дополняют друг друга. Примером может служить шкала О. Друде, которая широко применяется при описании живого напочвенного покрова. Эту шкалу можно совместить со шкалой П. Д. Ярошенко, которая дает представление о количестве экземпляров каждого вида на занимаемой площади (табл. 1). По встречаемости в проективном покрытии может быть оценено множество видов в весовом количестве (кг/м^2 или т/га) для мохово-лишайникового, травяно-кустарничкового ярусов.

Для учета этих параметров нами предлагается дополнить эту шкалу весовыми показателями, для определения которых были использованы собственные исследования авторов и разработки белорусских и зарубежных ученых [15–18].

Накопление и долевое содержание органических веществ в лесной подстилке, живом напочвенном покрове, подросте и подлеске предусмотрено определять через их массу в абсолютно сухом состоянии. Для установления в насаждении массы этих компонентов, приходящейся на единицу площади, были использованы данные из литературных источников и материалов пробных площадей, заложенных научными сотрудниками кафедры лесоводства БГТУ.

Для характеристики массы лесной подстилки, живого напочвенного покрова, подроста и подлеска, содержания углерода и других химических элементов питания в них при разработке шкал использовались результаты исследований пирологической характеристики лесных горючих материалов В. Г. Нестерова, Л. А. Молчанова, И. В. Гуняженки, Н. П. Курбатского, И. Э. Рихтера, В. В. Усени, Г. Я. Климчика и др. (табл. 1) [3, 6, 14, 19–28].

Анализируя полученные данные можно прогнозировать потери органического вещества, азота и других жизненно необходимых растением элементов, использовать полученные данные для оценки косвенного ущерба, причиняемого лесными пожарами и пока не входящего в статьи ущерба, учитываемого после прохождения низовых пожаров разной интенсивности.

С учетом весовых показателей массы ярусов живого напочвенного покрова и лесной подстилки, содержания в них углерода, азота и зольных элементов нами определены потери перечисленных элементов при низовых пожарах различной интенсивности и разработаны шкалы (табл. 1–4).

Таблица 1

**Биомасса сухого вещества в живом напочвенном покрове
в зависимости от проективного покрытия**

Множество по Друде	Проективное покрытие по Ярошенко, %	Травянистый ярус		Мохово-лишайниковый ярус	
		запас, т/га	запас углерода, тС/га	масса, т/га	запас углерода, тС/га
Soc (sociales) – растения смыкаются надземными частями, образуя фон	Более 90	6,4	3,2	3,8	1,9
Cop ₃ (copiosae ₃) – растения встречаются в большом количестве	90–70	3,8–5,9	2,43	2,9–3,2	1,53
Cop ₂ (copiosae ₂) – растений очень много	70–50	1,9–4,1	1,50	1,2–3,0	1,05
Cop ₁ (copiosae ₁) – растений довольно много	50–30	0,5–2,1	0,65	0,5–1,8	0,56
Sp (spalsae) – растения встречаются в небольшом количестве	30–10	0,1–1,2	0,33	0,1–0,7	0,2
Sol (solitariae) – редкие экземпляры	Менее 10	0,01–0,2	0,05	0,02–0,2	0,05
Un (unicum) – вид найден в единичном экземпляре	Единично	–	–	–	–

Таблица 2

Запасы лесной подстилки в зависимости от мощности горизонта

Мощность горизонта, см	Запас лесной подстилки, кг/м ²	Средний запас лесной подстилки, т/га
1–2	1,0–1,6	13,0
3–5	3,1–5,3	42,0
5–15	6,2–10,3	82,5
>15	10,5–30,0	402,5

Таблица 3

Биомасса сухого вещества в подросте и подлеске лесного насаждения

Подрост	Количество подроста, тыс. шт./га	Биомасса сухого вещества, т/га	Содержание углерода, тС/га
Очень редкий	<1,0	До 0,5	0,50
Редкий	1,1–2,0	0,6–1,7	1,15
Средний	2,1–8,0	1,5–7,6	4,55
Густой	8,1–13,0	3,8–22,6	13,20
Очень густой	>13,0	15,5–81,0	47,25

Таблица 4

Содержание углерода и элементов питания в сосновых насаждениях

Компоненты лесной экосистемы	Содержание элементов питания					
	С, %	N, %	P, мг/кг	K, мг/кг	Ca, мг/кг	Mg, мг/кг
Лесная подстилка	42,9	1,10	9,03	18,0	37,57	8,39
ЖНП	49,8	2,60	11,23	5,0	75,60	8,74
Подлесок	50,0	1,40	0,05	0,14	0,15	0,03
Подрост (сосна, ель)	50,0	1,12	0,38	2,14	3,31	0,44

Полнота экономической оценки ущерба от лесных пожаров предполагает учет как прямого, так и косвенного ущербов.

Методы и методики определения прямого ущерба в целом достаточно хорошо разработаны, имеют логически выстроенную структуру и заложены в основу юридических и финансовых инструментов расчета величины данного вида ущерба с целью дальнейшего правоприменения.

Что касается косвенного ущерба, то в настоящее время современная практика не вырабо-

тала единого механизма по его расчету. Вместе с тем, опираясь на вышеизложенные расчеты физических потерь части биомассы живым напочвенным покровом и подстилкой вследствие лесного пожара, можно сделать вывод, что весьма существенное снижение либо полное прекращение в них абсорбции углекислого газа самым непосредственным образом влияет на снижение плодородия почв и ухудшение климатообразующих факторов. Последний фактор непосредственно связан с выполнением

взятых на себя Республикой Беларусь обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в рамках Парижского соглашения 12 декабря 2015 г., и проведением мероприятий, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и увеличение их поглощения, заложенных в государственной программе «Белорусский лес».

Расчет косвенного ущерба от лесных пожаров должен учитывать потери плодородия почв от термического разрушения питательных веществ и существенного ускорения миграции зольных элементов за пределы почвенного профиля. Кроме того, величина косвенных потерь в значительной степени зависит и от интенсивности пожара.

Пожалуй, единственным компенсирующим, но затратным мероприятием в данном случае может быть восполнение указанных потерь внесением в течение определенного временного периода комплекса удобрений и почвоулучшающих добавок на пострадавшей площади.

На основании вышесказанного косвенный ущерб от лесных пожаров (U_k) в целом в лесных насаждениях и в сосняках в частности может быть рассчитан по следующей формуле:

$$U_k = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{it} K_{it} P_{it} S_{it} Q_t),$$

где T – срок действия негативных последствий, которые требуют восстановительных мероприятий (внесения удобрений и почвоулучшающих добавок); N – вид учтенных утраченных ресурсов, которые подлежат восполнению (С, N, P, K, Ca, Mg и др.); C_{it} – количество учтенного i -го вида (С, N, P, K, Ca, Mg и др.) утраченного ресурса, который подлежит восполнению на протяжении t лет, кг/га; K_{it} – корректирующий

(повышающий) коэффициент по действующему веществу (С, N, P, K, Ca, Mg и др.) для утраченного ресурса по компенсирующему его удобрению и/или почвоулучшающей добавке (определяется для каждого случая индивидуально с учетом вида почв и интенсивности пожара); P_{it} – цена удобрения и/или почвоулучшающей добавки по i -му утраченному ресурсу, вносимая на 1 га в t -м году, BYN/кг; S_{it} – площадь, пострадавшая от лесного пожара, га; Q_t – коэффициент дисконтирования (рассчитывается для соответствующего периода с учетом основных макроэкономических показателей в отрасли).

Заключение. В настоящее время остаются актуальными вопросы факторов влияния последствий пожаров (токсичности продуктов горения, плотности дыма, температуры пожара и др.) на древесно-кустарниковую растительность, живой напочвенный покров и другие компоненты леса. Ущерб, наносимый лесным насаждениям в данное время недооценен, так как оценивается только прямой ущерб. По нашему мнению, при расчете потерь, наносимых пожарами лесным насаждениям, следует учитывать и косвенные потери, обоснованные экономическими и юридическими показателями. Сложность комплексной экономико-экологической оценки поврежденного объекта заключается в необходимости создания многоуровневой и точной базы данных о потерях каждого элемента леса. Для этого возникает необходимость разработки методов и методик определения и расчета косвенного ущерба, наносимого пожаром. Предложенные нами составляющие могут наиболее полно показать оценку косвенного ущерба на площади, пострадавшей от пожара, и тем самым отразить нанесенный ущерб в целом с эколого-экономической точки зрения.

Список литературы

1. Овсянников И. В. Противопожарное устройство лесов. М.: Лесная пром-сть, 1978. 112 с.
2. Фуряев В. В., Баранов Н. М. О точности учета количества напочвенных лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. 1972. С. 164–170.
3. Курбатский Н. П. Исследование количества и некоторых свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. 1970. С. 5–58.
4. Шешуков М. А., Стародумов А. М. Влияние некоторых факторов среды на скорость высыхания и увлажнения лесных горючих материалов // Горение и пожары в лесу. 1973. С. 44–55.
5. Митрофанов Д. П. Сравнение пирологических характеристик некоторых лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. 1972. С. 77–102.
6. Костырин Т. В. Исследование пожарного созревания некоторых типов леса на юге Хабаровского края // Проблемы лесной пирологии. 1975. С. 29–42.
7. Софронов М. А. Лесные пожары в горах Южной Сибири. М.: Наука, 1967. 150 с.
8. Гуляженко И. В. Изменение лесного напочвенного покрова в сосняках под влиянием низовых пожаров // Сб. ботан. работ. 1960. Вып. II. С. 50–57.
9. Курбатский Н. П. Проблема лесных пожаров // Возникновение лесных пожаров. 1964. С. 5–51.
10. Курбатский Н. П. Итоги и перспективы исследования природы лесных пожаров // Горение и пожары в лесу. 1973. С. 9–26.
11. Рыхтэр І. Э. Лясная піралогія з асновамі радыёэкалогіі. Мінск: БДТУ, 2006. 396 с.

12. Усенья В. В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2002. 206 с.
13. Климчик Г. Я., Рихтер И. Э. Влияние лесных пожаров на древостой сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2004. Вып. XII. С. 105–108.
14. Загораемость лесных горючих материалов в сосновых насаждениях / Г. Я. Климчик [и др.] // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. 2012. Вып. 72. С. 455–461.
15. Особенности пиротехнической характеристики загораемости горючих материалов в сосняках / Г. Я. Климчик [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 1 (148): Лесное хоз-во. С. 90–92.
16. Характеристика лесных пожаров по особенностям их возникновения / Г. Я. Климчик [и др.] // Труды БГТУ. 2013. № 1 (157): Лесное хоз-во. С. 73–75.
17. Климчик Г. Я., Рихтер И. Э., Шалимо П. В. Влияние лесных пожаров на лесные биогеоценозы. Минск: Вассамедиа, 2009. 40 с.
18. Рихтер И. Э., Бахур О. В., Климчик Г. Я. Депонирование углерода в напочвенном покрове сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2006. Вып. XIV. С. 130–131.
19. Оценка косвенного вреда от низовых пожаров разной интенсивности / Г. Я. Климчик [и др.] // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2009. Вып. XVII. С. 108–110.
20. Рихтер И. Э., Бахур О. В., Климчик Г. Я. Влияние низового пожара разной интенсивности на текущий прирост, потери азота и зольных элементов в сосняке мшистом // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2006. Вып. XIV. С. 113–115.
21. Климчик Г. Я., Бельчина О. Г. Методология исследования различных компонентов лесного фитоценоза для расчета углеродных потоков // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2019. № 2 (222). С. 43–48.
22. Молчанов А. А. Влияние лесных пожаров на древостой // Труды института леса АН СССР, 1954. Т. XVI. С. 314–335.
23. Климчик Г. Я., Рихтер И. Э., Бахур О. В. Потери органического вещества и азота в сосновых молодняках при различной интенсивности низовых пожаров // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2005. Вып. XIII. С. 55–57.
24. Бойко А. В. Эколого-фитоценотические исследования лесной растительности Налибокской пущи. Минск: Наука и техника, 1983. 208 с.
25. Молчанов А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 276 с.
26. Гуняженко Н. В. Изменения микрофлоры лесных почв в результате действия огня разной интенсивности // Лесоведение и лесное хозяйство. 1970. Вып. 3. С. 175–181.
27. Рожков Л. Н., Шатравко В. Г. Влияние традиционной лесохозяйственной деятельности на содержание питательных элементов и углеродные потоки в насаждениях *Pineta – Piceeta oxalidosa – pleuroziosa – pteridiosa – myrtillosa* // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 58–65.
28. Некоторые особенности влияния рубок леса на содержание химических элементов в хвойных фитоценозах в условиях Негорельского учебно-опытного и Минского лесхозов / М. В. Юшкевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (240). С. 42–51.

References

1. Ovsyannikov I. V. *Protivopozharnoye ustroystvo lesov* [Scaffolding fire fighting device]. Moscow, *Lesnaya promyslnennost'* Publ., 1978. 256 p. (In Russian).
2. Furyaev V. V., Baranov N. M. On the accuracy of accounting for the amount of ground-based forest combustible materials. *Voprosy lesnoy pirologii* [Questions of forest pyrology], 1972, pp. 164–170 (In Russian).
3. Kurbatskiy N. P. Investigation of the quantity and some properties of forest combustible materials. *Voprosy lesnoy pirologii* [Questions of forest pyrology], 1970, pp. 5–58 (In Russian).
4. Sheshukov M. A., Starodumov A. M. The influence of some environmental factors on the rate of drying and humidification of forest combustible materials. *Goreniye i pozhary v lesu* [Burning and fires in the forest], 1973, pp. 44–55 (In Russian).
5. Mitrofanov D. P. Comparison of pyrological characteristics of some forest fuels. *Voprosy lesnoy pirologii* [Questions of forest pyrology], 1972, pp. 77–102 (In Russian).
6. Kostyrine T. V. Study of fire maturation of some forest types in the south of the Khabarovsk Territory. *Problemy lesnoy pirologii* [Problems of forest pyrology], 1975, pp. 29–42 (In Russian).
7. Sofronov M. A. *Lesnyye pozhary v gorakh Yuzhnoy Sibiri* [Forest fires in the mountains of Southern Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 150 p. (In Russian).
8. Gunyazhenko I. V. Changes in forest ground cover in pine forests under the influence of ground fires. *Sbornik botanicheskikh rabot* [Collection of botanical works], 1960, issue II, pp. 50–57 (In Russian).

9. Kurbatskiy N. P. Forest fire problem. *Vozniknoveniye lesnykh pozharov* [The occurrence of forest fires], 1967, pp. 5–51 (In Russian).
10. Kurbatskiy N. P. Results and prospects of research into the nature of forest fires. *Goreniye i pozhary v lesu* [Burning and fires in the forest], 1973, pp. 9–26 (In Russian).
11. Rykhter I. E. *Lyasnaya piralogiya z asnovami radyoekalogii* [Forest pyrology with the basics of radioecology]. Minsk, BSTU Publ., 2006. 396 p. (In Belarusian).
12. Usenya V. V. *Lesnyye pozhary, posledstviya i bor'ba s nimi* [Forest fires, consequences and fight against them]. Gomel, Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2002. 206 p. (In Russian).
13. Klimchik G. Ya., Rikhter I. E. The impact of forest fires on the forest stand of pine plantations. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2004, issue XII, pp. 105–108 (In Russian).
14. Klimchik G. Ya., Usenya V. V., Gordey N. V., Muhurov L. I. Flammability of forest combustible materials in pine plantations. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva* [The problem of forestry and forestry], 2012, no. 72, pp. 455–461 (In Russian).
15. Klimchik G. Ya., Usenya V. V., Soevich F. F., Muhurov L. I. Features of the pyrotechnic characteristics of combustible materials ignitability in pine forests. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 1: Forestry, pp. 90–92 (In Russian).
16. Klimchik G. Ya., Usenya V. V., Gordey N. V., Muhurov L. I. Characteristics of forest fires according to the features of their occurrence. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 1: Forestry, pp. 73–75 (In Russian).
17. Klimchik G. Ya., Rikhter I. E., Shalima P. V. *Vliyanie lesnykh pozharov na lesnyye biogeotsenozы*. [Characteristics of forest fires according to the features of their occurrence]. Minsk, Vassamedia Publ., 2009. 40 p. (In Russian).
18. Rikhter I. E., Bahur O. V., Klimchik G. Ya. Deposition of carbon in the ground cover of pine plantations. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2004, issue XIV, pp. 130–131 (In Russian).
19. Klimchik G. Ya., Rikhter I. E., Bahur O. V., Shalimo P. V. Assessment of indirect damage from ground fires of different intensity. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2009, issue XVII, pp. 108–110 (In Russian).
20. Rikhter I. E., Bahur O. V., Klimchik G. Ya. Influence of a ground fire of different intensity on the current growth, losses of nitrogen and ash elements in a mossy pine forest. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2006, issue XIV, pp. 113–115 (In Russian).
21. Klimchik G. Ya., Belchina O. G. Methodology for the study of various components of forest phytocenosis for calculating carbon fluxes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry, 2019, no. 2, pp. 43–48 (In Russian).
22. Molchanov A. A. The impact of forest fires on the forest stand. *Trudy instituta lesa AN SSSR* [Proceedings of the Forest Institute of the Academy of Sciences of the USSR], 1954, issue XVI, pp. 314–335 (In Russian).
23. Klimchik G. Ya., Rikhter I. E., Bahur O. V. Losses of organic matter and nitrogen in young pine forests at different intensity of ground fires. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2005, issue XIII, pp. 55–57 (In Russian).
24. Boyko A. V. *Ekologo-fitotsenoticheskiye issledovaniya lesnoy rastitel'osti Nalibokskoy Pushchi* [Ecological and phytocenotic studies of forest vegetation of the Nalibokskaya Pushcha]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 208 p. (In Russian).
25. Molchanov A. A. *Produktivnost' organicheskoy massy v lesakh razlichnykh zon* [Productivity of organic matter in forests of different zones]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 276 p. (In Russian).
26. Gunyazhenko N. V. Changes in the microflora of forest soils as a result of the action of fire of different intensity. *Lesovedeniye i lesnoye khozyaystvo* [Silviculture and forestry], 1970, issue 3, pp. 175–181 (In Russian).
27. Rohzkov L. N., Shatravko V. G. Impact of traditional forestry activities on nutrient content and carbon fluxes in stands *Pineta – Piceeta oxalidosa – pleuroziosa – pteridiosa – myrilliosa*. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2, pp. 58–65 (In Russian).
28. Yushkevich M. V., Shyman D. V., Klimchik G. Ya., Bel'china O. G., Klysh A. S. Some features of the influence of forest felling on the content of chemical elements in coniferous phytocenoses in the conditions of the Negorelsky educational and experimental and Minsk forestry enterprises. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 1, pp. 42–51 (In Russian).

Информация об авторах

Климчик Геннадий Яковлевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: les@belstu.by

Шалимо Петр Владимирович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента, технологий бизнеса и устойчивого развития. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shalimo@belstu.by

Бельчина Олеся Григорьевна – аспирант кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: belchyna@belstu.by

Information about the authors

Klimchik Gennadiy Yakovlevich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: les@belstu.by

Shalimo Petr Vladimirovich – PhD (Economics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Management, Business Technologies and Sustainable Development. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shalimo@belstu.by

Bel'china Olesya Grigor'yevna – assistant lecturer, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belchyna@belstu.by

Поступила 21.10.2023

УДК 630*23:630*182.21:630*181

Л. Н. Рожков, А. С. Клыш, И. Ф. Ерошкина

Белорусский государственный технологический университет

СОЗДАВАТЬ ЛЕСА БУДУЩЕГО С УЧЕТОМ УРОКОВ ПРОШЛОГО

Выполнен анализ объемов и методов воспроизводства и выращивания лесов Беларуси, подвергнувшихся масштабному истощению за годы войны. Установлено два разных по эффективности лесохозяйственного производства периода: 1944–1983 и 1983–2022 гг. Раскрывается ключевая роль сосновой формации в развитии устойчивого лесного хозяйства Беларуси. Обоснована необходимость оптимизации породной и возрастной структуры лесов в целях достижения руководящих принципов неистощимости лесных ресурсов, относительно равномерного лесопользования и ведения рентабельного лесного хозяйства. Поставлена под сомнение целесообразность включения кустарников в покрытые лесом земли с целью увеличения лесистости. Отмечена масштабная смена сосны березой и другими мягколиственными породами и их влияние на качество лесов. Анализируется динамика стоимости древесных ресурсов Беларуси. Рекомендуются в разрезе почвенно-типологических групп рациональные методы лесовосстановления, подготовки лесокультурных площадей, виды посадочного материала, обращается внимание на различные мнения о применении сеянцев с закрытой корневой системой и др. Предложена условно оптимальная структура участка модальных насаждений лесного фонда Беларуси. Составлен прогноз заготовки древесины, отмечается крайне неравномерное лесопользование в перспективе.

Ключевые слова: леса будущего, леса Беларуси, оптимизация структуры лесов, покрытые лесом земли, сукцессия, равномерное лесопользование.

Для цитирования: Рожков Л. Н., Клыш А. С., Ерошкина И. Ф. Создавать леса будущего с учетом уроков прошлого // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 39–52.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-5.

L. N. Rozhkov, A. S. Klysh, I. F. Eroshkina

Belarusian State Technological University

**CREATE THE FORESTS OF THE FUTURE
WITH THE LESSONS OF THE PAST**

The analysis of the volumes and methods of reproduction and cultivation of forests in Belarus, subjected to large-scale depletion during the war years, is carried out. Two periods different in terms of the efficiency of forestry production have been established: 1944–1983 and 1983–2022. The key role of the pine formation in the development of sustainable forestry in Belarus is revealed. The necessity of optimizing the species and age structure of forests is substantiated in order to achieve the guiding principles of inexhaustible forest resources, relatively uniform forest management and cost-effective forestry. The expediency of including shrubs in forested lands, increasing the forest cover, has been called into question. A large-scale replacement of pine by birch and other soft-leaved species and its impact on the quality of forests were noted. The dynamics of the cost of wood resources in Belarus is analyzed. In the context of soil-typological groups, rational methods of reforestation, preparation of afforestation areas, types of planting material are recommended, attention is drawn to various opinions on the use of seedlings with a closed root system, etc. A conditionally optimal structure of the site of modal plantations of the forest fund of Belarus is proposed. A forecast for timber harvesting has been made, and extremely uneven forest management is noted in the future.

Keywords: forests of the future, forests of Belarus, forest structure optimization, forested lands, succession, uniform forest management.

For citation: Rozhkov L. N., Klysh A. S., Eroshkina I. F. Create the forests of the future with the lessons of the past. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 39–52 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-5.

Введение. Лес – возобновимый природный ресурс. Его возобновительный потенциал практически неограничен. Только целевое антропогенное воздействие или максимально ограниченная жиз-

ненная природная среда могут привести к образованию абсолютно безлесной суши нашей планеты.

Человек нуждается в пользовании всеми многочисленными материальными и нематериальными

ценностями леса. Но особая потребность людей состоит в древесине – воспроизводимом лесом уникальном естественном полимере. При этом в процессе древесинопользования естественно воспроизводимый лес, как правило, не удовлетворяет потребительским запросам относительно породного состава и товарной структуры древесного сырья, к тому же его запас постоянно должен быть в наличии и в равных объемах образуемого.

Лучшее определение цели лесного хозяйства и объяснение его необходимости было сделано Г. Ф. Морозовым: «Лесоводство – дитя нужды. Пока леса было много, отсутствовала забота о неистощимости пользования им, когда леса стало мало или явилось опасение за возможность истощения лесных запасов, тогда впервые возникает мысль о такой организации пользования лесами, которая не вела бы к их истощению, возникает счастливая и великая идея о постоянстве пользования лесом, которая проникает все лесоводство и составляет его душу и самую характерную черту» [1, с. 34].

Белорусский лес за последние восемь с половиной десятилетий формировался в условиях от масштабного истощения до больших объемов в восстановления вручную с образованием богатой лесными ресурсами страны мира. При этом неизбежными были упущения, которые скрывались за большими успехами лесовыращивания [2]. В данной статье на основе опыта послевоенного воспроизводства и выращивания белорусского леса рассматриваются более совершенные лесохозяйственные подходы формирования устойчивых к современным воздействиям лесов будущего.

Основная часть. Анализ динамики, объемов и методов воспроизводства и выращивания лесов Республики Беларусь выполнен на основе государственных учетов лесного фонда Республики Беларусь [3–6], государственных лесных кадастров Республики Беларусь (далее ГЛК) [7], литературных источников [2, 8–12] и собственных исследований авторов статьи [13–16].

Подготовленные с участием Республики Беларусь и принятые к действию глобальные Принципы лесоводства [2] способствовали увеличению **лесного покрова** страны.

По предположительным расчетам В. Ф. Багинского [8], лесной фонд Белорусской ССР по состоянию на 1944 г. составлял 6,13 тыс. га, включая лесные земли 5,49 тыс. га, из них покрытые лесом – 3,74 тыс. га. По сравнению с 1940 г. в результате истощительных рубок немецкими оккупантами лесистость республики снизилась с 30 до 18% (минус 12 п. п.) [8].

Лесной фонд был представлен [9] лесами государственного значения (91,4% площади) и колхозными лесами (8,6%). По причине низкого уровня ведения лесного хозяйства в колхозных лесах началась их передача государственным органам лесного хозяйства. Этот процесс завершился в 2000 г. [10].

По состоянию на 1 января 2023 г. [7] лесной фонд республики (9719,6 тыс. га) распределен между шестью республиканскими органами государственного управления и другими ведомствами, включающими Министерство лесного хозяйства (89,0% от общей площади), Министерство по чрезвычайным ситуациям (2,2%), Министерство образования (0,3%), Управление делами Президента Республики Беларусь (7,9%), Национальную академию наук Беларуси (0,4%) и местные исполнительные и распорядительные органы (0,2%).

Ранее [13] была изложена динамика земель лесного фонда Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь. Показатели лесов Минлесхоза, как отмечает А. Д. Янушко [11, с. 113], значительно выше, чем у других лесовладельцев, как и по республике в целом. На это обращаем внимание по той причине, что многие характеристики лесов из настоящей публикации (табл. 1 и др.) и выводы по состоянию, особенностям воспроизводства и выращивания лесов Республики Беларусь будут отличаться от данных многих исследователей, которые приводятся на основе показателей Минлесхоза, как правило, завышенных для лесов Беларуси в целом.

В структуре лесного фонда значительную площадь занимают нелесные земли (в среднем порядка 7,6% общей площади). Они выполняют важные для лесохозяйственного производства инфраструктурные функции или являются временно не представляющими интереса для иных землепользователей. Динамика площади таких земель непрерывно изменяется (от 306 до 972 тыс. га), что влияет и на динамику лесного фонда республики в целом.

За послевоенный период (1944–2023 гг.) увеличилась площадь лесного фонда республики в 1,43 раза (+3589 тыс. га) и общий запас в 7,3 раза (+1643 млн м³), в том числе средний запас – в 3,3 раза (+158 м³/га). Большая часть увеличения (+60%) общей площади лесного фонда произошла в первой половине периода (1944–1983 гг.), что составило 2135 тыс. га.

Лесовосстановительные работы на не покрытых лесом землях проводились практически на следующий год после их образования. Доля не покрытых лесом в среднем составляла 5,5%, покрытых лесом – от 92,9 до 95,8% площади лесных земель (рис. 1).

Таблица 1

Динамика земель лесного фонда и насаждений Республики Беларусь

Годы учета	Общая площадь лесного фонда, тыс. га	Лесные земли, тыс. га	Покрытые лесом земли (лесные насаждения)					Соотношение сосновых и березовых насаждений, %
			всего, тыс. га	с преобладанием сосны		с преобладанием березы		
				тыс. га	% от покрытых лесом	тыс. га	% от покрытых лесом	
1945	6159,0	5489,2	4589,0	2166,8	47,2	550,7	12,0	100:25
1956	7345,3	7036,8	6366,1	2778,0	43,6	602,2	9,5	100:22
1961	8014,0	7509,1	6687,6	3108,8	46,4	777,0	11,6	100:25
1966	8026,3	7440,4	6754,2	3300,7	48,9	812,3	12,0	100:25
1973	8178,4	7736,8	7046,0	3552,4	50,4	824,0	11,7	100:23
1978	8242,0	7887,6	7167,6	3388,3	47,2	887,5	12,4	100:26
1983	8264,9	7942,6	7192,3	3540,6	49,2	999,2	13,9	100:28
1988	8054,8	7748,7	7027,7	3464,8	49,3	1002,6	14,3	100:29
1994	8676,1	7775,9	7371,7	3305,6	44,8	1049,7	14,2	100:32
2004	9247,5	8275,7	7845,1	3939,9	50,2	1629,5	20,8	100:41
2006	9350,2	8436,0	7835,3	3951,7	50,4	1758,0	22,4	100:44
2011	9432,7	8624,9	8046,0	4034,8	50,1	1852,7	23,0	100:46
2016	9549,2	8693,9	8239,8	4142,8	50,3	1909,5	23,2	100:46
2021	9690,0	8882,7	8334,4	4062,8	48,7	1949,9	23,4	100:48
2023	9719,6	8935,2	8335,3	4048,9	48,6	1954,4	23,4	100:48

Облесение огромных (2017,4 тыс. га) не покрытых лесом земель, образовавшихся за военные годы, было осуществлено в течение первых 12 послевоенных лет. В результате к 1956 г. **лесистость территории Беларуси** достигла 30,7% (+12,7%). Генеральным планом развития лесного хозяйства на 1959–1975 г. предусматривалось достижение «оптимальной лесистости» в республике на уровне 32,4% [12, с. 7]. Эта задача была успешно решена к 1966 г. (рис. 1).

В настоящее время, как показано на рис. 1 лесистость Беларуси составляет 39,8%. Государственный лесной кадастр по состоянию на 01.01.2023 г. [7, с. 5] оценивает лесистость территории республики равной 40,1%. Расхождения связаны с определением лесистости и формулой ее расчета. ГЛК определяет лесистость как процентное отношение площади покрытых лесом земель к общей площади территории Республики Беларусь. При этом к покрытой лесом относят площадь под древесными породами и кустарниками [7].

Мы исходим из классического определения лесистости, как отношения покрытой лесом площади к общей площади страны, района [17]. Покрытые лесом площади – это территории, фактически занятые лесами естественного и искусственного происхождения [18]. В свою очередь, лес понимается как экологическая система, биогеоценоз, в котором главной жизненной формой являются деревья [19].

Включение кустарников в покрытые лесом земли произошло впервые при государственном учете лесов 1994 г. Как отмечалось в Пояснительной записке к материалам учета [20], за межучетный период 1988–1994 гг. произо-

шло уменьшение покрытых лесом земель в связи с передачами земель в/из лесного фонда и изменением срока перевода несомкнувшихся лесных культур в покрытые лесом земли с 5 до 7 лет. Руководство отрасли считало тогда, что прирост лесистости в 0,8 п. п. будет признан «недостатком» лесохозяйственной деятельности на фоне увеличения лесистости (+5,3 п. п.) за предыдущий (1983–1988 гг.) период. Сославшись на Международную стандартную статистическую классификацию угодий, в состав покрытых лесом земель включили 202,7 тыс. га кустарников. В результате изменение лесистости за 1988–1994 гг. составило +1,8 п. п.

В той же пояснительной записке отмечено, что «почти 270 тыс. гектаров, или пятая часть земель лесного фонда сельскохозяйственных предприятий, занято не имеющими хозяйственной ценности кустарниками» [20, с. 3].

Получается, что в государственном лесном фонде кустарники являются лесом, в противовес сельскохозяйственным предприятиям и имеют хозяйственную ценность. Кустарники в государственном лесном фонде продолжают оставаться лесом (77 377,2 га) и их стоимость, как древесного ресурса, оценивается суммой около 51 млн руб. [7].

Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН ЕЭК/ФАО определяет лес как «участок земли, площадью более 0,5 га, на котором растут деревья высотой более пяти метров с сомкнутостью крон более 0,1 или деревья, способные на данном участке достичь этих пороговых значений». При этом о кустарниковой растительности ничего не сказано.

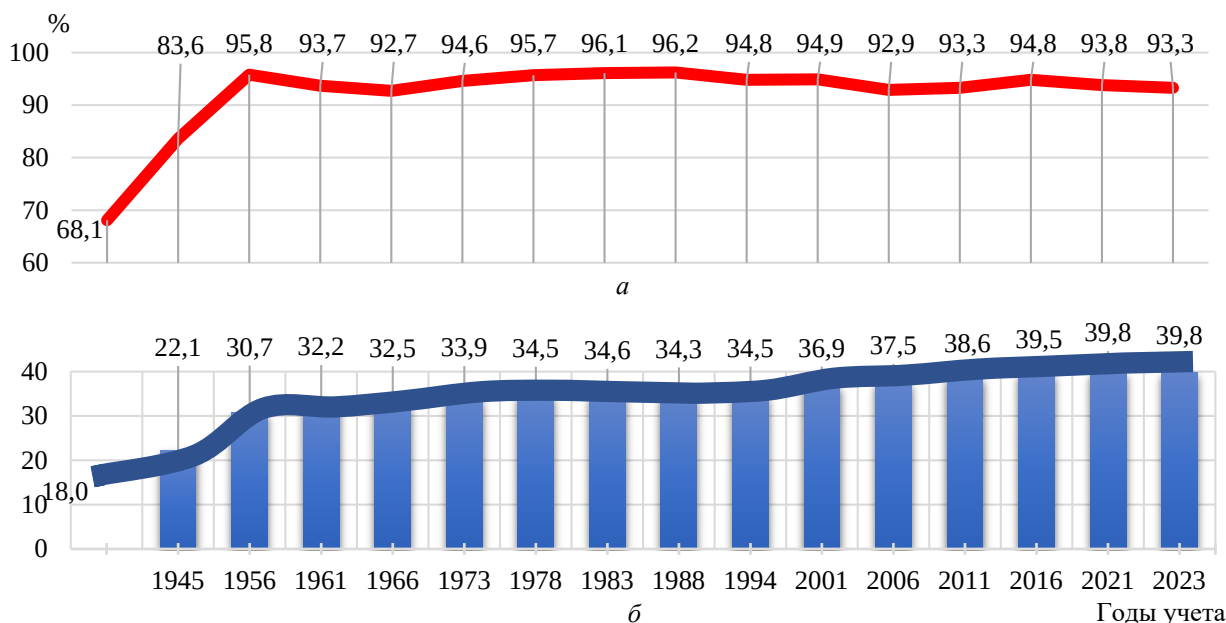


Рис. 1. Динамика лесистости покрытых лесом земель Беларуси:

a – покрытые лесом земли, %; *б* – лесистость

В терминах ЕЭК ФАО/ООН (№ 71) к прочим лесопокрытым землям отнесены в том числе земли с кустарниковым покровом, но не раскрываются их характеристики. При глобальной оценке лесных ресурсов в 2020 г. [21, с. 47] допускается некоторая гибкость в национальном определении лесов. В частности, страна может выбрать минимальные пороговые значения для высоты деревьев от 2 до 5 м.

Таким образом, обозначенный в 1994 г. Министром лесного хозяйства Республики Беларусь [20] переход на международную классификацию угодий оказался избирательным. Кустарники стали «лесом», а при переводе в покрытые лесом земли сохранили высоту деревьев около 1 м, вместо установленных классификацией 5 м.

Республика Беларусь – одна из немногих в мире стран, богатых лесом. Нужно ли нам выращивать «кустарниковый лес». Где-то в пустыне и отдельный кустарник является уникальным явлением, а уж кустарниковую растительность здесь следует понимать первичным элементом сукцессии леса. В наших природно-климатических условиях также есть место кустарниковой растительности как объекту биоразнообразия, месту обитания диких животных и птиц, средству предотвращения водной и ветровой эрозии и т. п. В лесном фонде кустарниковая растительность должна учитываться как вид нелесных земель и не должна относиться к покрытым лесом землям.

Леса Беларуси являются многопородными (более 20 видов), смешанными. Хозяйственная деятельность и природно-климатические изменения последних десятилетий влияют на динамику **породной структуры лесов Беларуси**. Имеют место значительные колебания площа-

дей хвойных, твердолиственных и мягколиственных насаждений. Процент насаждений главных пород в анализируемом периоде (1944–2023 гг.) изменялся в таких пределах: сосновые леса – 50–60%, еловые – 9–13%, дубовые – 4–5%, черноольховые – 8–10%. Среди второстепенных наблюдается устойчивый рост площади березовых лесов – от 9 до 24%, что является нежелательной закономерностью.

Дубовые и черноольховые леса занимают относительно небольшие площади в силу ограниченного наличия предпочитаемых или лесных земель. Еловые леса в Беларуси тесно коррелируют с климатическими циклами похолодания и потепления, которым весьма подвержена наша страна.

Сосна и береза имеют схожий экологический ареал, могут произрастать практически во всех почвенно-типологических условиях лесных земель Беларуси. Являются конкурирующими видами. Результат взаимодействия между ними в естественной среде произрастания, как правило, ведет к смене сосны березой. Поддерживать желаемое соотношение между площадями сосновых и березовых лесов возможно только целевым лесопроизводством. Наибольший интерес для нас в части породной структуры представлял анализ динамики сосновой и березовой лесных формаций Беларуси. Выборочная диаграмма трех учетных периодов (1945, 1983 и 2023 гг.) свидетельствует о значительных разновекторных изменениях формационной структуры лесов Республики Беларусь. Наибольшим изменениям подвергаются площади сосновых и березовых лесов республики (рис. 2).

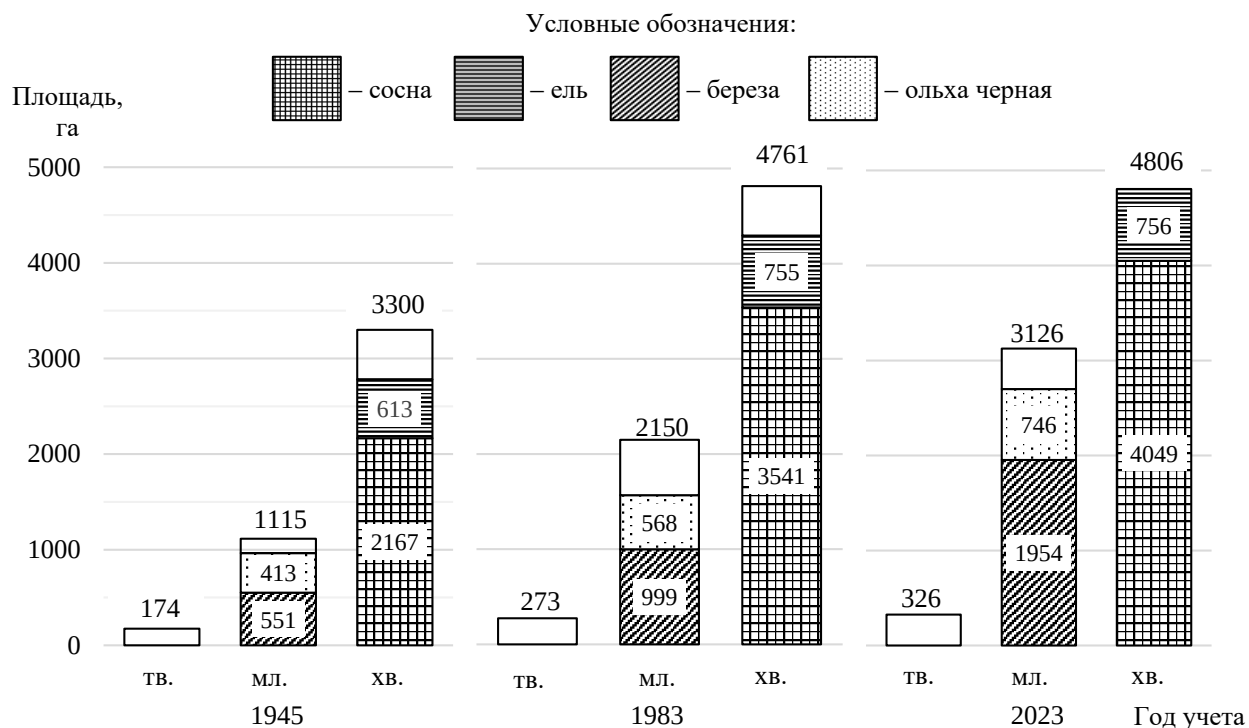


Рис. 2. Выборочная диаграмма изменения формационной структуры лесов:
тв. – твердолиственные; мл. – мягколиственные; хв. – хвойные

За истекший 80-летний период (1944–2023 гг.) в лесном фонде Беларуси площадь сосновой формации увеличилась на 1882 тыс. га (+86,9%), что является исключительно высоким достижением белорусского лесоводства. В приращении площади лесных земель (+3446 тыс. га) сосновые леса заняли 54,6%. Площадь березовой формации увеличилась на 1404 тыс. га, что составило 40,7% от прироста площади лесных земель. Соотношение прироста сосновых и березовых лесов составило 100:75. Последняя цифра вызывает тревогу в части рационального воспроизводства древесных пород на переданных в лесной фонд новых лесных землях. В рекомендациях ученых [13] предусматривается в составе покрытых лесом земель доля сосны 60% и березы 13%, что предполагает их соотношение 100:22. Следствием динамики сосновой и березовой формаций в анализируемом периоде (табл. 1) является текущая доля насаждений с преобладанием сосны 48,6% и березы 23,4%. При этом соотношение сосны и березы на покрытых лесом землях изменилось со 100:25 (1945 г.) на 100:48 (2023 г.). Наш комментарий по этому вопросу состоит в следующем: при выборе для выращивания главных древесных пород преимущество остается за той породой, которая в тех или иных условиях дает максимальный доход [11, с. 170].

Эту задачу решает стоимостная оценка земли как средства производства [22], результаты которой представлены в лесном кадастре

[7, приложение 17]. Руководствуясь принятой методикой [22] и установленными для ГЛК на 01.01.2023 г. ценами на тактовую стоимость древесины основных лесных пород, отпускаемых на корню, была определена стоимость древесных ресурсов в лесном фонде Республики Беларусь (табл. 2).

Стоимость древесных ресурсов тесно коррелирует с показателями площадей и запасов насаждений преобладающих пород и их возрастом. При общем запасе 1905,7 млн м³, в том числе 65% хвойных пород и 24% спелых и перестойных, стоимость древесных ресурсов в 2023 г. составила 14,66 млрд руб. [7]. Приняв эту сумму за 100%, видим, что в 1961 г. она была меньше, чем в 2023 г., на 68,6% (–12,06 млрд руб.), в 1983 г. – на 34,8% (–7,32 млрд руб.) и в 2001 г. – на 23,2% (–3,40 млрд руб.). Преобладающая доля стоимости древесных ресурсов обеспечивается древостоями старших возрастов (83,4%). На долю молодняков, включающих 30–40-летние насаждения мягколиственных пород, в анализируемом ряду насаждений приходится в среднем 16,6% стоимости древесных ресурсов.

Что касается роли древесных пород в анализируемых периодах, то в стоимости преобладает доля сосны – в среднем 66,9%, затем ель – 12,8% и твердолиственные породы – 12,5%; доля березы составляет 4,4%, ольхи черной – 2,6%. Однозначно, ключевым древесным ресурсом, определяющим основной доход лесного хозяйства Беларуси, являются **сосновые леса, сосновая формация**.

Динамика стоимости древесных ресурсов в лесном фонде Республики Беларусь

Преобладающие породы	Стоимость древесных ресурсов на год учета, млрд руб.															Стоимость условно оптимального модального насаждения, руб./га		
	01.01.1961			01.01.1983			01.01.2001			01.01.2023			01.01.2063, прогноз					
	всего	в возрасте, лет		всего	в возрасте, лет		всего	в возрасте, лет		всего	в возрасте, лет		всего	в возрасте, лет		всего	в возрасте, лет	
		≤40	≥41		≤40	≥41		≤40	≥41		≤40	≥41		≤40	≥41		≤40	≥41
1. Хвойные	3,42	1,01	2,41	5,97	1,47	4,50	9,31	0,79	8,52	11,79	0,43	11,36	7,91	1,65	6,26	1371	134	1237
В том числе сосна	2,77	0,88	1,89	4,17	0,93	3,24	8,44	0,64	7,80	11,08	0,32	10,76	5,89	1,01	4,88	1183	119	1064
2. Твердолиственные	0,84	0,03	0,81	0,87	0,18	0,69	1,20	0,06	1,14	1,35	0,04	1,31	0,98	0,17	0,81	295	12	283
3. Мягколиственные, про- чие древесные и кустарники	0,34	0,17	0,17	0,50	0,38	0,12	0,75	0,28	0,47	1,52	0,26	1,26	1,40	0,08	1,32	121	41	80
В том числе: береза	0,14	0,07	0,07	0,25	0,03	0,22	0,52	0,27	0,25	0,96	0,17	0,79	0,83	0,03	0,80	64	16	48
ольха черная	0,15	0,06	0,09	0,18	0,11	0,07	0,10	0,01	0,09	0,53	0,08	0,45	0,48	0,04	0,44	55	24	31
Итого	4,60			7,34			11,26			14,66			10,29	1,90	8,39	1787	187	1600
4. Покрытые лесом земли, руб./га	688			888			1435			1759			1236			1787		
В том числе с долей, %: сосны	60,2			56,8			75,0			75,6			57,2			86,3		
березы	3,0			3,4			4,6			6,5			8,1			3,6		
ольхи черной	3,3			2,5			0,9			3,6			4,7			3,1		

Доля сосны на покрытых лесом землях в 2006–2022 гг. уменьшилась (табл. 1). Такая тенденция не являлась общей закономерностью в истекшем послевоенном периоде: имел место рост (1956–1973 гг.), затем уменьшение доли сосны (1973–1994 гг.), снова рост (1994–2016 гг.) и снова уменьшение. При дальнейшем анализе причин такой разновекторной динамики мы обратили внимание на эффективность лесовосстановления предыдущих периодов и его влияние на результат в возрасте главной рубки, на структуру эксплуатационного фонда. Созданные в период воспроизводства молодые насаждения, в силу небольших запасов и низкой товарной структуры древостоев в этом возрасте, создают невысокую стоимость древесных ресурсов. Но по достижении возраста главной рубки бывшие «молодняки» определяют конечный доход лесного хозяйства. При этом обращает на себя внимание решающее влияние сосновых молодняков в общей стоимости древесных ресурсов.

При условно оптимальной структуре лесов (табл. 2) доля сосновых молодняков (≤ 40 лет, I и II классы возраста) в общей стоимости древесных ресурсов составляет 6,65%, в то время как в 1961 г. было 19,1%, в 1983 г. – 12,7%, в 2001 г. – 5,7%, в 2023 г. – 2,2% и по прогнозу в 2063 г. – 8,2%. Разная стоимость молодняков обуславливает в дальнейшем разные площадь и запас в конце оборота рубки, т. е. спелых сосновых древостоев в возрасте главной рубки. Выявились два почти противоположных по результатам воспроизводства периода: 1944–1983 и 1983–2022 гг. (табл. 3). Для удобства анализа назовем созданные при воспроизводстве в послевоенный период насаждения всех пород *в возрасте до 40 лет «условно молодняками»*. Спустя последующие 40 лет выращивания эти «условно молодняки» являют собой насаждения *возрастом 41 и более лет*, т. е. представлены в лесном фонде уже как средневозрастные или приспевающие и спелые; назовем их в этом анализе *«условно эксплуатационным фондом»*.

Созданные в период 1944–1983 гг. «условно молодняки» характеризуются относительно высоким качеством породной структуры лесного фонда: главные породы занимают 78,0% покрытых лесом земель, в том числе сосна, как ключевой лесной ресурс для Беларуси – 59,1%. В целом можно сделать вывод о почти оптимальной породной структуре и признать работу лесохозяйственной отрасли по воспроизводству лесов будущего как высоко эффективную. Следствием работы лесоводов 1944–1983 гг. является высококачественный эксплуатационный фонд по состоянию на 1 января 2023 г. [7, приложение 7]: запас спелых и перестойных – 459 934,7 тыс. м³ (24,1% от общего запаса), в том числе спелых и перестойных сосновых древостоев 217 775,8 тыс. м³ (47,3% от запаса спелых и перестойных). Запас древостоев главных пород (хвойных, твердоли-

ственных и ольхи черной из группы мягколиственных) составляет 76,9% от общего запаса.

В противовес, созданные в период 1983–2022 гг. «условные молодняки» всех пород характеризуются значительно более низким качеством породной структуры: главные породы занимают 56,4% площади (в 1,38 раза меньше, чем было за 1944–1983 гг.); сосновые молодняки – 31,2%, что в 1,89 раза меньше; «предоставлено» березе – 31,9% (больше в 1,82 раза по сравнению с площадью под березой в 1944–1983 гг.).

Прогнозируемый «условно эксплуатационный фонд» в 2063 г., как следствие работы лесоводов 1984–2022 гг. по воспроизводству вышеуказанных лесов будущего, качественно уступает показателям 2023 г. Запасы «условно эксплуатационного фонда» из насаждений главных пород ожидаются в количестве 142,6 тыс. м³ (в 1,48 раза меньше, чем на 01.01.2023), в том числе сосны 84,2 тыс. м³ (в 1,82 раза меньше).

Возрастут запасы менее ценных второстепенных пород в 1,49 раза. В совокупности ожидается уменьшение дохода лесного хозяйства в 1,39 раза по сравнению с 2022 г. Это результат низкоэффективной работы по воспроизводству лесов в период 1983–2022 гг. Нужно немедленно исправлять ситуацию в части объемов воспроизводства лесов и качества их породного состава. Белорусы двадцать второго столетия заслуживают более значительного вклада лесного хозяйства в ВВП страны, чем ожидаемый в 2070–2100 гг. от результатов бездарного управления по воспроизводству лесов в 1983–2022 гг.

С учетом почвенно-типологических условий лесных земель Беларуси [14, с. 5–32; 23, с. 26–32], рекомендаций ученых [15, с. 138] и установленных стратегическими планами [24, 25] целевых показателей рекомендуем следующее рациональное участие древесных пород для лесных земель Республики Беларусь (рис. 3). Наиболее приемлемыми для **воспроизводства сосны** являются [23, с. 26–32] почвенно-лесотипологические группы (далее ПТГ) с номерами: 2, 3, 5–13, 22, 36, 38–40, 45, 48, 50 и 51.

По соображениям хозяйственной целесообразности и рационального использования лесных земель рекомендуется не *планировать* воспроизводство сосновой формации в *лесорастительных условиях* снытевого, крапивного, папоротникового и таволгового типов. Предлагается ограничить, с сохранением типологического разнообразия сосны, планирование до 5–10% от групп типов леса осоквой и приручейно-травяной как более продуктивных для производства ели, дуба, ольхи черной и других ценных лесообразователей. Также оправдано планировать воспроизводство сосны до 40% площади в долгомошной и 75% в черничной группе типов леса, предоставляя остальную площадь для воспроизводства еловой формации.

Таблица 3

**Влияние результатов 40-летнего периода воспроизводства лесов на структуру этих лесов
по завершении оборота рубки**

Насаждения древесных пород в составе покрытых лесом земель площадью 1,0 тыс. га лесного фонда Беларуси	Средний породный состав 1,0 тыс. га покрытых лесом земель лесного фонда Беларуси					
	Созданные «условно молодняки» всех пород возрастом до 40 лет		«Условно эксплуатационный фонд» (насаждения всех пород возрастом 41 и более лет), образованный «молодняками» предыдущего 40-летнего периода, достигшими возраста рубок главного пользования			
	за 1944–1983 гг.	за 1983–2022 гг.	на 01.01.2023		прогноз на 01.01.2063	
	га	га	га	тыс. м ³	га	тыс. м ³
1. Главные породы, из них:						
сосна	591	312	526	153,2	257	84,2
другие хвойные	91	83	89	29,7	72	27,0
дуб и другие твердолиственные	38	30	41	9,2	30	6,9
ольха черная	60	139	85	19,1	181	24,5
<i>Итого главных пород</i>	780	564	741	211,2	540	142,6
2. Второстепенные породы, из них:						
береза	175	319	192	42,6	323	52,4
другие мягколиственные и кустарники	45	117	67	9,4	137	25,1
<i>Итого второстепенных пород</i>	220	436	259	52,0	460	77,5
<i>Всего насаждений</i>	1000	1000	1000	263,2	1000	220,1

Рекомендуется освоение 90–100% площади групп типов леса лишайниковой, вересковой, брусничной, мшистой, орляковой, багульниковой, сфагновой и осоково-сфагновой для воспроизводства сосны, имеющей здесь преимущество по продуктивности, конкурентности и устойчивости перед другими главными породами-лесообразователями.

Как светолюбивая порода сосна менее конкурентна перед быстрорастущим возобновлением «пионерных» древесных пород (березы, осины, ольхи серой) и кустарников. Опыт отечественных лесоводов по воспроизводству коренных сосновых лесов в этой связи ориентирован на высококую искусственную компоненту их лесовосстановления. При этом существует понимание неизбежного снижения естественности сосновых лесов в целом и понижения устойчивости среди них искусственных лесов.

В последние годы лесохозяйственная практика планирования фонда лесовосстановления сосны утвердилась в соотношении ее воспроизводства искусственным методом (лесные культуры) в объеме 60% и естественного возобновления (с мерами содействия или без мер содействия) в объеме 40% от лесовосстановления/лесоразведения сосны. Эта норма объективно соответствует ходу естественного возобновления сосновой экосистемы Беларуси в современной природно-кли-

матической и социально-экономической окружающей среде и может быть принята к исполнению как минимум в среднесрочной перспективе.

Важное значение имеет *подготовка лесокультурной площади*. Это же относится к очистке лесосек от порубочных остатков и созданию иных необходимых условий для естественного возобновления сосны. В этом плане из опыта скандинавских стран рекомендуется следующая технология.

При создании лесных культур на вырубках целесообразно произвести удаление порубочных остатков и корчевание пней. Совмещение лесозаготовительных работ в части очистки лесосек с подготовкой площади путем очистки пней (до 4,0–4,8 млн м³ ежегодно) для создания лесных культур улучшит условия для последующего ухода за ними, приведет к расширению использования биомассы порубочных остатков на биотопливо или в других целях (плитное, гидролизное производство) и в целом окажется вполне рентабельным мероприятием. В отношении минерального питания лесных растений отметим, что основную часть элементов питания древостой потребляет из более глубоких слоев почвы (свыше 30 см). По этим причинам вывод незначительных объемов азота и зольных элементов из верхних слоев почвы экосистемы при удалении порубочных остатков не становится критическим в почвенном питании насаждений.



Рис. 3. Рекомендуемое участие древесных пород в составе лесных земель Беларуси

Метод лесовосстановления является одним из ключевых факторов воспроизводства сосновой формации на участках главной рубки леса.

Мертвая лесная фитомасса, включающая порубочные остатки от лесозаготовок, является источником выбросов углекислого газа, который выделяется в результате биологического разложения («почвенного дыхания»). Сбор и использование порубочных остатков от лесозаготовок в топливных и иных утилитарных целях обеспечат сокращение выбросов парниковых газов. Углерод биомассы в этом процессе рассматривается *нейтральным углеродом*, поскольку уменьшает потребность в ископаемых углеводородах.

При естественном возобновлении участков главной рубки достаточно ограничиться удалением сучьев, ветвей, тонких вершин деревьев без корчевания пней. Также производится минерализация поверхности почвы не менее 30% на непокрытых лесами землях, а под пологом леса — не менее 20% от площади участка.

Сегодня увеличиваются объемы создания лесных культур с использованием *посадочного материала с закрытой корневой системой* (далее ЗКС). В этой связи выскажем свой комментарий.

Метеонаблюдения за атмосферными осадками до сих пор утверждают, что территория Беларуси относится к зоне с 5-процентной вероятностью проявления засухи. Однако последние как минимум 2 десятилетия свидетельствуют о повторяемости засухи в Беларуси через 2–3 года и даже ежегодно (30–100% вероятность). При этом засухи стали нередко проявляться поздней весной или в начале лета — во время интенсивной корневой жизнедеятельности и приживаемости растений.

Закрытая корневая система сеянца (ЗКС), сформировавшаяся в крайне благоприятных тепличных условиях, не может адаптироваться к выживанию в обезвоженной до мертвого запаса почвенной среде при засухе. Даже на песчаных и супесчаных, тем более тяжелых по механическому составу суглинистых почвах торфяной ком субстрата сеянца с ЗКС «спекается» и длительное время не способен восстановить свои водно-физические свойства по завершении засушливого периода. Следствием является снижение приживаемости или гибель сеянцев.

Использование посадочного материала с ЗКС при создании лесных культур воспринимается неоднозначно в практике лесовосстановления некоторых зарубежных стран. Имеют место негативные отзывы о применении сеянцев с ЗКС от белорусских лесничих, мастеров леса и других практических работников лесного хозяйства.

Резюмируя предложения по совершенствованию воспроизводства и выращивания сосновой формации Беларуси [16], возможно, в чем-то дискуссионные, а также вышеизложенный анализ ее динамики за истекший 80-летний период, заметим, что как успешные, так и неуспешные результаты создания и формирования сосновых лесов обусловлены объективными условиями лесохозяйственной деятельности, проявляемыми не только в Беларуси, но и во многих других странах.

Сошлемся на справедливость пророческих слов Г. Ф. Морозова, произнесенных во время выступления на XI Всероссийском лесном съезде в Туле в 1909 г. [26, с. 362]: «... вопрос о возобновлении сосны является «большим вопросом» нашей лесохозяйственной деятельности...» с последующим добавлением «... все способы рубок применяются к сосновым лесам, причем — что именно и характерно — каждый из них сопровождается в одних случаях успехом, в других неуспехом».

Руководящие принципы неистощимости лесных ресурсов относительно равномерного лесопользования и ведения рентабельного лесного хозяйства соблюдаются только в случае равномерного распределения насаждений по классам возраста. Этому условию в наибольшей степени соответствует «нормальный лес» [11, с. 175], в основе которого лежит регулирование оптимальной **возрастной структуры**.

В целях оценки качества имеющихся насаждений по отношению к рекомендуемым с оптимальным участием древесных пород (рис. 3) и запасами указанных пород, принятыми из таблиц хода роста [23, с. 166–188] для модальных древостоев (полнота 0,75, II класс бонитета), были рассчитаны показатели условно «нормального» участка покрытой лесом территории лесного фонда Беларуси площадью 1,0 тыс. га (табл. 4).

Таблица 4

**Условно оптимальная структура участка модальных насаждений
лесного фонда Беларуси площадью 1,0 тыс. га**

Преобладающие древесные и кустарниковые породы	Возраст насаждений, лет					
	≤40		≥41		всего	
	га	тыс. м ³	га	тыс. м ³	га	тыс. м ³
1. Хвойные	315	23,4	395	100,3	710	123,7
В том числе сосна	266	20,8	334	84,7	600	105,5
2. Твердолиственные	33	1,4	57	11,1	90	12,5
3. Мягколиственные	122	15,3	73	22,8	195	38,1
В том числе:						
береза	60	7,8	45	14,4	105	22,2
ольха черная	53	6,2	27	7,9	80	14,12
4. Прочие древесные породы	4,8	0,6	0,2	0,1	5,0	0,7
<i>Всего древесных и кустарниковых пород</i>	<i>474,8</i>	<i>40,7</i>	<i>525,2</i>	<i>134,3</i>	<i>1000,0</i>	<i>175,0</i>

Стоимость древесных ресурсов условно «нормального» белорусского леса в ценах 2023 г. составляет 1787 руб./га (табл. 2). В составе покрытых лесом земель лесного фонда с «нормальными» насаждениями (табл. 4) хвойные породы занимают 71,0% площади, твердолиственные – 9,0%. Молодняки хвойных пород занимают 31,5%, твердолиственных – 3,3%. Мягколиственные насаждения занимают 19,5% площади покрытых лесом земель в целом. Доля хвойных молодняков (≤40 лет) среди хвойных насаждений составляет 44%, среди твердолиственных – 36%.

Диаграмма распределения возрастных групп лесов Беларуси при учетах 1961, 1983, 2001, 2023 и 2063 (прогноз) годов свидетельствует о крайне неравномерной представленности площадей древостоев до и старше 40-летнего возраста среди покрытых лесом земель лесного фонда (рис. 4). Прогноз на 2063 г. объективно исходит из неизменной пока практики лесовосстановления в 1984–2023 гг.

Показатели лесов учета 1961, 1983, 2001 и 2023 гг. варьировали в следующих пределах:

– в породной структуре хвойные занимали от 57,7 до 68,8% площади, твердолиственные – от 3,9 до 5,1%, мягколиственные – от 27,6 до 37,5% (тренд только на увеличение);

– молодняки в составе хвойных занимали от 62,7 до 19,2% (тренд только на уменьшение).

Как видим, все анализируемые леса по количественным и качественным оценкам не соответствовали «нормальному» лесу. Это относится также к прогнозируемым лесам 2063 г.: доля хвойных – 59,4%, твердолиственных – 5,1% и мягколиственных – 38,5%; излишняя доля хвойных молодняков – 67,2% при крайне малой доле средневозрастных, приспевающих и спелых сосновых и еловых лесов – 18,2% от общей площади покрытых лесом земель лесного фонда республики.

Сложившаяся и прогнозируемая породная и возрастная структуры лесов Беларуси определяли и определяют на будущее крайне неравномерное **лесоупользование**, в частности объемы **заготовки древесины** (табл. 5).

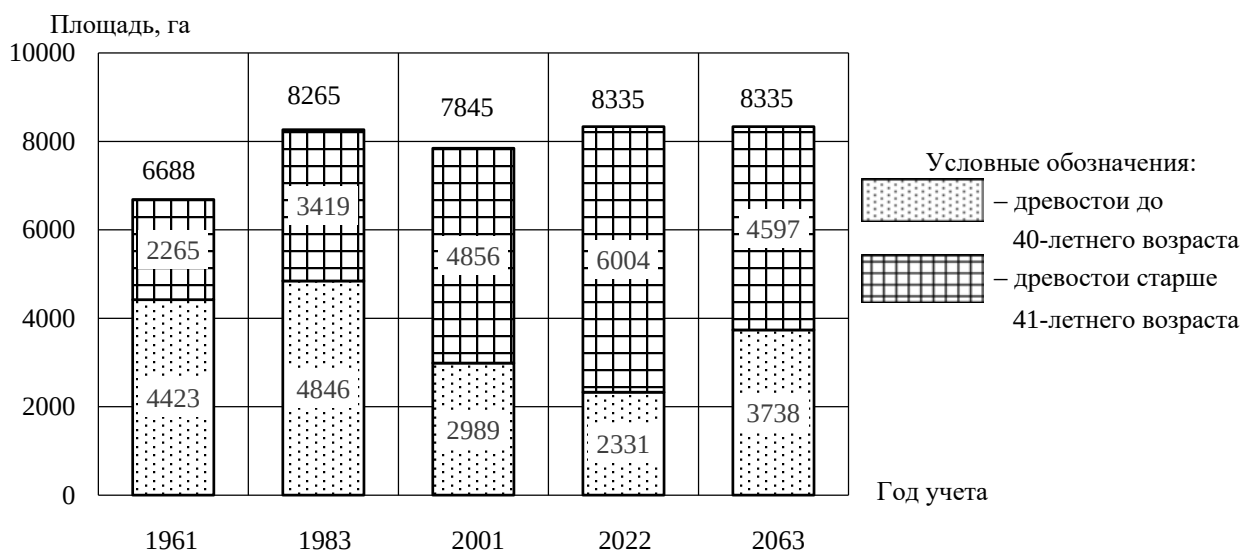


Рис. 4. Динамика древостоев до и старше 40-летнего возраста в лесном фонде Республики Беларусь

Таблица 5

Прогноз заготовки древесины в Республике Беларусь (сосна, ликвид, тыс. м³)

Год учета	Всего	Рубки главного пользования	Рубки промежуточного пользования			Прочие рубки
			всего	рубки ухода	выборочные санитарные рубки и др.	
1970	2924	1050	1634	1080	554	240
1984	3952	1370	2342	1546	796	240
2001	5588	2450	2898	1827	1071	240
2016	8324	2514	5570	4142	1428	240
2030	9940	5660	3210	2675	535	1070
2050	6640	4600	1620	1120	500	420
2070	5360	2400	2540	2040	500	420

Объем заготовки сосны в 2030 г. составит 9940 тыс. м³ (из расчетов Стратегического плана) [24]. Думаем, это максимум, которого больше не будет никогда. До 2030 г. имеет место рост, после 2030 г. будет наблюдаться спад (к 2070 г. – до 5360 тыс. м³), затем, надеемся, наступит стабилизация с некоторым ростом объема заготовки сосны.

По прогнозу расчетная лесосека к 2030 г. возрастет до 5660 тыс. м³, затем произойдет уменьшение до 2400 тыс. м³ к 2070–2090 гг. и снова дальнейший рост.

Прореживания и проходные рубки, а также некоторые осветления и прочистки имели максимальные показатели в 2001–2010 гг. На программу «Интенсивное лесоводство» был выделен кредит, благодаря которому Всемирному банку был выплачен кредит 1994 г. – 42 млн долл. США. Это произошло за счет реализации сосновых балансов от прореживаний в высокопродуктивных сосновых культурах послевоенного периода.

Заготовка ликвида по рубкам промежуточного пользования имела максимальное значение в 2016 г. – 5570 тыс. м³ сосны (по расчетам из Госпрограммы 2016–2020 гг.). Далее, к 2050 г., предполагается глубокое падение – до 1120 тыс. м³.

Рассмотрим, как можно смягчить грядущее неизбежное существенное снижение размеров лесопользования в связи со сложившейся неравномерной возрастной и породной структурами сосновой формации. Наиболее очевидным действием в этом направлении будет искусственное сдерживание расчетной лесосеки. Это возможно только на основе директивного решения Правительства, либо путем увеличения возраста главной рубки, либо при расчете лесосеки установлением срока использования спелых насаждений на более длительный срок, чем традиционные 10 лет в пределах ревизионного периода. Тем не менее объем главного пользования по сосновому хозяйству примерно за 50 лет будет существенно снижен. Полагаем, что более чем на 10 лет (т. е. вместо 30 лет установить 40) продлить период вырубки

существующих спелых насаждений не удастся. В ином случае следует ожидать значительных потерь запасов спелой древесины от увеличения отпада.

Другая составляющая лесопользования – это промежуточное лесопользование. Правда, есть еще прочие рубки. Здесь уменьшение годичного лесопользования по рубкам прореживаний и проходным будет довольно значительным и неизбежным. Уменьшение будет усугубляться наличием более низкопродуктивных сосновых насаждений текущего возраста от 10 до 40 лет. К тому же и площади сосняков этого возраста небольшие, что отмечалось при анализе сложившейся возрастной структуры сосновой формации.

Расширить промежуточное лесопользование можно посредством проведения проходных рубок в приспевающих сосновых насаждениях эксплуатационных лесов. В основе рассмотрения этого предложения лежит следующий факт. Правила рубок леса не допускают проходные рубки в сосновых насаждениях свыше 60-летнего биологического возраста в эксплуатационной категории лесов. При этом в таких же насаждениях категории защитных лесов проходные рубки продолжают до 80-летнего биологического возраста. Можно сравнить запасы 60–80-летних сосняков эксплуатационных лесов, где проходные рубки не проводятся, с запасами 60–80-летних сосняков защитной категории лесов, где проходные рубки проводятся. Разница маловероятна, но это подлежит исследованию. Цель проходных рубок как вида ухода за лесом – своевременное использование текущего отпада. Отпад в 60–80-летних сосняках эксплуатационных лесов, конечно, имеется, но изъять его нельзя, по необъяснимым причинам. Предельно допустимый возраст для проведения рубок ухода, в данном случае проходных, нужно устанавливать не по возрастным группам (в данном случае приспевающих), а по фактическому биологическому возрасту древостоя с учетом бонитета.

Предложение получит неоднозначную оценку, следует ожидать бурные дискуссии. Поэтому

нужны обоснованные аргументы, диалог мнений. Необходимо заняться исследованием этой проблемы, чтобы получить объективный результат. В этой связи есть основания для разработки задания в ОНТП или ГНТП, например, с таким названием: «Разработать рекомендации по оптимизации рубок ухода и возрастной структуры сосновой формации в эксплуатационной категории лесов».

Заключение. За истекший 80-летний период (1944–2023 гг.) улучшились количественные и качественные показатели лесного фонда: общий запас вырос на 1643 млн м³ (в 1,43 раза), средний запас – на 158 м³/га (в 3,3 раза). Площадь более ценных сосновых лесов увеличилась на 1882,1 тыс. га (в 1,87 раза), большая часть их прироста (73,5%) наблюдалась в первой половине (1944–1983 гг.) указанного периода, что способствовало получению кредитов от Всемирного банка, модерни-

зации и расширению материальной базы лесного хозяйства. Для последнего десятилетия характерен значительный прирост заготовки древесины (26,4 млн м³ в 2023 г.) с прогнозом увеличения до 2030 г. Имеет место рост стоимости древесных ресурсов (14 661,73 млн руб. в 2023 г.). Снижение объемов лесовосстановления и качества ухода при лесовыращивании в последние 40 лет (1983–2022 гг.) приведет к сокращению главного и промежуточного пользования в будущем, что является следствием лесохозяйственной деятельности за 1983–2022 гг. Прогнозируемого спада доходов от лесного хозяйства можно было избежать при проведении работ по оптимизации породной и возрастной структуры лесов и предотвращении нежелательной масштабной смены сосны березой, что не является до настоящего времени руководящим принципом организации устойчивого лесного хозяйства в республике.

Список литературы

1. Морозов Г. Ф. Избранные труды: в 2 т. М.: Лесная пром-ть, 1970. Т. 1. 559 с.
2. Принципы лесоводства // Организация Объединенных Наций. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/forest.shtml (дата обращения: 13.02.2023).
3. Общие сведения по Главному управлению лесного хозяйства при Совете Министров БССР. Учет лесного фонда на 01.01.1961 г. Минск: [б. и.], 1962. 55 с.
4. Государственный учет лесов Республики Беларусь по состоянию на 1 января 1983 года. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 1984. 94 с.
5. Государственный учет лесного фонда на 01.01.1994 г. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 1995. 89 с.
6. Единовременный государственный учет лесов Республики Беларусь по состоянию на 1 января 2001 года. Минск: Белгослес, 2001. 81 с.
7. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2023 г. Минск: Белгослес, 2023. 87 с.
8. Багинский В. Ф. Состояние, проблемы и перспективы главного лесопользования в Республике Беларусь на современном этапе // Сибирский лесной журнал. 2014. № 2. С. 7–21.
9. Рублевский С. А. Государственный лесной фонд Белорусской ССР и его использование. М.: Центр. бюро науч.-техн. информ. Гослесхоза ССР, 1976. 24 с.
10. Багинский В. Ф., Есимчик Л. Д. Лесопользование в Беларуси: история, современное состояние, проблемы и перспективы. Минск: Беларус. навука, 1996. 367 с.
11. Янушко А. Д. Лесное хозяйство Беларуси – история, экономика, проблемы и перспективы развития. Минск: БГТУ, 2001. 248 с.
12. Леса Белоруссии: монография / Н. М. Березенко [и др.]. Минск: Урожай, 1969. 260 с.
13. Рожков Л. Н., Ерошкина И. Ф., Шатравко В. Г. Динамика формации сосновых лесов (*Pineta silvestriae*) Республики Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 2 (258). С. 37–48.
14. Рожков Л. Н., Штейнбок А. Г., Ходорович А. И. Метод ведения устойчивого экологически ориентированного лесного хозяйства с формированием коренных древостоев на почвенно-типологической основе // Научно-техническая информация в лесном хозяйстве. Минск, 2003. Вып. 10. С. 5–32.
15. Рожков Л. Н., Ерошкина И. Ф. Воспроизводство сосновой формации Беларуси в свете сохранения микропопуляционного разнообразия на уровне эдафоклиматипов // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2015. Вып. 75. С. 126–138.
16. Рекомендации по совершенствованию воспроизводства и выращивания сосновой формации Беларуси: утв. приказом Мин-ва лесн. хоз-ва 03.04.2023 г. № 69. Минск, 2023. 22 с.
17. Лесистость // Википедия. URL: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 26.03.2023).
18. Краткий словарь основных лесоводственно-экономических терминов // Экономика. URL: <http://economics.niv.ru/doc/dictionary/forestry-and-economic/index.htm> (дата обращения: 26.03.2023).
19. Уткин А. И., Рысин Л. П. Лес // Большая российская энциклопедия: в 30 т. М., 2010. Т. 17. С. 309–312.

20. Зорин В. П. Пояснительная записка к материалам государственного учета лесов на 1 января 1994 года. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 1994. 43 с.
21. Глобальная оценка лесных ресурсов 2020 года // Продовольственная и сельскохозяйственная Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/ru> (дата обращения: 27.03.2023).
22. Ермошина И. В. Методика комплексной эколого-экономической оценки лесных земель для государственного лесного кадастра. Минск: Белгослес, 2022. 12 с.
23. Таксационно-лесоустроительный справочник / М. В. Кузьменков, А. П. Кулагин, А. В. Таркан [и др.]. Минск: Лесное и охотничье хозяйство, 2019. 336 с.
24. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 годы // Каталог библиотеки БГТУ. URL: <https://diskstation.belstu.by:5001/sharing/1KzeTDojj> (дата обращения: 27.03.2023).
25. Стратегический план развития лесного хозяйства Беларуси. Минск: БГТУ, 1997. 178 с.
26. Морозов Г. В. Избранные труды: в 2 т. М.: Лесная пром-ть, 1971. Т. 2. 536 с.

References

1. Morozov G. V. *Izbrannye trudy: v 2 tomakh* [Selected works: in 2 vol.]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970, vol. 1. 559 p. (In Russian).
2. Forestry principles. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/forest.shtml (accessed 20.04.2023) (In Russian).
3. General information on the Main Forestry Department under the Council of Ministers of the BSSR. Accounting of the forest fund as of 01.01.1961. Minsk, 1962. 55 p. (In Russian).
4. *Gosudarstvennyy uchet lesov Respubliki Belarus po sostoyaniyu na 1 yanvarya 1983 goda* [State accounting of the forest fund as of 01.01.1983]. Minsk, Ministerstvo lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' Publ., 1984. 94 p. (In Russian).
5. *Gosudarstvennyy uchet lesnogo fonda na 01.01.1994* [State accounting of the forest fund as of 01.01.1994]. Minsk, Ministerstvo lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' Publ., 1995. 89 p. (In Russian).
6. *Edinovremennyy gosudarstvennyy uchet lesov Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 1 yanvarya 2001 goda* [One-time state registration of forests of the Republic of Belarus as of January 1, 2001]. Minsk, Belgosles Publ., 2001. 81 p. (In Russian).
7. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2023* [State Forest Cadastre of the Republic of Belarus as of 01.01.2023]. Minsk, Belgosles Publ., 2023. 87 p. (In Russian).
8. Baginskiy V. F. State, problems and prospects of the main forest management in the Republic of Belarus at the present stage. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2014, no. 2, pp. 7–21 (In Russian).
9. Rublevskiy S. A. *Gosudarstvennyy lesnoy fond Belorusskoy SSR i ego ispol'zovaniye* [The State Forest Fund of the Byelorussian SSR and its use]. Moscow, Central'noye byuro nauchno-tekhnicheskoy informatsii Gosleshoza SSR Publ., 1976. 24 p. (In Russian).
10. Baginskiy V. F., Esimchik L. D. *Lesopol'zovaniye v Belarusi: istoriya, sovremennoye sostoyaniye, problemy i perspektivy* [Forest management in Belarus: history, current state, problems and prospects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1996. 367 p. (In Russian).
11. Janushko A. D. *Lesnoye khozyaystvo Belarusi – istoriya, ekonomika, problemy i perspektivy razvitiya* [Forestry in Belarus – history, economics, problems and development prospects]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 248 p. (In Russian).
12. Berezenko N. M., Moiseenko S. T., Pobedov V. S., Moiseenko F. P., Sautin V. I., Kozhevnikov A. M., Savchenko A. I., Vasilevskaya L. S., Orlenko E. G., Shvets V. F., Tarasenko V. P., Raiko P. N., Krushev L. T., Mashnina T. I., Vasilyeva V. I., Ryvkin B. V., Podzharov V. K., Romanov V. S., Tsakunov I. P., Karas A. M., Handel R. D., Areshchenko V. D., Sinitsky V. P., Vysotsky I. V., Decik T. A., Orlovsky V. B. *Lesa Belorussii: monografiya* [Forests of Belarus: monograph]. Minsk, Urozhay Publ., 1969. 260 p. (In Russian).
13. Rozhkov L. N., Eroshkina I. F., Shatravko V. G. Dynamics of formation of pine forests (*Pineta silvestriae*) of the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 2 (258), pp. 37–48 (In Russian).
14. Rozhkov L. N., Shteynbok A. G., Hodorovich A. I. The method of conducting sustainable environmentally oriented forestry with the formation of indigenous forest stands on a soil-typological basis. *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya v lesnom khozyaystve* [Scientific and technical information in forestry]. Minsk, 2003, vol. 10, pp. 5–32 (In Russian).
15. Rozhkov L. N., Eroshkina I. F. Reproduction of the pine formation of Belarus in the light of the preservation of micropopulation diversity at the level of edaphoclimat types. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of

silvicultures and Forest Management: Collections of Scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of sciences of Belarus], Gomel, 2015, issue 75, pp. 126–138 (In Russian).

16. *Rekomendatsii po sovershenstvovaniyu vosproizvodstva i vyrashchivaniya osnovoy formatsii Belarusi: utverzhdeno prikazom Ministerstva lesnogo khozyaystva 03.04.2023 goda, no. 69* [Recommendations for improving the reproduction and cultivation of the pine formation of Belarus: approved by the Order of the Ministry of Forestry, 03.04.2023, no. 69]. Minsk, 2023. 22 p. (In Russian).

17. Forest cover. Available at: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki> (accessed 26.03.2023) (In Russian).

18. A short dictionary of the main forestry and economic terms. Available at: <http://economics.niv.ru/doc/dictionary/forestry-and-economic/index.htm> (accessed 26.03.2023) (In Russian).

19. Utkin A. I., Rysin L. P. Forest. *Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya: v 30 tomakh* [Great Russian Encyclopedia: in 30 vol.]. Moscow, 2010, vol. 17, pp. 309–312 (In Russian).

20. Zorin V. P. *Poyasnitel'naya zapiska k materialam gosudarstvennogo ucheta lesov na 1 yanvarya 1994 goda* [Explanatory note to the materials of the state accounting of forests as of January 1, 1994]. Minsk, Ministerstvo lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' Publ., 1994. 43 p. (In Russian).

21. Global Forest Resources Assessment 2020. Available at: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/ru> (accessed 27.03.2023) (In Russian).

22. Ermonina I. V. *Metodika kompleksnoy ekologo-yekonomicheskoy otsenki lesnykh zemel' dlya gosudarstvennogo lesnogo kadastra* [Methodology for a comprehensive environmental and economic assessment of forest lands for the state forest cadastre]. Minsk, Belgosles Publ., 2022. 12 p. (In Russian).

23. Kulagin A. P., Tarkan A. V., Buzunovsky R. S., Kuzmenkov M. V. *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest management reference book]. Minsk, Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo Publ., 2019. 336 p. (In Russian).

24. Strategic plan for the development of the forestry industry for the period from 2015 to 2030. Available at: <https://diskstation.belstu.by:5001/sharing/1KzeTDojj> (accessed 27.03.2023) (In Russian).

25. *Strategicheskiy plan razvitiya lesnogo khozyaystva Belarusi* [Strategic plan for the development of forestry in Belarus]. Minsk, BSTU Publ., 1997. 178 p. (In Russian).

26. Morozov G. V. *Izbrannye trudy: v 2 tomakh* [Selected works: in 2 vol.]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971, vol. 2. 536 p. (In Russian).

Информация об авторах

Рожков Леонид Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rozhkov@belstu.by

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

Ерошкина Ирина Федоровна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: e_ira@belstu.by

Information about the authors

Rozhkov Leonid Nikolaevich – DSc (Agriculture), Professor, Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rozhkov@belstu.by

Klysh Andrey Sergeevich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klysh@belstu.by

Yeroshkina Irina Fedorovna – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e_ira@belstu.by

Поступила 02.10.2023

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ

FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING

УДК 630*235

M. Alam, I. V. Voitau, V. V. Nosnikov
Belarusian State Technological University

ENHANCING FOREST PLANTATIONS SURVIVABILITY THROUGH HYDROGEL, FERTILIZERS, AND GROWTH REGULATORS

Lebanon is facing several social and climatic stresses that are impacting its forest cover and reforestation. In spite of numerous initiatives undertaken by the government, there are indications of an increasing drought-like conditions due to declining yearly temperatures and lower precipitation over the past decades. There is an urgent need to take action in terms of not only policymaking but also making available practical and actionable insights that can assist in reforestation efforts. This study aimed to explore the scope of using hydrogel, fertilizers and growth regulators to enhance survivability of seedlings and to ensure their high growth. The findings have provided insights about effectiveness of using a 1% concentration of urea or ammonia for the most effective moisture retention in the hydrogel and showed the possibility of their joint use. The study also found Cornevin to provide best results with 1% concentration. Epin showed slightly worse results, but can also be used in conjunction with hydrogel. When creating forest plantations, treatment of root systems with the growth regulator Epin together with a hydrogel increases the survival rate of seedlings, their weight and height, which can be recommended for sandy soils, including arid conditions. In addition, high survival rates and biometric indicators were shown by the use of containerized seedlings, which can also be recommended for the creation of forest plantations in such conditions.

Keywords: arid conditions, pine (*Pinus sylvestris*), forest plantation, survivability, hydrogel, growth regulators, fertilizers.

For citation: Alam M., Voitau I. V., Nosnikov V. V. Enhancing forest plantations survivability through hydrogel, fertilizers, and growth regulators. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 53–58.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-6.

М. Алам, И. В. Войтов, В. В. Носников
Белорусский государственный технологический университет

ПОВЫШЕНИЕ ПРИЖИВАЕМОСТИ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР С ПОМОЩЬЮ ГИДРОГЕЛЯ, УДОБРЕНИЙ И РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА

Ливан сталкивается с рядом социальных и климатических стрессов, которые влияют на лесной покров и лесовосстановление. Несмотря на многочисленные действия, предпринятые правительством, сохраняется опасность возникновения засухи вследствие повышения годовых температур и уменьшения количества осадков за последние десятилетия. Существует настоятельная необходимость в разработке практических и действенных идей, которые могут помочь в восстановлении лесов. Целью данного исследования было изучение возможности использования гидрогелей, удобрений и регуляторов роста для повышения приживаемости сеянцев и усиления их роста и развития. Полученные данные показали эффективность использования раствора мочевины или аммонийного удобрения 1%-ной концентрации совместно с гидрогелем. Рассмотрено применение вместе с гидрогелем таких регуляторов роста, как Корневин, который обеспечивает наилучшие результаты при концентрации 1%, и Эпин, показавший несколько худшие результаты. В то же время при создании лесных культур обработка корневых систем регулятором роста Эпин совместно с гидрогелем повышает приживаемость сеянцев, их массу и высоту, что может быть рекомендовано для песчаных почв, в том числе и для засушливых условий. Кроме того, высокие значения приживаемости и биометрических показателей были получены при использовании сеянцев с закрытой корневой системой, которые также могут быть рекомендованы для создания лесных культур в таких условиях.

Ключевые слова: засушливые условия, сосна (*Pinus sylvestris*), лесные культуры, приживаемость, гидрогель, регуляторы роста, удобрения.

Для цитирования: Алам М., Войтов И. В., Носников В. В. Повышение приживаемости лесных культур с помощью гидрогеля, удобрений и регуляторов роста // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 53–58.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-6.

Statement of the problem. Climate change has precipitated a myriad of environmental challenges, most notably droughts and elevated temperatures, which have deleterious consequences on the vitality and persistence of plant species. Regions undergoing a transition towards increasingly arid climates, such as the Mediterranean region, particularly Lebanon, have witnessed pronounced impacts from these challenges, resulting in a discernible decline in plant growth and survival rates. In response to this pressing issue, an array of strategies has been employed, including the utilization of containerized seedlings, hydrogel application, fertilization, and growth regulators. Nevertheless, a comprehensive investigation into the collective efficacy of this amalgamation in enhancing the survival rates of *Pinus* seedlings, an ecologically significant tree species in Lebanon, remains conspicuously absent. Hence, the principal objective of this study is to assess the effectiveness of employing a combination of containerized seedlings, hydrogel, fertilizers, and growth regulators on the survival rates of *Pinus* seedlings exposed to the harsh conditions of high temperatures and prolonged drought induced by climate change. Additionally, this research endeavors to ascertain the optimal dosages of this composite treatment for the maximization of seedling survival rates.

Introduction. Historical records indicate that Lebanon was once covered with extensive coniferous forests, constituting over 70% of its land area [1]. However, these forests have endured centuries of exploitation, dating back to 7700 BC, with various civilizations like the Phoenicians, Romans, Ottomans, and others [1–3]. The pressures of urban development, agriculture, railroad construction, firewood collection, and grazing have led to land degradation, reducing forest coverage [1, 4–7].

In recent times, Lebanese forests have faced further challenges, including climate change, the civil war, rampant bushfires, pathogens, and insect infestations [1, 8–11]. Today, forest coverage has plummeted to a mere 13% [12].

To counter this decline, the Ministry of Environment (MoE) initiated a National Reforestation Plan with the goal of increasing forest cover to 20% within 30 years, garnering support from local and international organizations [1, 11, 13].

Furthermore, a short-term capacity-building project, the “Safeguarding and Restoring Lebanon’s Woodland Resources Project” (SRLWRP), was launched in collaboration with the United Nations Development Programme (UNDP) and the Global Environment Facility (GEF) [14].

The current study aimed at increasing the survival rate of forest plantations through the combined use of hydrogel, fertilizers and growth regulators, also to test the effectiveness of using containerized seedlings. The study was undertaken using both lab methods and field methods. Two lab methods were conducted, one assessing the comparative impact of fertilizers Urea (N – 46%), Ammonium Sulfate (N – 21%), and Organic liquid humic fertilizer “Biovermtechno” (N – 1.2%) on hydrogel’s water-absorption capacity, the second assessing the comparative impact of Cornevin (indolylbutyric acid, 5 g/kg) and Epin (24-epibrassinolide, 0.025 g/l) on water-absorption capacity. “GidroSorb”, which is a spatially cross-linked polymer of acrylic acid based on a potassium salt, was used as a hydrogel. Next, the field study was conducted to assess the combined impact of alternated combination of Urea, growth regulators, and containerized seedlings on both survivability and Root:Shoot growth rates.

Results and discussion. The aim of the experiment was to assess how the hydrogel absorption capacity using different percentages of fertilizers Urea, Ammonia and organic fertilizer would be affected. The experiment was conducted using tea bags containing 0.5 g of hydrogel and submerging them in different concentrations of urea, ammonia, and organic fertilizer to see the effect of the hydrogel water retention capacity. The tea bag plus the hydrogel weighed around 0.55–0.6 g, and the calculations were made inclusive of the weight of the tea bag containing the hydrogel and the water absorbed.

Fig. 1 below shows that the level of water absorption was higher when using Urea, with maximum absorption occurring at a concentration of 1% of Urea.

Additionally, it needs to be noted that there was no difference between urea and ammonia’s impact on the EC; though there was an increase in the EC with increased concentrations of both. The EC with organic factor was not measurable due to high readings. Also, the same can be inferred from the following Fig. 1 above which depicts the readings using testing of distilled water EC when adding different percent of urea and ammonia.

The results derived from organic fertilizer were considerably disparate. The organic fertilizer’s EC reached values so high that they were beyond the scope of measurable parameters. This could arise from the diverse composition inherent to organic fertilizers, which could be constituted of various solutes in significant quantities [14]. Consequently, when dissolved, these solutes might amplify the EC values disproportionately.

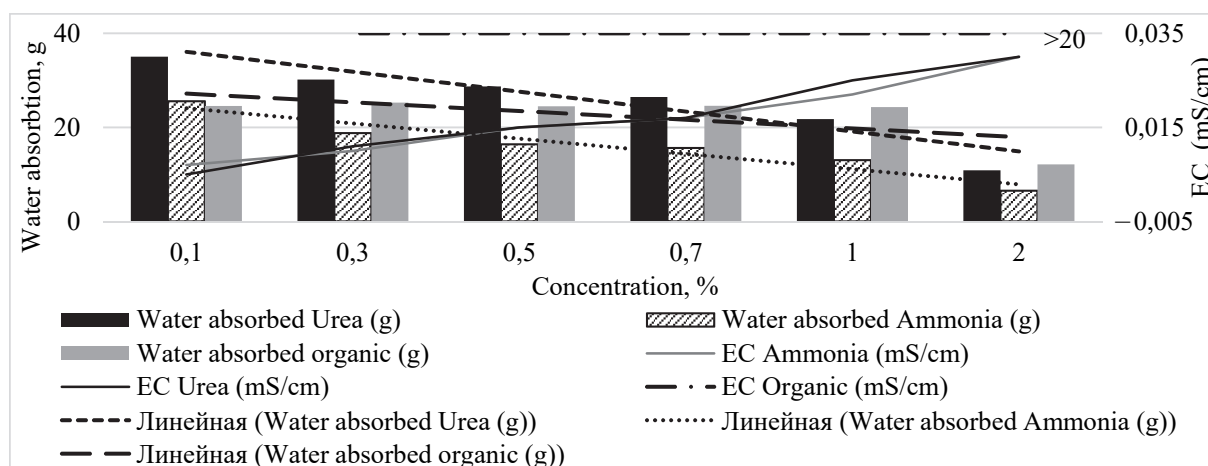


Fig. 1. Effect different percentage of Urea, Ammonia and Organic Fertilizers on Hydrogel's water retention capacity and the water's electrical conductivity (EC)

This experiment sheds light on the relationship between hydrogel absorption capacities and various fertilizer concentrations. While urea and ammonia both optimize at a 0.1% concentration, organic fertilizers require a thrice-fold increase to achieve peak absorption. The substantial increase in EC with rising concentrations of the fertilizers accentuates the ionic interactions at play, with organic fertilizers rendering highly augmented EC values.

These insights not only underscore the versatility of hydrogels but also hint at the potential avenues for enhancing their efficacy in tandem with specific fertilizers in forestry applications.

The next lab experiment aimed to understand the potential of using growth regulators along with 1.7% of hydrogel on the water absorption capacity of hydrogel. Growth regulators have been used in previous studies focused on determining their impact on diverse plants [15] and vegetation growth [14]; however, most of the studies have focused on actual plants' growth or embryogenesis, rather than determining the impact on hydrogels' capacity to absorb moisture and hence have a more potent impact on the entire reforestation effort in a region.

The experiment was conducted using tea bags containing 0.5 g of hydrogel and submerging them in different concentrations of Epin and Cornevin to see the effect of the hydrogel water retention capacity. The tea bag plus the hydrogel weighed around 0.55–0.6 g, and the calculations were made inclusive of the weight of the tea bag containing the hydrogel and the water absorbed.

A one-way ANOVA was conducted with resulted in obtaining a DfB of 1 and DfW of 8, and an F-value of 5.727. The p-value was 0.043. The p-value (0.0255) is less than 0.05, it can be said that there are statistically significant differences between the groups being compared.

The differences in the impact of different percentages of EPIN and Cornevin on the absorption of water with 0.5 g of the hydrogel are depicted in the following Fig. 2.

It can be inferred from the above figure that Cornevin gives better results than Epin consistently, however, the best results are obtained with 1% of Cornevin.

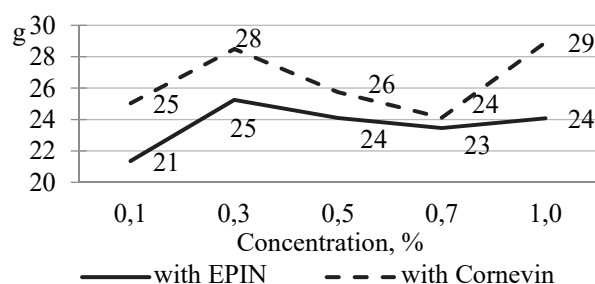


Fig. 2. Water Absorption with 0.5 g Hydrogel and Different percentage of Epin and Cornevin

Next, a field experiment was done Field Experiment in Negoleroe Forest which is known for its sandy soil, where both solid and solution Hydrogel been used with Epin to see their effect of on Seedlings. In addition containerized seedling were compared to bare roots ones.

Root:shoot (R:S) experimentation has been used to determine the plant's sustainability during environmental constraints [16]. The ratio has been found to vary based on several factors like availability of nutrients. Previous studies have used R:S biomass measurement after treating the seedlings with diverse nutrients to gauge the impact of those nutrients, with the underlying aim of measuring the impact of R:S mass on absorption and distribution of nutrients. The current study used a similar experiment, but measured the growth and diameter rather than mass.

The experiment was conducted over a period of 6 months, where the seedlings were treated in different ways:

- with dry hydrogel;
- with Hydrogel Solution;
- with EPIN and Hydrogel;
- without any input (control group);
- bare seedlings;
- containerized seedlings.

Dry hydrogel in an amount of 0.25–0.30 g was placed into the landing slot. The root systems of seedlings were dipped in a hydrogel solution.

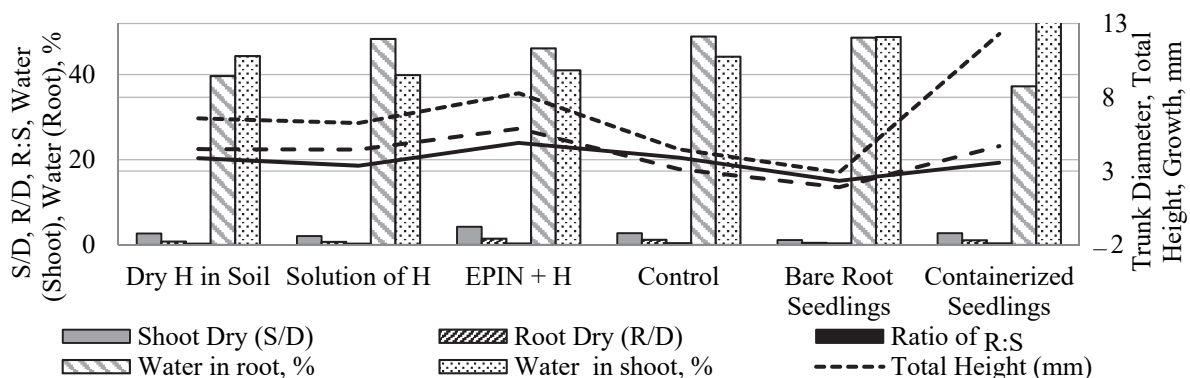


Fig. 3. Findings from Field Experiment in Negoreloe Forest

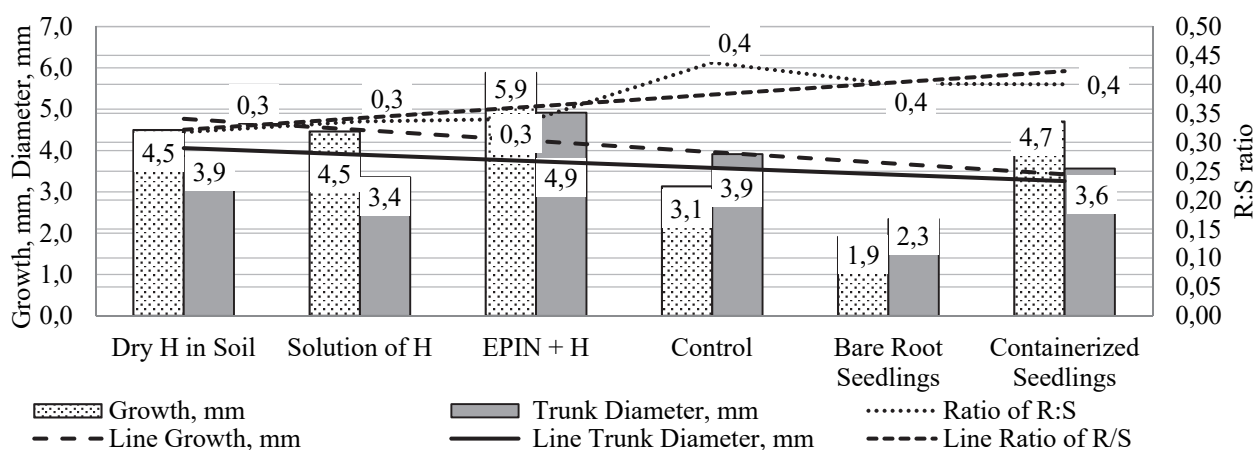


Fig. 4. Ratio R:S and Growth in Negoreloe Forest

The initial height was measured at the inset of the experiment. The measurements were again taken at the end of 6 months, and their growth was noted along with the diameter. Further, measurements included shoot (dry and wet respectively), root (dry and wet respectively). Next, calculations were based on Ratio of Dry root on Dry shoot and percentage of water in root and percentage of water in shoot. The following Fig. 3 shows the findings from the experiment graphically.

Mašková T., Herben T. had found that the R:S ratio was inversely related with nutrient absorption, and this relationship was more marked for large sized seedlings [16]. A similar interpretation can be made for the current findings, where the R:S shows an inverse relationship with the growth.

Additionally, a comparison is made of the growth characteristics and quality indicators of seedlings and are presented below (see Fig. 4 below). Other studies have conducted similar experiments, but by varying the management of seedlings in different nurseries [17] or different soil types or seed types [16]. The current study provides a better comparative analysis as the only variations made were in terms of the additives that were given to the seedlings during the measurement, all other factors being common to them.

The Fig. 4 shows that higher the ratio R:S the lower the growth and diameter (hence nutrient absorption

effectiveness). Fig. 3 also shows that EPIN + H yields the maximum growth as well as diameter for the seedlings under the field conditions in Negoreloe Forest. Further, the following Fig. 5 shows that the mortality rate, too, is the lowest for EPIN + H and for the containerized seedling where the difference is significantly relevant compared with the bare root seedlings.

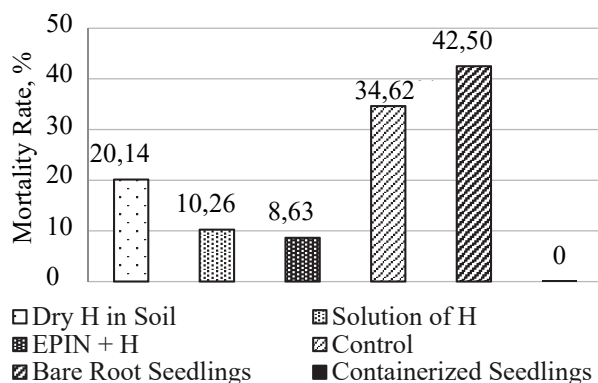


Fig. 5. Seedling Mortality Rate in Negoreloe Forest

Conclusion. In conclusion, the findings have elaborated on the effectiveness of using a 1% concentration of urea or ammonia for the most effective hydrogel moisture retention, and least impact on water absorption with urea and ammonia concentra

tion increase and can be applied in soil, especially sandy soil and arid conditions. The study also found that Cornevin gives better results than EPIN consistently, however, the best results are obtained with 1% of Cornevin. However, both growth regulators can be used in the creation of forest plantations. It can also be concluded that treatment of root systems with the growth regulator Epin together with a hydrogel increases the survivability rate of the seedlings, and containerized seedlings reflected a low non significant mortality rate compared to the high mortality

rate of bear roots seedlings, and such approaches can be recommended for conditions similar to Negoreloe Forest, e. g. for sandy soils in arid conditions.

Preserving the water supply in the root layer and providing the necessary supply of nutrients can be a key factor for increasing the survival rate of forest plantations created in difficult environmental conditions. The use of growth regulators can also improve survival rate by increasing resistance to adverse weather conditions and stimulating the development of underground and above-ground parts of planted plants.

References

1. Haroutunian G., Chojnacky D. C., El Riachy R., Chojnacky C. C. Reducing reforestation costs in lebanon: Adaptive field trials. *Forests*, 2017, vol. 8 (5), pp. 1–18. DOI: 10.3390/f8050169.
2. Mikesell M. W. The Deforestation of Mount Lebanon. *Geographical Review*, 1969, vol. 59 (1), pp. 1–28. DOI: 10.2307/213080.
3. Yasuda Y., Kitagawa H., Nakagawa T. The earliest record of major anthropogenic deforestation in the Ghab Valley, northwest Syria: a palynological study. *Quaternary International*, 2000, vol. 73, pp. 127–136. DOI: 10.1016/S1040-6182(00)00069-0.
4. El-Hajj R., Varese P., Nemer N., Tatoni T., Khater C. Mediterranean ecosystems challenged by global changes and anthropogenic pressures: Vulnerability and adaptive capacity of forests in north Lebanon. *Revue D Ecologie*, 2015, no. 70, pp. 3–15.
5. State and trends of the Lebanese environment. Available at: <http://www.moe.gov.lb/Pages/SOER2010.aspx> (accessed 18.08.2022).
6. Zurayk R., El Moubayid L. Land Degradation and Mitigation in the Lebanese Mountains: The Breakdown of Traditional Systems. Available at: <https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/19920> (accessed 17.08.2022).
7. Talhouk S. N., Zurayk R., Khuri S. Conservation of the coniferous forests of lebanon: Past, present and future prospects. *Oryx*, 2001, vol. 35 (3), pp. 206–215. DOI: 10.1046/j.13653008.2001.00180x.
8. Sattout E., Nemer N. Managing climate change effects on relic forest ecosystems: A program for lebanese cedar. *Biodiversity*, 2008, vol. 9, pp. 122–130. DOI: 10.1080/14888386.2008.
9. Hansen A., Neilson R., Dale V., Flather C., Iverson L., Urrie D., Shafer S., Cook S., Bartlein P. Global change in forests: Responses of species, communities, and biomes. *Bioscience*, 2001, vol. 51 (9), pp. 765–779. DOI: 10.1641/0006-3568.
10. Stolte K. W. Forest health monitoring and forest inventory analysis programs monitor climate change effects in forest ecosystems. *Hum. Ecol. Risk Assessment*, 2001, vol. 7, pp. 1297–1316.
11. Safeguarding and Restoring Lebanon's Woodland Resources. Technical Report. Available at: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/lb/SRLWR-Project-Final-Report-for-web-LR.pdf> (accessed 20.09.2023).
12. National forest and tree assessment and inventory: Final report. Available at: <http://www.fao.org/forestry/15565-0f921641e230ef06f11d15b8856f2ff07.pdf> (accessed 23.08.2022).
13. Verner D. Adaptation to a Changing Climate in the Arab Countries: A Case for Adaptation Governance and Leadership in Building Climate Resilience. MENA development report. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12216> (accessed 18.08.2022).
14. Bagale P., Pandey S., Regmi P., Bhusal S. Role of plant growth regulator “Gibberellins” in vegetable production: an overview. *International journal of horticultural science and technology*, 2022, no. 9 (3), pp. 291–299.
15. Mazri M. A., Belkoura I., Meziani R., Es-Saoudy H., Rachad F., Elmaataoui S. Impact of Osmotica and Plant Growth Regulators on Somatic Embryogenesis of Date Palm. *Current Agriculture Research Journal*, 2019, no. 7 (3), pp. 296–303.
16. Mašková T., Herben T. Root: shoot ratio in developing seedlings: How seedlings change their allocation in response to seed mass and ambient nutrient supply. *Ecology and evolution*, 2018, no. 8 (14), pp. 7143–7150.
17. Takoutsing B., Tchoundjeu Z., Degrande A., Asaah E., Gyau A., Nkeumoe F., Tsoheng A. Assessing the quality of seedlings in small-scale nurseries in the highlands of Cameroon: the use of growth characteristics and quality thresholds as indicators. *Small-scale Forestry*, 2014, no. 13, pp. 65–77.

Список литературы

1. Reducing reforestation costs in lebanon: Adaptive field trials / G. Haroutunian [et al.] // *Forests*. 2017. Vol. 8 (5). P. 1–18. DOI: 10.3390/f8050169.
2. Mikesell M. W. The Deforestation of Mount Lebanon // *Geographical Review*. 1969. Vol. 59 (1). P. 1–28. DOI: 10.2307/213080.

3. Yasuda Y., Kitagawa H., Nakagawa T. The earliest record of major anthropogenic deforestation in the Ghab Valley, northwest Syria: a palynological study // *Quaternary International*. 2000. Vol. 73. P. 127–136. DOI: 10.1016/S1040-6182(00)00069-0.
4. Mediterranean ecosystems challenged by global changes and anthropogenic pressures: Vulnerability and adaptive capacity of forests in north Lebanon / R. El-Hajj [et al.] // *Revue D Ecologie*. 2015. No. 70. P. 3–15.
5. State and trends of the Lebanese environment // Republic of Lebanon, Ministry of Environment. Available at: <http://www.moe.gov.lb/Pages/SOER2010.aspx> (accessed 18.08.2022).
6. Zurayk R., El Moubayid L. Land Degradation and Mitigation in the Lebanese Mountains: The Break-down of Traditional Systems // *Evaluation Resource Center*. Available at: <https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/19920> (accessed 17.08.2022).
7. Talhouk S. N., Zurayk R., Khuri S. Conservation of the coniferous forests of Lebanon: Past, present and future prospects // *Oryx*. 2001. Vol. 35 (3). P. 206–215. DOI: 10.1046/j.13653008.2001.00180x.
8. Sattout E., Nemer N. Managing climate change effects on relic forest ecosystems: A program for Lebanese cedar // *Biodiversity*. 2008. Vol. 9. P. 122–130. DOI: 10.1080/14888386.2008.9712917.
9. Global change in forests: Responses of species, communities, and biomes / A. Hansen [et al.] // *Bio-science*. 2001. Vol. 51 (9). P. 765–779. DOI: 10.1641/0006-3568.
10. Stolte K. W. Forest health monitoring and forest inventory analysis programs monitor climate change effects in forest ecosystems // *Hum. Ecol. Risk Assessment*. 2001. Vol. 7. P. 1297–1316.
11. Safeguarding and Restoring Lebanon's Woodland Resources. Technical Report // UNDP. Available at: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/lb/SRLWR-Project-Final-Report-for-web-LR.pdf> (accessed 20.09.2023).
12. National forest and tree assessment and inventory: Final report // FAO. Available at: <http://www.fao.org/forestry/15565-0f921641e230ef06f11d15b8856f2ff07.pdf> (accessed 23.08.2022).
13. Verner D. Adaptation to a Changing Climate in the Arab Countries: A Case for Adaptation Governance and Leadership in Building Climate Resilience. MENA development report // World Bank. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12216> (accessed 18.08.2022).
14. Role of plant growth regulator “Gibberellins” in vegetable production: an overview / P. Bagale [et al.] // *International journal of horticultural science and technology*. 2022. No. 9 (3). P. 291–299.
15. Impact of Osmotica and Plant Growth Regulators on Somatic Embryogenesis of Date Palm / M. A. Mazri [et al.] // *Current Agriculture Research Journal*. 2019. No. 7 (3). P. 296–303.
16. Mašková T., Herben T. Root: shoot ratio in developing seedlings: How seedlings change their allocation in response to seed mass and ambient nutrient supply // *Ecology and evolution*. 2018. No. 8 (14). P. 7143–7150.
17. Assessing the quality of seedlings in small-scale nurseries in the highlands of Cameroon: the use of growth characteristics and quality thresholds as indicators / B. Takoutsing [et al.] // *Small-scale Forestry*. 2014. No. 13. P. 65–77.

Information about the authors

Alam Michel – PhD student, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: michelalalam@gmail.com

Voitau Ihar Vitalievich – DSc (Engineering), Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitov@belstu.by

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

Информация об авторах

Алам Мишель – аспирант кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: michelalalam@gmail.com

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, профессор, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: voitov@belstu.by

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

Received 15.10.2023

УДК 630*232.329.9

В. В. Носников, Т. Д. Севрук

Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ ЗОЛЬНОСТИ ТОРФА ФРЕЗЕРНОЙ ЗАГОТОВКИ И НЕЙТРАЛИЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ЕГО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

В настоящее время в лесном хозяйстве широко применяются торфяные субстраты для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. Определение их качественных параметров является обязательным условием получения высококачественного посадочного материала. В Беларуси отсутствует методология оценки качества субстратов для лесного хозяйства по величине их электрической проводимости (метод кондуктометрии).

Качество субстрата во многом зависит от характеристик используемого торфа. Поэтому важно определить, каким образом такие характеристики, как степень разложения и зольность торфа, влияют на изменение электропроводности раствора с течением времени. Для эксперимента использовался торф фрезерной заготовки торфяного месторождения «Журавлевское» в филиале ПУ «Витебскторф» УП «Витебскоблгаз». По результатам исследований установлено, что при увеличении степени разложения и зольности торфа происходит увеличение значения электропроводности, которое находится в пределах 53,8–112,1 $\mu\text{См/см}$. Добавление нейтрализующих веществ (доломитовой муки и мела) приводит к незначительному изменению значения электропроводности субстратов. Внесение доломитовой муки в дозировке 0,2 кг/м^3 изменяет электропроводность в 1,1 раза, а 3 кг/м^3 – в 1,6 раза. По сравнению с доломитовой мукой мел при норме внесения 0,2–3 кг/м^3 оказывает большее влияние на изменение электропроводности верхового торфа. При внесении мела в дозировке 0,2 кг/м^3 электропроводность изменяется в 1,1 раза, а 3 кг/м^3 – в 1,7 раза.

Ключевые слова: торф верховой, влажность, кислотность актуальная, электропроводность, нейтрализация, степень разложения.

Для цитирования: Носников В. В., Севрук Т. Д. Влияние зольности торфа фрезерной заготовки и нейтрализующих компонентов на его электропроводность // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 59–65.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-7.

V. V. Nosnikov, T. D. Sevruck

Belarusian State Technological University

INFLUENCE OF ASH CONTENT OF MILLED PEAT BLANK AND NEUTRALIZING COMPONENTS ON ITS ELECTRICAL CONDUCTIVITY

Currently, peat substrates are widely used in forestry for growing planting material with a closed root system. Determining their quality parameters is a prerequisite for obtaining high-quality planting material. In Belarus, there is no methodology for assessing the quality of substrates for forestry based on the value of its electrical conductivity (conductometry method).

The quality of the substrate largely depends on the characteristics of the peat used. Therefore, it is important to determine how characteristics such as the degree of decomposition and ash content of peat affect the change in the electrical conductivity of the solution over time. For the experiment, peat from a milled peat deposit was used “Zhuravlevskoe” in the UE “Vitebskoblgaz”, branch of the PC “Vitebsktorg”. As a result of an increase in the degree of decomposition and ash content of peat, the electrical conductivity value increases. Based on the research results, it was established that with an increase in the degree of decomposition and ash content of peat, the electrical conductivity value increases, which is in the range of 53.8–112.1 $\mu\text{S/cm}$. The addition of neutralizing substances (dolomite flour and chalk) leads to a slight change in the electrical conductivity of the substrates. The addition of dolomite flour at a dosage of 0.2 kg/m^3 changes the electrical conductivity by 1.1 times, and 3 kg/m^3 – by 1.6 times. Compared to flour, dolomite chalk at an application rate of 0.2–3 kg/m^3 has a greater influence on the change in the electrical conductivity of high-moor peat. When adding chalk at a dosage of 0.2 kg/m^3 , the electrical conductivity changes by 1.1 times, and 3 kg/m^3 – by 1.7 times.

Keywords: peat moss, humidity, acidity actual, electrical conductivity, neutralization, degree of decomposition.

For citation: Nosnikov V. V., Sevruck T. D. Influence of ash content of milled peat blank and neutralizing components on its electrical conductivity. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 59–65 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-7.

Введение. В настоящее время в лесном хозяйстве широко применяются торфяные субстраты для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. Определение их качественных параметров является обязательным условием получения высококачественного посадочного материала [1].

Метод лабораторного химического анализа является высокоточным, однако дорогим и затратным по времени. Использование метода кондуктометрии позволит оперативно контролировать качественные показатели субстрата не только на начальный момент, но и в процессе выращивания посадочного материала.

Кондуктометрия – это метод анализа, основанный на способности проводить электрический ток. Кондуктометрия является одним из важнейших физико-химических свойств водных растворов электролитов. Электропроводность растворов зависит от концентрации и природы присутствующих заряженных частиц (простых и сложных ионов, коллоидных частиц). Поэтому измерение электропроводности может быть использовано для количественного определения химического состава раствора.

Кондуктометрический метод анализа – это метод, основанный на определении содержания вещества в пробе по величине ее электрической проводимости. Среди кондуктометрических методов различают прямую кондуктометрию и кондуктометрическое титрование.

В настоящий момент в Беларуси методология использования кондуктометрии для оценки уровня минерального питания растений и качества субстратов полностью не разработана.

Для получения качественного посадочного материала необходим субстрат, обеспечивающий питание растений и нормальное развитие корневой системы. Качество субстрата во многом зависит от характеристик используемого торфа. Поэтому важно уметь контролировать его качественные параметры на каждой из стадий производства субстрата быстрым и доступным методом.

Использование метода кондуктометрии, при котором определяется электропроводность (ЕС) субстрата, позволяет быстро в полевых условиях провести оценку как торфа, так и самого субстрата. Недостатком данного метода при измерении электропроводности является то, что этот показатель не дает информации о количественном содержании в субстрате конкретных элементов питания.

В качестве сырья для приготовления субстратов в лесном хозяйстве для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) используют преимущественно верховой торф, однако допускается в качестве

добавки использовать и переходный, и низинный [2]. Поскольку использование различных типов торфа может значительно менять агротехнические свойства субстратов, важно определить, каким образом такие характеристики торфа, как степень разложения и зольность, влияют на изменение электропроводности раствора с течением времени.

В то же время наряду со многими положительными сторонами, делающими верховой сфагновый слаборазложившийся торф наиболее широко используемым для производства субстратов [3], он имеет и негативное свойство, выражающееся в высокой кислотности.

По материалам исследований Л. П. Смоляка, кислотность торфа верховых болот Беларуси находится в пределах pH_{KCl} 3,2–4,2 [4].

Данные Н. И. Пьявченко указывают, что кислотность верхового торфа северных регионов европейской территории составляет pH_{KCl} 2,8–3,7 [5]. Поэтому необходимо регулировать кислотность субстрата в зависимости от выращиваемого древесного вида [6]. Нейтрализация кислотности торфа – одно из важнейших мероприятий, обеспечивающее оптимизацию условий для роста и развития растений [7, 8].

Для оптимизации кислотности среды при производстве торфяных субстратов для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой используются доломитовая мука, мел, а также другие известковые материалы [9, 10].

Различные исследователи предлагают применять смесь карбоната кальция химического синтеза с известняковой мукой или мелом [11, 12]. Для нейтрализации кислых почв используют также жженую известь – CaO [13].

Крупным производителем доломитовой муки в Беларуси является ОАО «Доломит» в Витебской области, г. п. Руба. В доломитовой муке с месторождения «Гралево» содержится CaO – 30,0%, MgO – 20,5%, $CaCO_3$ – 50–52%, $MgCO_3$ – 43–45%, встречаются примеси Fe, Al, Si, Mn, которые и являются причиной изменения электропроводности торфа.

Количество необходимого известкового материала для нейтрализации кислотности верхового торфа зависит от многих факторов: исходного значения pH торфа, степени разложения и химических свойств известкового материала [14]. Внесение нейтрализующих кислотность материалов может также влиять на значение электропроводности, что следует учитывать при использовании метода кондуктометрии для контроля качества субстратов.

Основная часть. Для постановки опытов был использован сепарированный торф фрезерной заготовки торфяного месторождения филиала ПУ «Витебскторф». Одним из важнейших

параметров торфа как сырья для приготовления субстрата является степень его разложения, а также содержание в нем влаги.

У отобранных образцов определяли влажность, кислотность, зольность, степень разложения и электропроводность.

Для изучения свойств торфа и торфяных субстратов применялись следующие методы исследования: величина электропроводности субстратов измерялась в водной вытяжке (в соотношении 1 : 5 по объему, для анализа электропроводности использовался прибор FieldScout CTS 50C [15]), величина pH определялась потенциометрическим методом с помощью pH-метра в солевой вытяжке KCl [16], влажность и зольность образцов находилась согласно СТБ 2042–2010 «Торф. Методы определения влаги и зольности», степень разложения торфа устанавливалась по гранулометрическому методу.

Низинный торф характеризуется степенью разложения более 30%, зольностью 6–50% и умеренно кислой или нейтральной реакцией (pH_{KCL} 4,5–7,0). Верховой же торф, в свою очередь, имеет степень разложения 5–15%, зольность его составляет 1,5–3%, кислотность pH_{KCL} 3,3–4,1. Переходный торф занимает промежуточное положение между верховым и низинным и имеет степень разложения 20–40%, зольность 3–9%, кислотность pH_{KCL} 3,3–4,5 [4].

По результатам анализов можно предположить, что образцы 1, 2 и 3 относятся к низинному типу торфа, образец 4 к верховому, 5 и 6 – к переходному типу торфа. Результаты анализов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что зольность и степень разложения торфа находятся в тесной взаимосвязи, с увеличением степени разложения, зольность увеличивается и находится в пределах 3,65–16,89%.

Таблица 1

Торф фрезерной заготовки, используемый для приготовления субстратов

Номер образца	Влажность, %	Зольность, %	Степень разложения, %
1	164,02	10,4	47,70
2	228,84	16,89	54,00
3	144,26	13,26	50,15
4	46,81	3,65	22,63
5	92,51	5,92	26,50
6	53,83	4,46	25,55

При определении электропроводности субстратов важным является такой параметр, как продолжительность отстаивания смеси торфа с водой. Данный параметр определяет продолжительность периода ожидания, который должен пройти с момента приготовления раствора и до момента проведения анализа.

Изменение электропроводности растворов почвенных субстратов для различных образцов с течением времени отображены в табл. 2.

Для образца с максимальной степенью разложения и зольностью (образец № 2) произошло увеличение значения электропроводности через 2 ч на 3%, через 4 ч – на 2%, через 8 ч – на 1%, через 18 ч – на 2%.

Для образца с минимальной степенью разложения и зольностью (образец № 4) увеличение составило через 2 ч 20%, через 4 ч – 6%, через 8 ч – 3%, через 18 ч – 4%.

Таким образом, даже по истечении 18 ч в растворе, приготовленном для анализа, происходили изменения в значении электропроводности.

Одной из основных операций по приготовлению субстратов, в значительной мере изменяющей свойства торфа, является нейтрализация, для чего чаще всего могут использоваться доломитовая мука и мелкогранулированный мел.

Таблица 2

Результаты измерения электропроводности, $\mu\text{См/см}$

Номер образца	Электропроводность через указанное время/процент от предыдущего значения									
	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч	5 ч	6 ч	7 ч	8 ч	15 ч	18 ч
1	74,8	<u>80,1</u> 107	<u>83,0</u> 111	<u>85,9</u> 103	<u>87,1</u> 101	<u>87,2</u> 100	<u>87,6</u> 100	<u>88,2</u> 101	<u>93,5</u> 106	<u>94,8</u> 101
2	90,3	<u>92,7</u> 103	<u>96,3</u> 104	<u>98,5</u> 102	<u>99,3</u> 101	<u>100,0</u> 101	<u>102,5</u> 103	<u>103,7</u> 101	<u>110,4</u> 106	<u>112,1</u> 102
3	78,2	<u>81,5</u> 104	<u>83,8</u> 103	<u>86,3</u> 103	<u>86,9</u> 101	<u>87,0</u> 100	<u>87,6</u> 101	<u>90,9</u> 104	<u>91,2</u> 100	<u>94,6</u> 104
4	27,2	<u>32,7</u> 120	<u>36,2</u> 111	<u>38,3</u> 106	<u>41,4</u> 108	<u>42,9</u> 104	<u>44,1</u> 103	<u>45,6</u> 103	<u>51,7</u> 113	<u>53,8</u> 104
5	40,8	<u>44,6</u> 109	<u>47,5</u> 107	<u>50,1</u> 105	<u>52,0</u> 104	<u>53,4</u> 103	<u>55,3</u> 104	<u>55,4</u> 100	<u>63,4</u> 114	<u>67,7</u> 107
6	27,5	<u>32,5</u> 118	<u>35,3</u> 109	<u>35,5</u> 101	<u>40,4</u> 114	<u>41,8</u> 103	<u>43,4</u> 104	<u>44,7</u> 103	<u>53,7</u> 120	<u>54,6</u> 102

При проведении опыта по изучению особенностей влияния нейтрализующих веществ на кондуктивность торфяных субстратов было поставлено 8 вариантов с нормой внесения от 0,2 до 3 кг/м³.

Исследования по нейтрализации торфа проводились в лабораторных условиях при температуре 17–20°C, для проведения опыта брали стеклянные колбы объемом 150 мл.

Опыт проведен в 2-кратной повторности по каждому варианту. Доза внесения смесей доломитовой муки и мела рассчитана на 1 м³ сепарированного верхового торфа (фракция 0–7 мм) фрезерной заготовки.

При внесении доломитовой муки и мела реакция среды в субстрате изменяется в зависимости от дозы и продолжительности взаимодействия субстрата с известковым материалом. Для проведения опыта по нейтрализации торфяного субстрата доломитом и изменения электропроводности было поставлено 8 вариантов в 2-кратной повторности с нормой внесения от 0,2 до 3 кг/м³. Результаты опыта приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Изменение кислотности
и электропроводности верхового торфа
при внесении доломитовой муки**

Доза доломитовой муки, кг/м ³	pH _{KCl}	Электропроводность, μСм/см
14.06.2023 (день постановки опыта)		
Контроль	1,86	59,7
0,2	2,05	68,3
0,5	2,10	73,2
1,0	2,21	77,9
1,5	2,48	81,3
2,0	2,52	85,0
2,5	2,69	89,3
3,0	2,80	92,7
21.06.2023		
Контроль	2,04	62,6
0,2	2,36	70,1
0,5	2,49	78,8
1,0	2,68	81,3
1,5	2,85	83,7
2,0	2,98	88,7
2,5	3,34	92,4
3,0	4,25	94,1
01.07.2023		
Контроль	2,30	63,1
0,2	2,68	72,0
0,5	2,75	83,6
1,0	2,86	86,8
1,5	3,04	88,6
2,0	3,26	91,2
2,5	3,92	93,3
3,0	4,54	98,3

Данные опыта показывают, что внесение доломитовой муки от 0,2 до 3 кг/м³ в торф фрезерной заготовки в процессе нейтрализации не приводит к существенному изменению электропроводности торфа.

На рис. 1 представлена динамика изменения электропроводности торфа фрезерной заготовки при внесении доломитовой муки в день постановки опыта, а также через 17 суток.

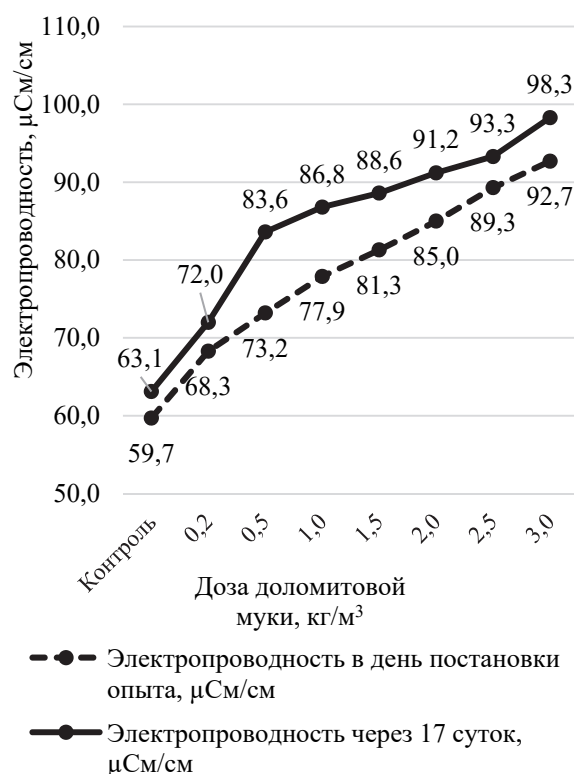


Рис. 1. Динамика изменения электропроводности торфа фрезерной заготовки при внесении доломита

Приведенные данные показывают, что от дозы вносимого нейтрализующего материала зависит изменение электропроводности торфа.

Изначально торф фрезерной заготовки имел электропроводность 63,1 μСм/см. При внесении доломита 0,2 кг/м³ электропроводность увеличивается в 1,1 раза (72,0 μСм/см), 0,5 кг/м³ — в 1,3 раза (83,6 μСм/см), 1 кг/м³ — в 1,4 раза (86,8 μСм/см), 1,5 кг/м³ — в 1,4 раза (88,6 μСм/см), 2 кг/м³ — в 1,4 раза (91,2 μСм/см), 2,5 кг/м³ — в 1,5 раза (93,3 μСм/см), 3 кг/м³ — в 1,6 раза (98,3 μСм/см).

При проведении опыта по нейтрализации торфяного субстрата мелом было поставлено 8 вариантов опыта в 2-кратной повторности с нормой внесения от 0,2 до 3 кг/м³.

Использование мела привело к постепенному изменению актуальной кислотности торфяного субстрата до pH_{KCl} 1,86–4,73 и установлению реакции среды на 9–10-е сутки (табл. 4).

Таблица 4
Кислотность и электропроводность торфа при проведении нейтрализации с учетом нормы внесения мела

Норма мела, кг/м ³	pH _{KCl}	Электропроводность, мСм/см
14.06.2023 (день постановки опыта)		
Контроль	1,86	59,7
0,2	2,71	73,2
0,5	2,84	86,2
1,0	2,95	89,3
1,5	3,14	92,3
2,0	3,34	93,6
2,5	4,10	94,8
3,0	4,62	101,3
21.06.2023		
Контроль	2,16	65,8
0,2	2,93	76,4
0,5	3,02	89,4
1,0	3,16	95,6
1,5	3,29	98,2
2,0	3,45	103,6
2,5	4,52	104,8
3,0	4,59	106,1
01.07.2023		
Контроль	2,44	69,3
0,2	2,96	78,0
0,5	3,12	91,2
1,0	3,24	97,3
1,5	3,36	99,8
2,0	3,85	106,3
2,5	4,62	108,9
3,0	4,73	110,3

На рис. 2 представлена динамика изменения электропроводности торфа фрезерной заготовки при внесении мела в день постановки опыта, а также через 17 суток.

При внесении мела 0,2 кг/м³ электропроводность увеличивается в 1,1 раза (78,0 мСм/см), 0,5 кг/м³ – в 1,3 раза (91,2 мСм/см), 1 кг/м³ – в 1,4 раза (97,3 мСм/см), 1,5 кг/м³ – в 1,4 раза (99,8 мСм/см), 2 кг/м³ – в 1,5 раза (106,3 мСм/см), 2,5 кг/м³ – в 1,6 раза (108,9 мСм/см), 3 кг/м³ – в 1,7 раза (110,3 мСм/см).

По сравнению с мелом мука доломитовая при норме внесения 0,2–3 кг/м³ оказывает меньшее влияние на изменение электропроводности верхового торфа фрезерной заготовки.

Список литературы

1. Жигунов А. В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой для лесовосстановления: автореф. дис. д-ра с.-х. наук. СПб.: Изд-во СПбЛТА, 1998. 47 с.
2. Шишкин П. В. Контроль технологических параметров при выращивании сельскохозяйственных культур // Гавриш. 2012. № 4. С. 15–17.
3. Жигунов А. В., Шевчук С. В. Производство контейнеризированных сеянцев. Л.: ЛенНИИЛХ, 1990. 30 с.
4. Смоляк Л. П. Болотные леса и их мелиорация. Минск: Наука и техника, 1969. 210 с.



Рис. 2. Динамика изменения электропроводности торфа фрезерной заготовки при внесении мела

Заключение. Заготовленный фрезерный торф с торфяного месторождения «Журавлевское» в филиале ПУ «Витебскторф» УП «Витебскоблгаз» представлен торфами верхового, переходного и низинного типа. Степень разложения и зольность торфа влияют на параметры электропроводности. После 18 ч отстаивания раствора в нем все равно происходило изменение в значении электропроводности.

От дозы и вида вносимого нейтрализующего материала зависит изменение электропроводности торфа. Внесение доломитовой муки в дозировке от 0,2 до 3 кг/м³ в процессе нейтрализации не приводит к существенному изменению электропроводности торфяного субстрата. Внесение доломитовой муки в дозировке от 0,2 до 3 кг/м³ изменяет электропроводность в 1,6 раза.

По сравнению с мелом доломитовая мука при дозе внесения 0,2–3 кг/м³ оказывает меньшее влияние на изменение электропроводности торфяного субстрата.

Внесение мела в дозировке от 0,2 до 3 кг/м³ изменяет электропроводность в 1,7 раза.

5. Пьявченко Н. И. Изменение биологической активности торфяных почв под воздействием мелиораций. Л.: Наука, 1982. 163 с.
6. Иванов А. Ф., Пономарева А. В., Дерюгина Т. Ф. Отношение древесных растений к влажности и кислотности почвы: монография. Минск: Наука и техника, 1966. 232 с.
7. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия / И. А. Шильников [и др.]. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
8. Яппаров А. Х., Алиев Ш. А., Биккинина Л. М.-Х. Известкование выщелоченного чернозема местной доломитовой мукой и ее влияние на урожайность и качество сельскохозяйственных культур // Состояние и пути повышения эффективности агрохимических исследований в Поволжье: материалы науч.-метод. совещания. М., 2010. С. 125–137.
9. Соколовский И. В., Домасевич А. А. Изменение реакции среды сепарированного верхового торфа // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 144–147.
10. Мел // Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru> (дата обращения: 06.10.2023).
11. Известковое удобрение: пат. РФ 2078067 / Е. П. Скрипилин, А. Ф. Шишкин, Л. Ю. Лукин, А. А. Телевинов. Опубл. 27.04.1997.
12. Известковое удобрение: пат. РФ 2165400 / Е. П. Скрипилин, А. Г. Кузнецов, А. Ф. Шишкин, А. А. Телевинов, Л. Ю. Лукин. Опубл. 20.04.2001.
13. Хузиахметов Р. Х. Технология известковых удобрений и оценка их агрохимической эффективности // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 21. С. 69–73.
14. Использование плавленого фосфорно-магниевого удобрения ПФМУ-2 при выращивании сеянцев хвойных пород с закрытой корневой системой / Е. В. Робонен [и др.] // Лесной вестник. 2006. № 6. С. 34–37.
15. STEP Systems GmbH – Soil – Water – Climate Testing Equipment – Professional Systems // STEP Systems. URL: <http://www.stepsystems.de/149-1-PNT-3000-Combi.html> (дата обращения: 07.10.2023).
16. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения обменной и активной кислотности: ГОСТ 11623-89. М.: Изд-во стандартов, 1990. 6 с.

References

1. Zhigunov A. V. *Teoriya i praktika vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy dlya lesovosstanovleniya. Avtoreferat dissertatsii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Theory and practice of growing a planting material with a closed root system for reforestation. Abstract of thesis PhD (Agriculture)]. St. Petersburg, SPbLTA Publ., 1998. 47 p. (In Russian).
2. Schischkin P. V. Control of technological parameters in the cultivation of crops. *Gavrish* [Gavrish], 2012, no. 4, pp. 15–17 (In Russian).
3. Zhigunov A. V., Shevchuk S. V. *Proizvodstvo konteynerizirovannykh seyantsev* [Production of containerized seedlings]. Leningrad, LenNIILHK Publ., 1990. 30 p. (In Russian).
4. Smolyak L. P. *Bolotnyye lesa i ikh melioratsiya* [Swamp forest and their reclamation]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1969. 210 p. (In Russian).
5. P'yavchenko N. I. *Izmeneniye biologicheskoy aktivnosti torfyanykh pochv pod vozdeystviem melioratsiy* [The change of the biological activity of peat soils under the influence of reclamation]. Leningrad, Nauka Publ., 1982. 163 p. (In Russian).
6. Ivanov A. F., Ponomareva A. V., Deryugina T. F. *Otnosheniye drevesnykh rasteniy k vlazhnosti i kislotnosti pochvy* [Relationship of woody plants to humidity and soil acidity]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1966. 232 p. (In Russian).
7. Shil'nikov I. A., Sychev V. G., Zelenov N. A., Akanova N. I., Fedotova L. S. *Izvestkovaniye kak faktor urozhaynosti i pochvennogo plodorodiya* [Liming as a factor for productivity and soil fertility]. Moscow, VNIIA Publ., 2008. 340 p. (In Russian).
8. Yapparov A. Kh., Aliev Sh. A., Bikkinina L. M.-Kh. *Liming leached Chernozem, a local dolomitic flour and its effect on yield and quality of crops. Sostoyaniye i puti povysheniya effektivnosti agrokhimicheskikh issledovaniy v Povolzh'ye: materialy nauchno-metodicheskogo soveshchaniya* [State and ways of improving the efficiency of agrochemical research in the Volga region: materials of the scientific and methodological meeting]. Moscow, 2010, pp. 125–137 (In Russian).
9. Sokolovskiy I. V., Domasevich A. A. The change of the reaction medium separated peat. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 144–147 (In Russian).
10. Chalk. Available at: <http://www.mining-enc.ru> (accessed 06.10.2023).
11. Skripilin E. P., Shishkin A. F., Televinov A. A. *Izvestkovoye udobreniye* [Lime fertilizer]. Patent RF, no. 2078067, 1997 (In Russian).

12. Skripilin E. P., Kuznetsov A. G., Shishkin A. F., Televinov A. A., Lukin L. Yu. *Izvestkovoye udobreniye* [Lime fertilizer]. Patent RF, no. 2165400, 2001 (In Russian).
13. Huziakhmetov R. Kh. Technology lime fertilizers and agrochemical estimation of their efficiency. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazanskiy technological University], 2013, vol. 16, no. 21, pp. 69–73 (In Russian).
14. Robonen E. V., Zaytseva M. I., Chernobrovkina N. P., Lebedeva G. A., Ozerova G. P. The use of fused phosphorus-magnesium fertilizers PFMU-2 when growing seedlings of coniferous species with the closed root system. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2006, no. 6, pp. 34–37 (In Russian).
15. STEP Systems GmbH – Soil – Water – Climate Testing Equipment – Professional Systems. Available at: <http://www.stepsystems.de/149-1-PNT-3000-Combi.html> (accessed 07.10.2023).
16. GOST 11623-89. Peat and products of its processing for agriculture. Methods of determination of exchange and active acidity. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 6 p. (In Russian).

Информация об авторах

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

Севрук Татьяна Дмитриевна – магистрант кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tanjasevruk292@gmail.com

Information about the authors

Nosnikov Vadim Valer'evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, 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

Sevruk Tatyana Dmitrievna – Master's degree student, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tanjasevruk292@gmail.com

Поступила 15.10.2023

УДК 630*232.318 (047.31)

С. В. Ребко¹, А. И. Новиков², Т. П. Новикова², Е. П. Петрищев²¹Белорусский государственный технологический университет²Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,
Российская Федерация**ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМИ
ПАРАМЕТРАМИ СЕМЯН СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)
СОРТА «НЕГОРЕЛЬСКАЯ»**

Установленные корреляционные связи между геометрическими и гравиметрическими параметрами сортовых семян сосны обыкновенной характеризуются различной степенью зависимости. Тесная корреляционная связь выявлена между площадью поверхности и объемом семени (коэффициент корреляции $C.V. = 0,89$), длиной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), шириной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), шириной и объемом семени ($C.V. = 0,81$), массой и объемом семени ($C.V. = 0,80$), толщиной и объемом семени ($C.V. = 0,77$), длиной и объемом семени ($C.V. = 0,75$), массой и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,72$). Умеренный характер корреляционной связи выявлен между параметрами массы и длины семени ($C.V. = 0,64$), массы и ширины семени ($C.V. = 0,62$), массы и толщины семени ($C.V. = 0,59$), длины и ширины семени ($C.V. = 0,55$). Низкий уровень корреляционной связи установлен для таких параметров как толщина и ширина семени ($C.V. = 0,41$), толщина и площадь поверхности семени ($C.V. = 0,40$). Для всей выборки сортовых семян корреляционная связь отсутствует только между параметрами длины и толщины семени ($C.V. = 0,29$).

Определены основные посевные качества семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» (масса 1000 семян – 6,39 г, чистота семян – 96%, техническая всхожесть семян – 88%, энергия прорастания семян – 80%, средний семенной покой семян – 5,5 дня) и влажность семян – 5,8%.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сорт, семена, посевные качества семян, длина семени, толщина семени, ширина семени, масса семени, влажность семян, корреляционный анализ.

Для цитирования: Ребко С. В., Новиков А. И., Новикова Т. П., Петрищев Е. П. Взаимосвязи между геометрическими и гравиметрическими параметрами семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 66–76.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-8.

S. U. Rabko¹, A. I. Novikov², T. P. Novikova², E. P. Petrishchev²¹Belarusian State Technological University²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov,
Russian Federation**THE RELATIONSHIP BETWEEN THE GEOMETRIC AND GRAVIMETRIC
PARAMETERS OF THE SEEDS OF THE SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.)
OF SORT NEGORELSKAYA**

The established correlations between geometric and gravimetric parameters of varietal seeds of Scots pine are characterized by varying degrees of dependence. A close correlation was found between the surface area and the volume of the seed (correlation coefficient $C.V. = 0.89$), the length and surface area of the seed ($C.V. = 0.88$), the width and surface area of the seed ($C.V. = 0.88$), the width and volume of the seed ($C.V. = 0.81$), the weight and volume of the seed ($C.V. = 0.80$), the thickness and volume of the seed ($C.V. = 0.77$), the length and volume of the seed ($C.V. = 0.75$), the weight and surface area of the seed ($C.V. = 0.72$). A moderate correlation was revealed between the parameters of seed mass and length ($C.V. = 0.64$), seed mass and width (correlation coefficient 0.62), seed mass and thickness ($C.V. = 0.59$), seed length and width ($C.V. = 0.55$). A low level of correlation was established for such parameters as the thickness and width of the seed ($C.V. = 0.41$) and the thickness and surface area of the seed ($C.V. = 0.40$). For the entire sample of varietal seeds, there is no correlation only between the parameters of the length and thickness of the seed ($C.V. = 0.29$).

The main sowing qualities of the seeds of the Pine ordinary of sort Negorelskaya were determined (weight of 1000 seeds – 6.39 g, seed purity – 96%, technical germination of seeds – 88%, seed germination energy – 80%, the average seed rest of the seeds is 5.5 days) and the moisture content of the seeds is 5.8%.

Keywords: Scots pine, variety, seeds, seeds sowing qualities, seed length, seed thickness, seed width, seed weight, seeds moisture, correlation analysis.

For citation: Rabko S. U., Novikov A. I., Novikova T. P., Petrishchev E. P. The relationship between the geometric and gravimetric parameters of the seeds of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of sort Negorelskaya. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 66–76 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-8.

Введение. В настоящее время в отрасли лесного хозяйства особое внимание уделяется вопросам получения и использования в лесокультурном производстве высококачественного посевного и посадочного материала основных лесобразующих древесных и кустарниковых видов, в том числе и сосны обыкновенной – самой распространенной в лесном фонде древесной породой. Использование при посеве качественного лесосеменного сырья в значительной степени предопределяет выход стандартного посадочного материала с единицы площади. Для целей искусственного лесовосстановления обязательным условием является использование при посадке стандартного посадочного материала [1].

Исследованиями ряда авторов установлено, что на рост и развитие всходов, сеянцев, саженцев и лесных культур, особенно в первые годы жизни растений, существенное влияние при прочих равных условиях оказывают параметры или размеры семян, а также их масса.

Произрастая и занимая значительные площади в пределах своего ареала, сосна обыкновенная характеризуется значительной изменчивостью и вариабельностью морфологических признаков семенного материала и лесосеменного сырья.

Так, Бабичем Н. А. с соавторами выявлена значительная вариативность характеристик массы семян сосны обыкновенной в таежной зоне [2].

Ивановым В. П., Марченко С. И., Глазуном И. Н., Нартовым Д. И. установлено влияние морфометрических параметров шишек на качество семенного материала сосны обыкновенной [3]. Хатнянским В. И., Волгиным В. В., Пивень Л. Е. также установлено влияние крупности семян на их посевные и урожайные качества [4]. В наших ранее проведенных исследованиях установлено влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на их 30-дневное прорастание [5]. В работе Ребко С. В. и Поплавской Л. Ф. выявлена взаимосвязь между цветом семян и апофизом шишек сосны обыкновенной: чем более выражена окраска семян от светлой к темной, тем значительно сильнее выражен апофиз шишек от гладкого к крючковатому. Взаимосвязь подтверждается полихорическим показателем связи Чупрова [6].

В работе Молоткова П. И., Патлая И. Н., Давыдовой Н. И. приводятся сведения различных авторов, свидетельствующие о том, что рост

сосны обыкновенной находится в определенной связи с цветом семян. Например, Литвинов Д. И., Тольский А. П., Пихельгас Э. И. выделяли ряд форм сосны обыкновенной с черными, коричневыми, пестрыми и светлыми семенами. Соболев А. М. описал 72 модификации цвета семян, однако указал, что они не могут быть устойчивыми и надежными признаками формовых разновидностей сосны. Курдиани З. С., Кобранов Н. П., Пихельгас Э. И. отмечали преимущество в росте потомства черносеменных форм сосны обыкновенной. Мамаев С. А., Тольский А. П., напротив, приводят данные о лучшем росте светлосеменных форм по отношению к черносемным. Причем на севере преобладают семена с более светлой окраской, при продвижении к югу их цвет темнеет и у южной границы ареала преобладают деревья с черными семенами [7].

В ряде работ исследования посвящены вопросам изучения изменения показателя массы 1000 семян, свидетельствующие о том, насколько сильная существует зависимость данного показателя от климатических условий конкретного места произрастания сосны обыкновенной, особенно при продвижении в направлении с севера на юг [8–12].

Петрищевым Е. П. проведено исследование по оценке взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной, выращенных из кондиционных семян [13].

Исследования Бессчетнова В. П. и Бессчетновой Н. Н. показали значительные различия по морфометрическим параметрам и качеству семян, шишек и выходу нормально развитых и неразвитых семян под влиянием различных факторов среды [14, 15]. По сведениям авторов, изменчивость параметров семян обусловлена генотипически, а на проявление их разнообразия оказывают влияние факторы среды, что связано с установленными ими индексами генотипически обусловленной неидентичности плюсовых деревьев сосны. Существенные различия между плюсовыми деревьями сосны по морфометрическим характеристикам нормально развитых шишек зависят от факторов среды, влияние которых составляет 60–87%. Представляет интерес также работа по оценке степени наследственной обусловленности признаков сосны обыкновенной, имеющих хозяйственное, адаптивное и идентификационное значение [16].

Таким образом, многочисленными исследованиями установлены взаимосвязи между качественными и количественными характеристиками семян с морфометрическими параметрами шишек и сеянцев сосны обыкновенной, однако практически не изучены или редко встречаются исследования, посвященные вопросам взаимосвязи между геометрическими (размерными) и гравиметрическими (весовыми) параметрами семян. Имеются лишь исследования, позволяющие установить степень влияния сортировки семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах [17].

Необходимость проведения исследования и установления взаимосвязей между геометрическими и гравиметрическими параметрами семян сосны обыкновенной обусловливается тем, что любое семя неправильной формы имеет длину, ширину и толщину. Также практически каждой древесной породе характерна своя, присущая только ей масса семени. Следует иметь в виду, что по своим размерам семена каждой древесной породы различаются между собой. На этих особенностях и основаны принципы сортирования лесных семян на фракции и их очистки от примесей. По толщине и ширине семена разделяют с помощью плоских или цилиндрических решёт, на них же отделяют крупные и мелкие примеси. Решето конструктивно представляет собой металлический лист с отверстиями одинакового размера (продолговатыми или круглыми). Сквозь продолговатое отверстие решета проходят семена, толщина которых меньше ширины щели отверстия. Длина семени не имеет значения, так как она всегда меньше длины продолговатого отверстия. Ширина семени всегда больше толщины. Сквозь круглое отверстие семя может пройти в том случае, если его ширина меньше диаметра отверстия. Длина и толщина семени не препятствуют его проходу сквозь круглое отверстие. Следовательно, разделение семян по ширине возможно только на решете с круглыми отверстиями.

Для разделения семян по длине служит цилиндрический триер – вращающийся стальной цилиндр с отштампованными ячейками. Мелкие и короткие зерна полностью погружаются в ячейки, а длинные – частично. При повороте цилиндра из ячеек сначала выпадают более длинные зерна, а затем, после подъема и поворота ячейки, на приемник падают короткие зерна.

В этой связи выявление взаимосвязей между размерными и весовыми параметрами семян позволят подойти к решению вопросов оптимизации использования посевного материала, а также интенсификации ресурсосберегающей технологии выращивания стандартного посадочного материала сортового уровня и его

использования при производстве лесных культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская».

Таким образом, проведенные исследования позволят подойти к решению первоочередной задачи при искусственном лесовосстановлении и лесоразведении: использование в лесокультурном производстве исходного материала – семян с высокими наследственными свойствами и посевными качествами для создания качественных, высокопродуктивных и экологически устойчивых насаждений с учетом выявленных взаимосвязей между геометрическими и гравиметрическими характеристиками семян.

Основная часть. С целью определения посевных качеств семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» произведена заготовка шишек, которые высушивались при температуре 53°C. Сушка шишек осуществлялась в электропечи СНОЛ-М1 в среднем на протяжении 4–5 дней. Обескрыливание сортовых семян производили на специальной машине марки МОС-1.

Далее в соответствии с ГОСТ 13056.6–97 [18] способом крестообразного деления подготавливали навеску установленной массы для проведения анализов.

Посевные качества семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» определяли в соответствии с ГОСТ 14161–86 [19], при этом для партии семян определяли такие показатели, как чистота семян, техническая всхожесть, энергия прорастания, масса 1000 семян (в том числе по международной методике ISTA), средний семенной покой [20].

Влажность семян определяли в соответствии с ГОСТ 13056.3–86 [21] методом высушивания навески при температуре 130°C в сушильном шкафу.

Проращивание семян проводили на специальном проращивателе немецкой фирмы Rumed с раскладкой семян на ложе вручную. При этом проращивание сортовых семян сосны обыкновенной осуществляли на протяжении 15 дней при постоянной температуре воды, равной 24°C. Температура ложа поддерживалась на уровне 22°C. Повторность опыта – трехкратная. Энергию прорастания семян определяли на 7-й день учета, средний семенной покой как средневзвешенное количество проросших семян – на 3-й, 5-й, 7-й, 10-й и 15-й дни учета.

Средняя температура и влажность воздуха в лаборатории за время проведения исследования составляли соответственно 25°C и 21%. Массу каждого семени регистрировали с помощью лабораторных аналитических весов с точностью до 0,0001 г. Перед измерением весы устанавливали с возможностью исключения воздействия вибрации, источников тепла, потоков воздуха и резких колебаний температуры, балансировали

с помощью встроенного пузырькового индикатора, выставляли на ноль. Далее пинцетом помещали измеряемое семя в центр круга, закрывали прозрачные створки для предотвращения влияния перемещения воздуха и записывали показания массы семени после стабилизации соответствующей стрелки. Показания фиксировали в специальном журнале и заносили в таблицы данных Excel.

Методикой исследования также было предусмотрено определение геометрических характеристик семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская», среди которых были выбраны такие параметры, как площадь поверхности семени (S_c , мм²) и объем семени (V_c , мм³). Площадь поверхности семени рассчитывали по формуле площади эллипса, наиболее полно напоминающего по форме семя сосны обыкновенной:

$$S_c = \pi L W,$$

где π – постоянная величина, равная 3,14; L – длина семени, мм; W – ширина семени, мм.

Объем семени рассчитывали по формуле объема эллипсоида, наиболее близко напоминающего по форме и объему семя сосны обыкновенной:

$$V_c = 4/3\pi \cdot 0,5L \cdot 0,5W \cdot 0,5T,$$

где T – толщина семени, мм.

Статистическая обработка полученных значений геометрических и гравиметрических параметров сортовых семян представлена в виде расчета следующих показателей: M – среднеарифметическая величина; D – дисперсия; δ – стандартное среднеквадратическое отклонение; $S.V.$ – коэффициент вариации, %; m_M – ошибка среднеарифметической величины; p – точность определения среднеарифметической величины, %; Min – минимальное значение признака; Max – максимальное значение признака; R – размах признака; Mo – мода; Me – медиана.

Корреляционный анализ взаимосвязей между геометрическими и гравиметрическими параметрами сортовых семян проводился с использованием электронных таблиц Excel.

В целях получения более точных и достоверных данных статистические показатели геометрических и гравиметрических параметров семян рассчитаны как для всей совокупности семян, взятых для анализа (1200 шт.), так и для трех выборок по 400 шт. в каждой.

Результаты анализа посевных качеств и влажности сортовых семян сосны обыкновенной представлены в табл. 1.

Чистоту семян (в процентах) определяли как отношение массы чистых семян к массе навески, взятой для анализа с округлением до 0,1%. Для этого навеску семян высыпали на гладкую поверхность разборочной доски, разравнивали и

выделяли чистые семена, отходы семян и примесь. Отдельно взвешивали каждую из выделенных групп. Всего для анализа было выделено 2 навески по 10 г.

Таблица 1

**Посевные качества и влажность семян
сосны обыкновенной сорта «Негорельская»**

Показатель	Значение
Чистота семян, %	96,0
Масса 1000 семян по ГОСТ, г	6,39
Масса 1000 семян по ISTA, г	6,45
Техническая всхожесть семян, %	88,0
Энергия прорастания семян, %	80,0
Средний семенной покой, дней	5,5
Влажность семян, %	5,8

В результате анализа установлено, что чистота семян первой навески составила 95,8% (9,58 г), второй навески 96,2% (9,62 г). Допускаемое расхождение составляет не более 1%, фактическое расхождение составило 0,4%, следовательно, чистота семян составила 96,0%.

Массу 1000 семян по ГОСТ 14161–86 [19] определяли путем взвешивания двух навесок семян (предварительно отобранных и отсчитанных) по 500 шт. в каждой. В результате установлено, что масса 1000 семян оказалась равной 6,39 г ($m_1 = 3,17$ г и $m_2 = 3,22$ г, разница составила менее 5%). С целью сравнения значений данного показателя дополнительно массу 1000 семян определяли по международной методике ISTA [20]. По данной методике необходимо было отсчитать восемь навесок семян по 100 шт. в каждой и отдельно их взвесить ($m_1 = 0,66$ г; $m_2 = 0,64$ г; $m_3 = 0,69$ г; $m_4 = 0,63$ г; $m_5 = 0,64$ г; $m_6 = 0,60$ г; $m_7 = 0,67$ г; $m_8 = 0,63$ г). Далее необходимо было найти массу средней навески из восьми ($m_{ср} = 0,645$ г). Полученный результат следовало перевести к количеству 1000 семян ($m_{1000} = 6,45$ г). В результате сравнения данных показателей, определенных по отечественной и международной методиках, установлено, что разница в показателях массы 1000 семян оказалась незначительной – 0,06 г, что составляет менее 1% от их общей массы. Техническая всхожесть семян, которую определяли на 15-й день учета, составила 88%, энергия прорастания на 7 день учета была равна 80%, средний семенной покой – 5,5 дня.

Влажность семян – содержание влаги в семенах, выраженное в процентах к массе исходной навески. Определяли данный показатель методом высушивания навески при температуре 130°C в сушильном шкафу. Конечная влажность партии сортовых семян сосны обыкновенной составила 5,8%.

Статистические параметры размера и массы семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» трех выборок и всей совокупности семян представлены в табл. 2–5.

Результаты статистической обработки показали, что семена, случайным образом отобранные в 3 отдельные совокупности выборок, имеют следующие основные статистические показатели (соответственно выборка № 1, выборка № 2 и выборка № 3):

а) по длине семени: среднеарифметическая величина – 4,50, 4,42 и 4,27 мм; коэффициент вариации – 9,7, 9,9 и 11,0%; минимальное значение – 3,07, 3,19 и 2,81 мм; максимальное значение – 6,00, 5,82 и 5,70 мм; размах – 2,93, 2,63 и 2,89 мм; мода – 4,25, 4,41 и 4,10 мм; медиана – 4,48, 4,41 и 4,27 мм;

б) по ширине семени: среднеарифметическая величина – 2,56, 2,52 и 2,45 мм; коэффициент вариации – 9,9, 9,4 и 11,0%; минимальное значение – 1,76, 1,84 и 1,68 мм; максимальное значение – 3,28, 3,34 и 3,77 мм; размах – 1,50, 1,50 и 2,09 мм; мода – 2,43, 2,41 и 2,36 мм; медиана – 2,55, 2,52 и 2,43 мм;

в) по толщине семени: среднеарифметическая величина – 1,42, 1,45 и 1,36 мм; коэффициент вариации – 13,0, 14,0 и 13,0%; минимальное значение – 0,84, 0,92 и 0,73 мм; максимальное значение – 2,17, 2,81 и 1,88 мм; размах – 1,33, 1,89 и 1,15 мм; мода – 1,34, 1,34 и 1,42 мм; медиана – 1,41, 1,43 и 1,36 мм;

г) по массе семени: среднеарифметическая величина – 0,0062, 0,0059 и 0,0055 г; коэффициент вариации – 28,0, 31,0 и 29,0%; минимальное значение – 0,0015, 0,0010 и 0,0013 г; максимальное значение – 0,0130, 0,0133 и 0,0130 г; размах – 0,0115, 0,0123 и 0,0117 г; мода – 0,0060, 0,0060 и 0,0055 г; медиана – 0,0060, 0,0060 и 0,0055 г.

Таблица 2
Статистические параметры размера и массы семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» первой выборки

Статистические параметры	Выборка семян № 1 (ДатаСет1)			
	длина, мм	ширина, мм	толщина, мм	масса, г
<i>M</i>	4,50	2,56	1,42	0,0062
<i>D</i>	0,19	0,065	0,031	$2,9 \cdot 10^{-6}$
δ	0,44	0,25	0,18	0,0017
<i>C.V.</i> , %	9,7	9,9	13,0	28,0
<i>m_M</i>	0,022	0,013	0,0089	$8,5 \cdot 10^{-5}$
<i>p</i> , %	0,48	0,50	0,63	1,40
<i>Min</i>	3,07	1,76	0,84	0,0015
<i>Max</i>	6,00	3,28	2,17	0,0130
<i>R</i>	2,93	1,52	1,33	0,0115
<i>Mo</i>	4,25	2,43	1,34	0,0060
<i>Me</i>	4,48	2,55	1,41	0,0060

Таблица 3
Статистические параметры размера и массы семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» второй выборки

Статистические параметры	Выборка семян № 2 (ДатаСет2)			
	длина, мм	ширина, мм	толщина, мм	масса, г
<i>M</i>	4,42	2,52	1,45	0,0059
<i>D</i>	0,19	0,056	0,040	$3,3 \cdot 10^{-6}$
δ	0,44	0,24	0,20	0,0018
<i>C.V.</i> , %	9,9	9,4	14,0	31,0
<i>m_M</i>	0,022	0,012	0,010	$9,1 \cdot 10^{-5}$
<i>p</i> , %	0,49	0,47	0,69	1,50
<i>Min</i>	3,19	1,84	0,92	0,0010
<i>Max</i>	5,82	3,34	2,81	0,0133
<i>R</i>	2,63	1,50	1,89	0,0123
<i>Mo</i>	4,41	2,41	1,34	0,0060
<i>Me</i>	4,41	2,52	1,43	0,0060

Таблица 4
Статистические параметры размера и массы семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» третьей выборки

Статистические параметры	Выборка семян № 3 (ДатаСет3)			
	длина, мм	ширина, мм	толщина, мм	масса, г
<i>M</i>	4,27	2,45	1,36	0,0059
<i>D</i>	0,23	0,072	0,034	$2,9 \cdot 10^{-6}$
δ	0,48	0,27	0,18	0,0017
<i>C.V.</i> , %	11,0	11,0	13,0	29,0
<i>m_M</i>	0,024	0,013	0,0092	$8,5 \cdot 10^{-5}$
<i>p</i> , %	0,56	0,55	0,67	1,40
<i>Min</i>	2,81	1,68	0,73	0,0013
<i>Max</i>	5,70	3,77	1,88	0,0130
<i>R</i>	2,89	2,09	1,15	0,0117
<i>Mo</i>	4,10	2,36	1,42	0,0055
<i>Me</i>	4,27	2,43	1,36	0,0055

Таблица 5
Статистические параметры размера и массы семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» всей выборки

Статистические параметры	Вся выборка семян			
	длина, мм	ширина, мм	толщина, мм	масса, г
<i>M</i>	4,40	2,51	1,41	0,0060
<i>D</i>	0,213	0,066	0,036	$3,1 \cdot 10^{-6}$
δ	0,46	0,26	0,19	0,0018
<i>C.V.</i> , %	10,5	10,3	13,5	29,1
<i>m_M</i>	0,013	0,007	0,006	$5,0 \cdot 10^{-5}$
<i>p</i> , %	0,30	0,30	0,39	0,84
<i>Min</i>	2,81	1,68	0,73	0,0010
<i>Max</i>	6,00	3,77	2,81	0,0133
<i>R</i>	3,19	2,09	2,08	0,0123
<i>Mo</i>	4,25	2,43	1,42	0,0060
<i>Me</i>	4,40	2,50	1,40	0,0060

Проведенные расчеты позволяют заключить, что по длине и ширине семени коэффициент варьирования во всех выборках не превышает 11%, что соответствует низкому уровню изменчивости, по толщине семени данный показатель составляет 13–14%, что соответствует среднему уровню изменчивости, по массе семени изменчивость достигает 28–31%, что характеризует выборки с высоким уровнем изменчивости.

Результаты исследования геометрических характеристик – площади поверхности и объема сортовых семян сосны обыкновенной представлены в табл. 6–9.

Таблица 6

Статистические параметры площади поверхности и объема семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» первой выборки

Статистические параметры	Выборка семян № 1 (ДатаСет1)	
	$S_c, \text{мм}^2$	$V_c, \text{мм}^3$
M	36,40	8,66
D	38,0	4,3
δ	6,2	2,1
$C.V., \%$	17,0	24,0
m_M	0,31	0,10
$p, \%$	0,85	1,2
Min	17,80	3,68
Max	58,64	15,72
R	40,84	12,04
Me	36,15	8,43

Таблица 7

Статистические параметры площади поверхности и объема семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» второй выборки

Статистические параметры	Выборка семян № 2 (ДатаСет2)	
	$S_c, \text{мм}^2$	$V_c, \text{мм}^3$
M	35,15	8,57
D	35,0	4,8
δ	5,9	2,2
$C.V., \%$	17,0	26,0
m_M	0,30	0,11
$p, \%$	0,84	1,3
Min	19,70	3,55
Max	53,50	17,92
R	33,80	14,37
Me	35,17	8,44

Результаты статистической обработки геометрических параметров сортовых семян трех выборок показали, что семена, также случайным образом отобранные в 3 отдельные совокупности выборок, имеют следующие основные статистические показатели (соответственно выборка № 1, выборка № 2 и выборка № 3):

а) по площади поверхности семени: среднеарифметическая величина – 36,40, 35,15 и 32,99 мм²; коэффициент вариации – 17,0, 17,0 и 20,0%;

минимальное значение – 17,80, 19,70 и 16,67 мм²; максимальное значение – 58,64, 53,50 и 58,86 мм²; размах – 40,84, 33,80 и 42,19 мм²; медиана – 36,15, 35,17 и 32,31 мм²;

б) по объему семени: среднеарифметическая величина – 8,66, 8,57 и 7,57 мм³; коэффициент вариации – 24,0, 26,0 и 28,0%; минимальное значение – 3,68, 3,55 и 2,27 мм³; максимальное значение – 15,72, 17,92 и 17,00 мм³; размах – 12,04, 14,37 и 14,73 мм³; медиана – 8,43, 8,44 и 7,27 мм³.

Таблица 8

Статистические параметры площади поверхности и объема семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» третьей выборки

Статистические параметры	Выборка семян № 3 (ДатаСет3)	
	$S_c, \text{мм}^2$	$V_c, \text{мм}^3$
M	32,99	7,57
D	42,0	4,6
δ	6,5	2,1
$C.V., \%$	20,0	28,0
m_M	0,32	0,11
$p, \%$	0,98	1,4
Min	16,67	2,27
Max	58,86	17,00
R	42,19	14,73
Me	32,31	7,27

Таблица 9

Статистические параметры площади поверхности и объема семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» всей выборки

Статистические параметры	Вся выборка семян	
	$S_c, \text{мм}^2$	$V_c, \text{мм}^3$
M	34,85	8,27
D	40,29	4,83
δ	6,35	2,20
$C.V., \%$	18,2	26,6
m_M	0,18	0,06
$p, \%$	0,53	0,77
Min	16,67	2,28
Max	58,86	17,92
R	42,19	15,64
Me	34,51	8,04

Результаты исследований показывают, что при уменьшении показателей средней площади поверхности и объема семени коэффициент вариации при этом увеличивается, размах признака также увеличивается, а медианные значения данных показателей снижаются.

Корреляционные взаимосвязи между геометрическими и гравиметрическими параметрами сортовых семян в каждой отдельной из трех исследуемых выборок и всей совокупности приведены в табл. 10–13.

Таблица 10

Корреляционная матрица первой выборки семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская»

Параметры семени	Длина	Ширина	Толщина	Площадь	Объем
Масса	0,62	0,54	0,54	0,67	0,76
Длина		0,51	0,21	0,86	0,72
Ширина	0,04		0,28	0,87	0,77
Толщина	0,05	0,05		0,28	0,72
Площадь	0,01	0,01	0,05		0,87
Объем	0,02	0,02	0,02	0,01	

Примечание. В табл. 10–13 в верхнем треугольнике – значения коэффициентов корреляции, в нижнем – значения ошибок коэффициентов корреляции.

Таблица 11

Корреляционная матрица второй выборки семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская»

Параметры семени	Длина	Ширина	Толщина	Площадь	Объем
Масса	0,69	0,70	0,64	0,79	0,86
Длина		0,55	0,29	0,88	0,73
Ширина	0,04		0,46	0,87	0,81
Толщина	0,05	0,04		0,42	0,79
Площадь	0,01	0,01	0,04		0,88
Объем	0,02	0,02	0,02	0,01	

Таблица 12

Корреляционная матрица третьей выборки семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская»

Параметры семени	Длина	Ширина	Толщина	Площадь	Объем
Масса	0,62	0,63	0,60	0,72	0,80
Длина		0,53	0,32	0,87	0,76
Ширина	0,04		0,45	0,87	0,82
Толщина	0,05	0,04		0,43	0,76
Площадь	0,01	0,01	0,04		0,91
Объем	0,02	0,02	0,02	0,01	

Таблица 13

Корреляционная матрица всей выборки семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская»

Параметры семени	Длина	Ширина	Толщина	Площадь	Объем
Масса	0,64	0,62	0,59	0,72	0,80
Длина		0,55	0,29	0,88	0,75
Ширина	0,02		0,41	0,88	0,81
Толщина	0,03	0,02		0,40	0,77
Площадь	0,01	0,01	0,02		0,89
Объем	0,01	0,01	0,01	0,01	

Полученные результаты корреляционного анализа показывают, что взаимосвязи между геометрическими и гравиметрическими параметрами семян носят различный характер.

Так, для первой выборки практически отсутствует корреляционная связь между параметрами длины и толщины семени ($C.V. = 0,21$), ширины и толщины семени ($C.V. = 0,28$), толщины и площади семени ($C.V. = 0,28$). Умеренная корреляционная связь обнаружена между длиной и шириной семени ($C.V. = 0,51$), длиной и массой семени ($C.V. = 0,54$), толщиной и массой семени ($C.V. = 0,67$), массой и площадью семени ($C.V. = 0,67$). Тесная корреляционная связь выявлена между площадью поверхности и объемом семени ($C.V. = 0,87$), площадью поверхности и шириной семени ($C.V. = 0,87$), площадью и длиной семени ($C.V. = 0,86$), шириной и объемом семени ($C.V. = 0,77$), массой и объемом семени ($C.V. = 0,76$), длиной и объемом семени ($C.V. = 0,72$), толщиной и объемом семени ($C.V. = 0,72$).

Во второй выборке корреляционная связь отсутствует только между длиной и толщиной семени ($C.V. = 0,29$). Низкая корреляционная связь отмечается между шириной и толщиной семени ($C.V. = 0,46$) и толщиной и площадью семени ($C.V. = 0,42$). Умеренная корреляционная связь выявлена между массой и шириной семени ($C.V. = 0,70$), длиной и массой семени ($C.V. = 0,69$), толщиной и массой семени ($C.V. = 0,64$), длиной и шириной семени ($C.V. = 0,55$). Тесная корреляционная связь выявлена между длиной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), длиной и площадью семени ($C.V. = 0,88$), шириной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,87$), массой и объемом семени ($C.V. = 0,86$), шириной и объемом семени ($C.V. = 0,81$), толщиной и объемом семени ($C.V. = 0,79$), массой и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,79$), длиной и объемом семени ($C.V. = 0,73$).

В третьей выборке отсутствие корреляционной связи между любыми случайно взятыми для анализа параметрами отсутствует. Низкая корреляционная связь установлена между шириной и толщиной семени ($C.V. = 0,45$), толщиной и площадью семени ($C.V. = 0,43$), толщиной и длиной семени ($C.V. = 0,32$). Умеренная корреляционная связь выявлена между массой и шириной семени ($C.V. = 0,63$), массой и длиной семени ($C.V. = 0,62$), массой и толщиной семени ($C.V. = 0,60$), длиной и шириной семени ($C.V. = 0,53$).

Тесная корреляционная связь выявлена между площадью поверхности и объемом семени ($C.V. = 0,91$), длиной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,87$), шириной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,87$), шириной и объемом семени ($C.V. = 0,82$), массой и объемом семени ($C.V. = 0,80$), толщиной и объемом семени ($C.V. = 0,76$), длиной и объемом семени ($C.V. = 0,76$), массой и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,72$).

Для всей выборки сортовых семян корреляционная связь отсутствует только между параметрами длины и толщины семени ($C.V. = 0,29$).

Низкая корреляционная связь установлена между шириной и толщиной семени ($C.V. = 0,41$) и толщиной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,40$).

Умеренная корреляционная связь выявлена между массой и длиной семени ($C.V. = 0,64$), массой и шириной семени ($C.V. = 0,62$), массой и толщиной семени ($C.V. = 0,59$), длиной и шириной семени ($C.V. = 0,55$).

Тесная корреляционная связь выявлена между площадью поверхности и объемом семени ($C.V. = 0,89$), длиной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), шириной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), шириной и объемом семени ($C.V. = 0,81$), массой и объемом семени ($C.V. = 0,80$), толщиной и объемом семени ($C.V. = 0,77$), длиной и объемом семени ($C.V. = 0,75$), массой и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,72$).

Заключение. Определены посевные качества семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» (масса 1000 семян, чистота семян, техническая всхожесть семян, энергия прорастания семян, средний семенной покой семян).

Установлены размерно-весовые и геометрические характеристики семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская», такие как длина, ширина и толщина семени, площадь поверхности и объем семени, рассчитаны основные статистические показатели данных величин.

Результаты геометрических исследований сортовых семян показывают, что при уменьшении показателей средней площади поверхности и объема семени коэффициент вариации при этом увеличивается, размах признака также увеличивается, а медианные значения данных показателей снижаются.

Полученные расчеты размерно-весовых показателей сортовых семян позволяют заключить, что по длине и ширине семени коэффициент варьирования [22] во всех выборках не превышает 11% (соответствует низкому уровню изменчивости), по толщине семени данный показатель находится на уровне 13–14% (соответствует среднему уровню изменчивости), по массе семени уровень изменчивости достигает 28–31%, что характеризует выборки высоким уровнем изменчивости).

Установленная корреляционная связь между геометрическими и гравиметрическими параметрами сортовых семян сосны обыкновенной характеризуется различной степенью зависимости. Тесная корреляционная связь выявлена между площадью поверхности и объемом семени ($C.V. = 0,89$), длиной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), шириной и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,88$), шириной и объемом семени ($C.V. = 0,81$), массой и объемом семени ($C.V. = 0,80$), толщиной и объемом семени ($C.V. = 0,77$), длиной и объемом семени ($C.V. = 0,75$), массой и площадью поверхности семени ($C.V. = 0,72$).

Умеренный характер корреляционной связи выявлен между параметрами массы и длины семени ($C.V. = 0,64$), массы и ширины семени ($C.V. = 0,62$), массы и толщины семени ($C.V. = 0,59$), длины и ширины семени ($C.V. = 0,55$).

Низкий уровень корреляционной связи установлен для таких параметров, как толщина и ширина семени ($C.V. = 0,41$) и толщина и площадь поверхности семени ($C.V. = 0,40$).

Для всей выборки сортовых семян корреляционная связь отсутствует только между параметрами длины и толщины семени ($C.V. = 0,29$).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-26-00228 «Исследование спектрометрических показателей семян как основа интенсификации процесса лесовыращивания культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская»», <https://rscf.ru/project/23-26-00228/>.

Список литературы

1. Ребко С. В., Новиков А. И. Основные принципы и подходы начального этапа интенсификации процесса лесовыращивания лесных культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 322–325.

2. Вариативность массовых характеристик семян *Pinus sylvestris* L. в таежной зоне / Н. А. Бабич [и др.] // Лесной журнал. 2019. № 2. С. 141–147. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.141.
3. Оценка влияния морфометрических параметров шишек на качество семенного материала сосны обыкновенной / В. П. Иванов [и др.] // Лесной журнал. 2018. № 4. С. 19–30. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.19.
4. Хатнянский В. И., Волгин В. В., Пивень Л. Е. Влияние крупности семян на их посевные и урожайные качества // Науч.-техн. бюл. Всерос. науч.-исслед. ин-та масличных культур. 2005. Вып. 1 (132). С. 42–48.
5. Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячеистых SideSlit-контейнерах / А. И. Новиков [и др.] // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2 (50). С. 59–86. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4.
6. Ребко С. В., Поплавская Л. Ф. Посевные качества семян различных клонов и форм сосны обыкновенной на гибридно-семенной плантации // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2007. Вып. XV. С. 259–263.
7. Молотков П. И., Патлай И. Н., Давыдова Н. И. Селекция лесных пород. М.: Лесная пром-сть, 1982. 224 с.
8. Новикова Т. Н., Жамъянсурен С. Изменчивость качества семян сосны обыкновенной у южных пределов ее распространения в Сибири и Монголии // Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та. 2012. № 4. С. 102–107.
9. Castro J., Hódar J. A., Gómez J. M. Seed Size. Ch. 14 // Handbook of Seed Science and Technology / ed. by A. S. Basra. New York: Haworth Press, 2006. P. 397–428.
10. Fober H. Relation between Climatic Factors and Scots Pine (*Pinus sylvestris*) Cone Crops in Poland // Arboretum Kórnickie. 1976. Vol. 21. P. 367–374.
11. Sarvas R. Investigations of the Flowering and Seed Crop of *Pinus sylvestris* // Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisu. 1962. Vol. 53, no. 4. P. 198.
12. An Adaptive Epigenetic Memory in Conifers with Important Implications for Seed Production / I. Yakovlev [et al.] // Seed Science Research. 2012. Vol. 22, no. 2. P. 63–76. DOI: 10.1017/S0960258511000535.
13. Петрищев Е. П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 4 (44). С. 161–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14.
14. Бессчетнов В. П., Бессчетнова Н. Н. Селекционная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной методами многомерного анализа // Лесной журнал. 2012. № 2. С. 58–74.
15. Бессчетнов В. П., Бессчетнова Н. Н. Многомерная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) по морфологическим параметрам семян // Вестн. МГУЛ – Лесной вестник. 2013. № 3 (95). С. 11–17.
16. Бессчетнова Н. Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Репродуктивный потенциал плюсовых деревьев: монография. Н. Новгород: Нижегород. гос. с.-х. акад., 2015. 586 с.
17. Новиков А. И. Влияние сортирования семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 5. С. 313–319.
18. Семена деревьев и кустарников. Правила отбора образцов и методы определения посевных качеств семян: ГОСТ 13056.6–97. М.: Изд-во стандартов, 1998. 29 с.
19. Семена хвойных древесных пород. Посевные качества. Технические условия: ГОСТ 14161–86. М.: Гос. ком. СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1986. 9 с.
20. International rules for seed testing. Bassersdorf: The International Seed Testing Association (ISTA), 2003. 24 p.
21. Семена деревьев и кустарников. Методы определения влажности: ГОСТ 13056.3–86. М.: Изд-во стандартов, 1988. 15 с.
22. Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.

References

1. Rebko S. V., Novikov A. I. Basic principles and approaches of the initial stage of intensification of the process of forest growing of Scots pine forest crops of the Negorelskaya variety. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forestry: materials of the 87th scientific and technical. conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation)], Minsk, 2023, pp. 322–325 (In Russian).

2. Babich N. A., Drochkova A. A., Komarova A. M., Lebedeva O. P., Andronova M. M. Variability of Weight Characteristics of *Pinus sylvestris* Seeds in the Taiga Zone. *Lesnoy zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 141–147. DOI: 10.17238/issn05361036.2019.2.141 (In Russian).
3. Ivanov V. P., Marchenko S. I., Glazun I. N., Nartov D. I. Impact Assessment of Morphometric Characteristics of Cones on the Quality of Scots Pine Seed Material. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 4, pp. 19–30. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.19 (In Russian).
4. Khatnyansky V. I., Volgin V. V., Piven L. E. The influence of seed size on their sowing and yield qualities. *Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* [Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Oilseeds], 2005, issue 1 (132), pp. 42–48 (In Russian).
5. Novikov A. I., Rebko S. V., Novikova T. P., Petrishchev E. P. The effect of the individual seed mass of “Negorelskaya” variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell SideSlit growing containers. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, vol. 13, no. 2 (50), pp. 59–86. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4 (In Russian).
6. Rebko S. V., Poplavskaya L. F. Sowing qualities of seeds of various clones and forms of Scots pine on a hybrid seed plantation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2007, issue XV, pp. 259–263 (In Russian).
7. Molotkov P. I., Patlai I. N., Davydova N. I. *Selektsiya lesnykh porod* [Selection of forest species]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 224 p. (In Russian).
8. Novikova T. N., Zhamyansuren S. Scotch Pine Seed Quality Variability near Southern Limits of its Spread in Siberia and Mongolia. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [The Bulletin of KrasGAU], 2012, no. 4, pp. 102–107 (In Russian).
9. Castro J., Hódar J. A., Gómez J. M. Seed Size. Ch. 14. *Handbook of Seed Science and Technology*. New York, Haworth Press, 2006, pp. 397–428.
10. Fober H. Relation between Climatic Factors and Scots Pine (*Pinus silvestris*) Cone Crops in Poland. *Arboretum Kórnickie*, 1976, vol. 21, pp. 367–374.
11. Sarvas R. Investigations of the Flowering and Seed Crop of *Pinus silvestris*. *Metsatieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisu*, 1962, vol. 53, no. 4, p. 198.
12. Yakovlev I., Fossdal C. G., Skråppa T., Olsen J. E., Jahren A. H., Johnsen O. An Adaptive Epigenetic Memory in Conifers with Important Implications for Seed Production. *Seed Science Research*, 2012, vol. 22, no. 2, pp. 63–76. DOI: 10.1017/S0960258511000535.
13. Petrishchev E. P. Relationship investigation of biometric parameters of juvenile Scots pine seedlings from conditioned seeds in assessing the reforestation results. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry engineering journal], 2021, vol. 11, no. 4 (44), pp. 161–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14 (In Russian).
14. Besschetnov V. P., Besschetnova N. N. Breeding assessment of plus trees of Scots pine using multivariate analysis methods. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2012, no. 2, pp. 58–74 (In Russian).
15. Besschetnov V. P., Besschetnova N. N. Multidimensional assessment of plus trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based on morphological parameters of seeds. *Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik* [Bulletin of MSFU – Forestry Bulletin], 2013, no. 3 (95), pp. 11–17 (In Russian).
16. Besschetnova N. N. *Sosna obyknovennaya (Pinus sylvestris L.). Reproductivnyy potentsial plusovykh derev'yev* [Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Reproductive Potential of Plus Trees]. Nizhniy Novgorod, NSAA Publ., 2015. 586 p. (In Russian).
17. Novikov A. I. The influence of sorting Scots pine seeds by color and size on their soil germination in containers. *Khvoynnye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, vol. 37, no. 5, pp. 313–319 (In Russian).
18. GOST 13056.6–97. Seeds of trees and shrubs. Rules for sampling and methods for determining the sowing qualities of seeds. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998. 29 p. (In Russian).
19. GOST 14161–86. Seeds of coniferous trees. Sowing qualities. Specifications. Moscow, Gosudarstvennyy Komitet po standartam Publ., Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. 9 p. (In Russian).
20. International rules for seed testing. Bassersdorf, The International Seed Testing Association (ISTA), 2003. 24 p.
21. GOST 13056.3–86. Seeds of trees and shrubs. Methods for determining humidity. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1988. 15 p. (In Russian).
22. Mamaev S. A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy (na primere semeystva Pinaceae na Urale)* [Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (On the Example of the Pinaceae Family in the Urals)]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p. (In Russian).

Информация об авторах

Рибко Сергей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rebko@belstu.by

Новиков Артур Игоревич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры древесиноведения. Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8, Российская Федерация). E-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru

Новикова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии. Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8, Российская Федерация). E-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru

Петрищев Евгений Петрович – аспирант кафедры древесиноведения. Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8, Российская Федерация). E-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru

Information about the authors

Rabko Siarhei Uladzimiravich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rebko@belstu.by

Novikov Arthur Igorevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Wood Science. Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (8, Timiryazeva str., 394087, Voronezh, Russian Federation). E-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru

Novikova Tatyana Petrovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Computer Technology and Microelectronic Engineering. Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (8, Timiryazeva str., 394087, Voronezh, Russian Federation). E-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru

Petrishchev Evgeniy Petrovich – PhD Student of the Department of Wood Science. Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (8, Timiryazeva str., 394087, Voronezh, Russian Federation). E-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru

Поступила 15.10.2023

УДК 630*232

Е. В. Чурило, Е. К. Киб, Ж. Ю. Пименова, И. А. Жуков
Институт леса Национальной академии наук Беларуси

**ВЛИЯНИЕ СВОЕВРЕМЕННОГО ПРОВЕДЕНИЯ АГРОТЕХНИЧЕСКИХ
УХОДОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ НЕСОМКНУВШИХСЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР
В ПОДЗОНЕ ГРАБОВО-ДУБОВО-ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ**

Успешность лесовосстановления определяется качественной подготовкой лесокультурной площади, правильным выбором породного состава, схемы смешения культивируемых растений и их густоты, использованием качественного посевного и посадочного материала, а также своевременным проведением агротехнических и лесоводственных уходов и дополнений. По результатам проведенных исследований в подзоне грабово-дубово-темнохвойных лесов установлено, что определяющим фактором, влияющим на рост и развитие лесных культур, является своевременное и качественное проведение уходов за лесными культурами. В свежих типах условий местопроизрастания уже в первый год выращивания лесных культур травянистая растительность получает мощное развитие. При отсутствии агротехнических уходов культуры попадают под полог травянистого покрова и растут под его влиянием. Угнетение культур проявляется в слабом развитии ассимиляционного аппарата и корневой системы. Обеспечение качественного выращивания лесных культур возможно в том числе за счет увеличения доли механизации на всех этапах выращивания, включая подготовку лесокультурной площади, создание лесных культур, проведение уходов. Во время исследований установлено, что проведение механизированных уходов на значительной площади несомкнувшихся лесных культур затруднено в связи с нарушением технологий создания культур.

Ключевые слова: лесовосстановление, лесные культуры, агротехнический уход, механизированный уход, приживаемость лесных культур, сохранность лесных культур, качество лесных культур.

Для цитирования: Чурило Е. В., Киб Е. К., Пименова Ж. Ю., Жуков И. А. Влияние своевременного проведения агротехнических уходов на рост и развитие несомкнувшихся лесных культур в подзоне грабово-дубово-темнохвойных лесов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 77–81.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-9.

Ye. V. Churilo, Ye. K. Kib, Zh. Yu. Pimenova, I. A. Zhukov
Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus

**INFLUENCE OF TIMELY CARRYING OUT AGRICULTURAL CARE
ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF NON-CLOSED FOREST CROPS
IN THE SUBZONE OF HORNBEEK-OAK-DARCONINE FORESTS**

The success of reforestation is determined by the quality preparation of the forest area, the correct choice of species composition and mixing scheme of cultivated plants, their density, the use of high-quality seed and planting material, as well as the timely implementation of agrotechnical and silvicultural care and additions. According to the results of the studies carried out in the subzone of hornbeam-oak-dark coniferous forests, it was found that the determining factor influencing the growth and development of forest plantations is the timely and high-quality maintenance of forest plantations. In fresh types of habitat conditions, already in the first year of growing forest crops, herbaceous vegetation receives a powerful development. In the absence of agrotechnical care, crops fall under the canopy of grass cover and grow under its influence. The oppression of crops is manifested in the weak development of the assimilation apparatus and the root system. Ensuring the high-quality cultivation of forest crops is possible, among other things, by increasing the share of mechanization at all stages of cultivation, including the preparation of a forest cultivation area, the creation, and maintenance. In the course of the research, it was found that carrying out mechanized care on a large area of non-closed forest crops is difficult due to the violation of crop creation technologies.

Keywords: reforestation, forest plantations, agrotechnical care, mechanized care, survival rate of forest plantations, preservation of forest plantations, quality of forest plantations.

For citation: Churilo Ye. V., Kib Ye. K., Pimenova Zh. Yu., Zhukov I. A. Influence of timely carrying out agricultural care on the growth and development of non-closed forest crops in the subzone of hornbeam-oak-darconine forests. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 77–81 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-9.

Введение. В Республике Беларусь уделяется большое внимание устойчивому лесопользованию и лесопользованию, созданию и выращиванию биологически устойчивых лесов, в том числе с учетом сохранения биоразнообразия, влияния глобального изменения климата.

В лесном фонде Республики Беларусь искусственно созданные леса занимают 23,7% от лесопокрытой площади. На протяжении 2003–2021 гг. создано около 646,0 тыс. га лесных культур. Площадь создания лесных культур селекционным посевным и посадочным материалом в последние годы составляет более 50% от общего объема лесовосстановления и лесоразведения.

Основной задачей лесовосстановления является воспроизводство лесов в кратчайшие сроки наиболее эффективным методом, повышение продуктивности, качества и устойчивости лесов, сохранение биоразнообразия, улучшение экологической ситуации [1].

Интенсивное создание лесных культур в республике началось в начале 50-х годов прошлого века. Максимальные объемы искусственных насаждений приходились на годы облесения малопродуктивных песчаных земель и создания защитных насаждений (1966–1975 гг.) [2].

За последние 10 лет площадь создания лесных культур ежегодно увеличивалась (рис. 1) [3].

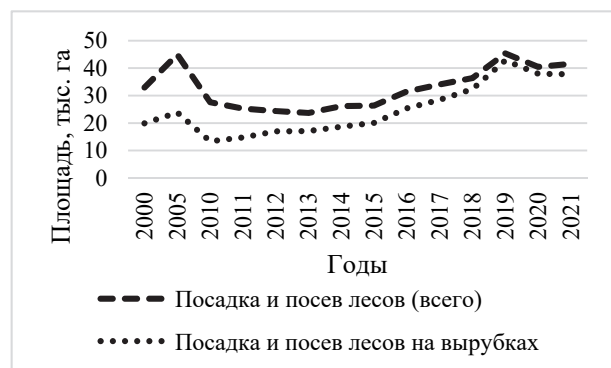


Рис. 1. Объем создания лесных культур на территории Беларуси в 2000–2021 гг.

В 2021 г. объем создания лесных культур возрос по сравнению с 2012 г. практически в 1,7 раза (с 24,7 до 41,6 тыс. га). Данный рост связан с ежегодным увеличением лесокультурных площадей, в значительной степени за счет вырубок. Так, в 2012 г. создание лесных культур на вырубках осуществлялось на площади 17,0 тыс. га, в 2021 г. — на 37,9 тыс. га.

Существенное увеличение площади искусственного лесовосстановления связано в основном с повреждением насаждений шквалистыми ветрами при прохождении грозных фронтов, которые в 2016 г. отмечались на территории страны в течение всего лета. Значительные объ-

емы искусственного лесовосстановления, выполненные в 2018–2020 гг., также связаны с гибелью насаждений. Лесные культуры создавались в основном на вырубках, образовавшихся после проведения сплошных санитарных рубок в хвойных насаждениях, погибших от воздействия стволовых вредителей. Следует отметить, что в 2018 г. была отмечена максимальная площадь насаждений, погибших от воздействия различных неблагоприятных природных факторов (50 тыс. га). Как следствие, в 2019 г., после работ по ликвидации погибших насаждений, возникла необходимость проведения большого объема работ по лесовосстановлению на этих участках [4].

Вместе с тем трудовые ресурсы в лесохозяйственных учреждениях, представленные преимущественно сельским населением, сократились, в то время как объем лесокультурных работ значительно увеличился. В результате ухудшилось качество проводимых лесокультурных работ и, как результат, состояние лесных культур.

Густота посадки, размещение посадочных мест на лесокультурной площади определяют сроки смыкания растений в рядах и междурядьях, количество и сроки проведения агротехнических и лесоводственных уходов, естественное изреживание, ход роста и формирования насаждений [5–7].

Проведение механизированных уходов позволяет в значительной степени повысить производительность труда при проведении уходов за лесными культурами. Вместе с тем использование механизмов на данных видах работ возможно только при качественной предварительной очистке лесосек от порубочных остатков и подготовке лесокультурных площадей с фиксированной шириной междурядий.

Основная часть. При проведении исследований нами было заложено 149 пробных площадей в подзоне грабово-дубово-темнохвойных лесов на территории Брестского ГПЛХО (Пружанский лесхоз), Гомельского ГПЛХО (Рогачевский и Жлобинский лесхозы, Чечерский спецлесхоз), Гродненского ГПЛХО (Ивьевский и Лидский лесхозы), Минского ГПЛХО (Слуцкий лесхоз), Могилевского ГПЛХО (Осиповичский опытный лесхоз), а также ГЛХУ «Жорновская экспериментальная лесная база Института леса НАН Беларуси». При обследовании участков лесных культур нами учитывались: способы создания, вид посадочного материала, густота создания, количество произрастающих древесных растений, их средняя высота, проводимые уходы. Устанавливались причины гибели и ухудшения состояния лесных культур. На части участков лесных культур отмечалось наличие пней без предварительного понижения, высотой

60 см и более, что препятствует созданию прямолинейных борозд при подготовке почвы и в дальнейшем проведению качественных механизированных уходов.

Состояние лесных культур в значительной степени зависит от своевременного и качественного проведения уходов и дополнений.

Полученные в результате исследований данные о количестве проведенных агротехнических уходов в несомкнувшихся лесных культурах приведены на рис. 2.

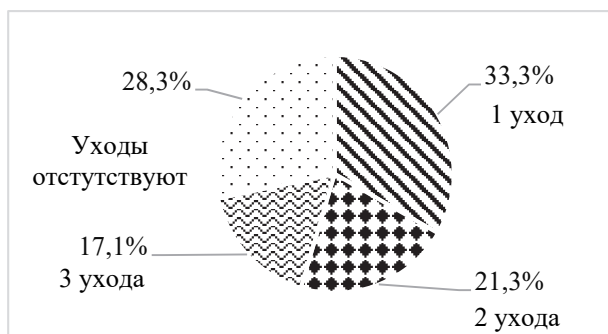


Рис. 2. Распределение несомкнувшихся лесных культур в зависимости от количества проведенных уходов

В ходе проведения работы было обследовано 380,1 га лесокультурной площади, из них 228,4 га – чистые и смешанные культуры лиственных пород и 151,7 га – хвойных пород 1–15-летнего возраста.

При оценке качества лесных культур главных древесных пород различной густоты посадки учитывались: количество деревьев главной породы в сравнении с нормативным, средняя высота деревьев главной породы, равномерность распределения деревьев главной породы по площади и соотношение высот деревьев главных и второстепенных пород [8, 9].

Всего культуры хорошего качества составили 12,9% от общей площади обследованных участков, удовлетворительного – 62,8%, неудовлетворительного – 24,3% (в том числе заросшие травянистой растительностью культуры 1–3-летнего возраста). Распределение лесных культур по состоянию в зависимости от возраста представлено на рис. 3.

Низкая приживаемость (сохранность) лесных культур на участках с богатыми условиями местопроизрастания обусловлена отсутствием агротехнических уходов либо несвоевременным их проведением.

Приживаемость однолетних лесных культур при условии качественного своевременного проведения агротехнических уходов составляет 97,5%, при несвоевременном – снижается до 50,7%.

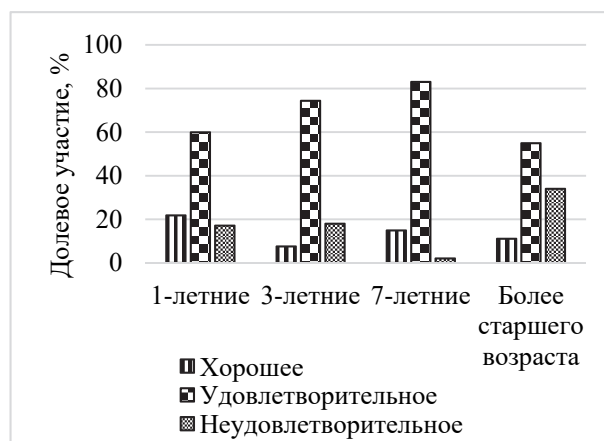


Рис. 3. Распределение лесных культур по качеству

В процессе исследований в 3-летних лесных культурах установлено, что при несвоевременном и некачественном их проведении в богатых условиях местопроизрастания (D_2 , D_3) к 3 годам их приживаемость снижается до 28,3%, средняя высота деревьев главной породы (D) не превышает 0,3 м. Заглушение культур дуба травянистой растительностью, снижение освещенности приводит к изменению их морфологического строения. Отмечено, что у молодых культур дуба уменьшается листовая поверхность, что тормозит рост и развитие корневой системы, а также накопление фитомассы. В свою очередь при соблюдении технологии выращивания лесных культур приживаемость составляет 89,3%, средняя высота культур – 0,6 м.

В культурах 7 лет и старше хорошая сохранность (до 87,3%) отмечена среди участков, где проводились регулярные агротехнические и лесоводственные уходы.

Обеспечение качественного выращивания лесных культур возможно в том числе за счет увеличения доли механизации на всех этапах выращивания, включая подготовку лесокультурной площади, создание лесных культур, проведение уходов.

На сегодняшний день проведение механизированных уходов на значительной площади несомкнувшихся лесных культур затруднено в связи с нарушением технологий при их создании.

Значительное влияние на состояние лесных культур оказывают дикие животные. Около 13,0% обследуемых площадей лесных культур в той или иной степени были повреждены дикими животными. Зачастую, именно в результате погрыв качество лесных культур признавалось неудовлетворительным. Обработка лесных культур различными препаратами от погрыв дикими животными не гарантирует 100%-ную защиту. Наиболее эффективным способом защиты является огораживание культур [10].

Заключение. Состояние лесных культур в значительной степени зависит от своевременного и качественного проведения уходов и дополнений. Так, при несвоевременном и некачественном их проведении в богатых условиях местопроизрастания (D_2 , D_3) к 3 годам приживаемость лесных культур снижается до 28,3%, средняя высота деревьев главной породы (Д) не превышает 0,3 м. В свою очередь при соблюдении технологии выращивания лесных культур

приживаемость составляет 89,3%, средняя высота деревьев главной породы (Д) – 0,6 м.

Проведение механизированных уходов возможно только при качественной предварительной очистке лесосек от порубочных остатков и подготовке лесокультурных площадей с фиксированной шириной междурядий.

В противном случае проведение механизированных уходов приводит к повреждению лесных культур и дальнейшей их гибели.

Список литературы

1. Об изменении постановления Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь от 19 декабря 2016 г. № 80: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 24.03.2022, № 5 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22137108&p1=1> (дата обращения: 09.03.2023).
2. Носников В. В. Искусственное лесовосстановление как основной инструмент повышения продуктивности и качества лесов в Республике Беларусь // Опыт управления лесным хозяйством в Республике Беларусь и сопредельных государствах, перспективы совместного преодоления глобальных вызовов современности: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 14–16 сент. Минск, 2016. С. 36–42.
3. Площадь лесовосстановления и лесоразведения в Республике Беларусь // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=144045f> (дата обращения: 22.10.2022).
4. Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь (ГИАЦ НСМОС) // НСМОС. URL: www.nsmos.by (дата обращения: 15.11.2022).
5. Гвоздев В. К., Волкович А. П. Лесоводственное обоснование оптимальной густоты посадки лесных культур ели европейской // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 66–72.
6. Влияние густоты посадки на устойчивость искусственных сосновых насаждений / Е. С. Залесова [и др.] // Лесной вестник. 2019. Т. 23, № 1. С. 22–27.
7. Влияние начальной густоты и интенсивности изреживания древостоя в культурах сосны на прирост и плотность древесины / Ю. П. Демаков [и др.] // Вестн. ПГТУ. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 2. С. 26–40.
8. Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь: ТКП 622-2018 (33090). Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2018. 96 с.
9. Градяцкас А. И., Малинаускас А. А. Оценка качества лесных культур. Каунас: ЛитНИИЛХ, 1980. 20 с.
10. Перспективный вид. Огораживание // Лесное и охотничье хозяйство. 2021. №. 8. С. 43–48.

References

1. On changing the decision of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus dated December 19, 2016: the Resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22137108&p1=1> (accessed 09.03.2023) (In Russian).
2. Nosnikov V. V. Artificial reforestation as the main tool for increasing the productivity and quality of forests in the Republic of Belarus. *Opyt upravleniya lesnym khozyaystvom v Respublike Belarus' i sopredel'nykh gosudarstvakh, perspektivy sovmestnogo preodoleniya global'nykh vyzovov sovremennosti: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Experience of forestry management in the Republic of Belarus and neighboring countries, prospects for joint overcoming of global challenges of our time: collection of materials of the international scientific and practical conference]. Minsk, 2016, pp. 36–42 (In Russian).
3. Area of reforestation and afforestation in the Republic of Belarus. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=144045f> (accessed 22.10.2022) (In Russian).
4. Main Information and Analytical Center of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus (MIAC NSMOS). Available at: www.nsmos.by (accessed 15.11.2022) (In Russian).
5. Gvozdev V. K., Volkovich A. P. Silvicultural substantiation of the optimal planting density of European spruce forest cultures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 66–72 (In Russian).

6. Zalesova E. S., Ananiev E. M., Osipenko A. E., Shubin D. A., Terekhov G. G. Influence of planting density on the stability of artificial pine plantations. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 22–27 (In Russian).
7. Demakov Yu. P., Demitrova I. P., Nureeva T. V., Simatova T. Yu. Influence of the initial density and intensity of thinning of forest stand in pine cultures on the growth and density of wood. *Vestnik PGUTU* [PSTU Bulletin], series Forest. Ecology. Nature Management, 2019, no. 2, pp. 26–40 (In Russian).
8. TCP 622-2018 (33090). Technical requirements for forest management. Allotment and valuation of forest-sections in the forests of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus Publ., 2018. 96 p. (In Russian).
9. Gradyatskas A. I., Malinauskas A. A. *Otsenka kachestva lesnykh kul'tur* [Assessment of the quality of forest crops]. Kaunas, LitNIILKh Publ., 1980. 20 p. (In Russian).
10. Perspective view. Fencing. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2021, no. 8, pp. 43–48 (In Russian).

Информация об авторах

Чурило Егор Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научной и инновационной работе. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246001, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: chev7@tut.by

Киб Екатерина Константиновна – младший научный сотрудник. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246001, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: kibekaterina@gmail.com

Пименова Жанетта Юрьевна – младший научный сотрудник. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246001, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: pimenovazhana@mail.ru

Жуков Илья Андреевич – младший научный сотрудник. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246001, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: ilya008.56@gmail.com

Information about the authors

Churilo Yegor Vasil'yevich – PhD (Agriculture), Deputy Director for Science and Innovation Work. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246001, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: chev7@tut.by

Kib Yekaterina Konstantinovna – junior researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246001, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: kibekaterina@gmail.com

Pimenova Zhanetta Yurievna – junior researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246001, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: pimenovazhana@mail.ru

Zhukov Ilya Andreyevich – junior researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246001, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: ilya008.56@gmail.com

Поступила 15.03.2023

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING

УДК 577.212:632.4

Л. О. Иващенко^{1,2}, О. Ю. Баранов^{1,3}

¹Белорусский государственный технологический университет

²Институт леса Национальной академии наук Беларуси

³Национальная академия наук Республики Беларусь

МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА INA-БАКТЕРИЙ В СЕЯНЦАХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПРИ ИНФЕКЦИОННОМ ПОЛЕГАНИИ

Бактерии, активно образующие ледяное ядро, или льдонуклеирующие (INA), являются как эпифитными, так и эндифитными обитателями, вызывающими морозные повреждения многих растений при низкотемпературных температурах. На сегодняшний день информация об их участии в формировании патологических процессов в растениях является разрозненной и неполной. Одним из важных этапов в определении вредоносности INA-бактерий является их идентификация в растительных образцах. В данной статье изложены результаты определения информативности специфических праймеров, позволяющих осуществлять диагностику льдонуклеирующих бактерий как в образцах окружающей среды, так и на поверхности, и внутри сельскохозяйственных и лесных растений на основании амплификации гена *ina*, кодирующего белок образования льда (INP). Проведенные исследования с использованием растительных образцов в виде проростков сосны обыкновенной, характеризующихся признаками инфекционного полегания, показали наличие гена *ina* в экспериментальном материале.

Ключевые слова: льдонуклеирующая бактерия, инфекционное полегание, ген *ina*, образование льда, *Pseudomonas syringae*.

Для цитирования: Иващенко Л. О., Баранов О. Ю. Молекулярно-генетическая диагностика INA-бактерий в сеянцах сосны обыкновенной при инфекционном полегании // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 82–86. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-10.

L. O. Ivashchenko^{1,2}, O. Yu. Baranov^{1,3}

¹Belarusian State Technological University

²Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

³National Academy of Sciences of the Republic of Belarus

MOLECULAR GENETIC DIAGNOSTICS OF INA BACTERIA IN SCOTS PINE SEEDLINGS WITH INFECTIOUS LODGING

Bacteria that actively form ice nuclei, or ice nucleating bacteria (INA), are both epiphytic and endophytic inhabitants, causing frost damage to many plants at low positive temperatures. To date, information about their participation in the development of pathophysiological processes in plants is scattered and incomplete. One of the important stages in determining the competitiveness of INA bacteria is their identification in plant samples. This article presents the results of determining the information content of typical primers capable of diagnosing ice-nucleating bacteria both in generations of the current environment and on the surface and inside agricultural and forest plants based on amplification of the gene *ina* encoding the ice formation protein (INP). Conducted studies using plant samples in the form of Scots pine seedlings, features of the components of the infectious lodging, the presence of the gene *ina* the experimental material.

Keywords: ice nucleation bacteria, infectious lodging, *ina* gene, ice formation, *Pseudomonas syringae*.

For citation: Ivashchenko L. O., Baranov O. Yu. Molecular genetic diagnostics of INA bacteria in Scots pine seedlings with infectious lodging. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 82–86 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-10.

Введение. Льдонуклеирующие активные (INA) бактерии представляют собой группу бактерий, способных катализировать образование льда при низкотемпературных температурах [1]. Такую способность обеспечивают специализированные белки, закрепленные на внешней клеточной мембране бактерий [2]. INA-бактерии обычно являются грамотрицательными, эпифитными или фитопатогенными и в зависимости от уровня активности льдообразования подразделяются на три класса: А (активны при температуре до -2°C), В (от -5 до -7°C) и С (ниже -7°C) [2, 3].

Большое количество INA-бактерий присутствует на растениях и сельскохозяйственных культурах, но они также были выделены из объектов окружающей среды, в том числе облаков, дождя, снега и воздуха [3]. Из-за повсеместного распространения INA-бактерий на растениях и высокой активности образования кристаллов льда данная группа микроорганизмов может выступать значимым биотическим фактором повреждения растений [4].

Также INA-бактерии, в частности *Pseudomonas syringae* Van Hall, приобрели научный интерес из-за широкого спектра способов применения – создание снега, приготовление замороженных продуктов, разработка систем отображения поверхности бактерий (экспрессия чужеродного белка на поверхности клеток в биотехнологических целях), а также криоконсервации клеток и тканей [5].

В свою очередь, распространяясь как межклеточно, так и внутриклеточно в чувствительных к холоду растениях, лед вызывает механическое разрушение клеточных мембран. Такие повреждения могут быть существенными для некоторых растений, вызывая угнетение процессов роста и развития. Следует отметить, что некоторым INA-бактериям нужна определенная плотность популяции или особые условия, чтобы нанести ущерб растению или проявить свою патогенность [6].

Известно, что генетической основой нуклеации льда у бактерий является ген *ina*, который одновременно необходим и достаточен для фенотипа образования льда INA^+ [1]. На сегодняшний день идентифицировано около 12 видов льдонуклеирующих бактерий, выделенных в основном с поверхности растений. Они распространены среди трех отрядов Gammaproteobacteria и включают *P. syringae*, *P. fluorescens* Migula, *Pantoea agglomerans* Ewing & Fife и *Xanthomonas campestris* (Pammel) Dowson. Все эти бактерии экспрессируют изоформы одного и того же белка INP, которые при связывании во внешней мембране могут запускать нуклеацию при температуре около 0°C . Обычно верхний предел составляет от -2 до -4°C [5]. К настоящему моменту

были клонированы и секвенированы следующие гены *ina*: *inaZ*, *inaK*, *inaV* и *inaQ* у *P. syringae*, *inaW* – у *P. fluorescens*, *inaE* – у *Erwinia herbicola* Ewing & Fife, *inaA* – у *E. ananas* Serrano и *inaX* – у *X. campestris* pv. *translucens* [1].

Наиболее изученной в настоящий момент является бактерия *P. syringae*, которая, как и другие льдообразующие бактерии, была обнаружена во льду, граде и снеге, что свидетельствует о ее способности к содействию процессам кристаллизации паров воды в атмосфере [2]. Как фитопатоген, *P. syringae* усиливает повреждение тканей растений низкими температурами за счет повышения температуры инициации образования льда [2].

Так, Маки Л. Р. с соавторами обнаружили, что по мере увеличения концентрации клеток *P. syringae* температура, при которой происходило замерзание растения, становилась выше [7]. Арни Д. с соавторами показали, что восприимчивость кукурузы к заморозкам повышалась после обработки листьев *P. syringae* [8]. Согласно Линдоу С. Е. и соавторам было обнаружено, что *P. syringae* и другие эпифитные бактерии вызывают повреждение от заморозков у многих видов растений и сельскохозяйственных культур [9].

Если говорить о древесных растениях, то в работе Рамштед М. с соавторами выяснили, что *P. syringae* также является одной из важных INA-бактерий на ивах (*Salix*), вызывающей некротическую инфекцию и отмирание при температуре окружающей среды около 0°C . В более поздних работах было показано, что различные комбинации (консорциумы) INA-бактерий, включая виды рода *Erwinia*, *P. fluorescens* и другие виды *Pseudomonas*, *Sphingomonas* и *Xanthomonas*, также связаны с такими повреждениями у ив [6].

Как было представлено ранее, в некоторых случаях присутствие льдообразующих бактерий в растениях приводит к открытию пути для атаки других болезнетворных организмов, в частности фитопатогенных грибов [10]. Так, рядом авторов было высказано предположение, что первопричиной инфекционного полегания сеянцев сосны обыкновенной в лесных питомниках, возбудителями которого в настоящее время признаны микромицеты *Fusarium* spp. и *Rhizoctonia* spp., являются INA-бактерии, приводящие к увяданию молодых растений путем повреждения клеточных мембран.

Следует отметить, что льдонуклеирующая активность также была выявлена у грибов – впервые в штаммах рода *Fusarium* [11]. На сегодняшний день известно еще несколько видов грибов с различной начальной температурой замерзания – *Isaria farinosa* (Holmsk.) Fr. (примерно -4°C), *Mortierella alpina* Peyronel (около -5°C), виды рода *Puccinia* (от -4 до -8°C) и

Sarocladium implicatum (Gilman & Abbott) Giraldo, Gen & Guarro (приблизительно -9°C) [11].

Молекулярно-генетическая диагностика культивируемых и некультивируемых INA-бактерий основана на выявлении гена *ina*. Однако обнаружение маркерного гена не означает, что эти микроорганизмы являются эффективными льдообразователями, поскольку формирование фенотипа INA+ зависит от сложных и взаимодействующих факторов, таких как генотип, окружающая среда и виды растений-хозяев [5].

Эффективность ПЦР-амплификации фрагментов гена *ina* в первую очередь зависит от дизайна праймеров – они должны амплифицировать как можно больше аллелей гена с высокой специфичностью и чувствительностью [1]. Так, в работе Хилла Т. С. с соавторами были впервые разработаны универсальные праймеры для генов широкого спектра действия, которые были использованы при проведении ПЦР с целью количественного определения INA-бактерий на растениях, в снеге и граде (таблица). В результате проведения исследований *in vitro* авторы выявили наиболее эффективные пары праймеров – 3308f/3463r и 3341fb/3462rl, размер продукта которых составил 194 и 162 п. н. соответственно [5].

Праймеры, используемые для амплификации гена *ina* у бактерий (по Хиллу Т. С. и др.)

Праймер	Последовательность праймера (5'–3')
3076f	AGYTCGCTGATTGCGGGNC
3463r	STGTAVCKTTTTNCCGTCCCA
3308f	GGCGATMGVAGCAAACTSAC
3341fb	AHTGTRYBYTSATGGCBGGVGA
3462rl	TGTAVCKTTTSCCGTCCCAG

Основная часть. Целью данной работы являлась ПЦР-амплификация гена *ina* в образцах растительных тканей проростков сосны обыкновенной, характеризующихся признаками инфекционного полегания, для последующего установления роли этих бактерий в возникновении и протекании данного патологического процесса.

На первом этапе исследований с использованием праймеров, представленных в таблице, были амплифицированы два INA+-штамма бактерий *Xanthomonas campestris* и *P. syringae* с целью установления диагностической пригодности синтезированных олигонуклеотидных последовательностей. На рис. 1 представлена электрофореграмма, отражающая результаты амплификации этих бактерий с 3 парами праймеров.

Как видно из рис. 1, в образцах 2, 3, 5, 6 были получены продукты амплификации размером примерно 194 и 162 п. н., что указывает на пригодность пар праймеров 3308f/3463r и 3341fb/3462rl для проведения ПЦР-амплификации. Для целей

диагностики *in planta* нами была выбрана пара 3308f/3463r, позволяющая получать наиболее четкие продукты амплификации.

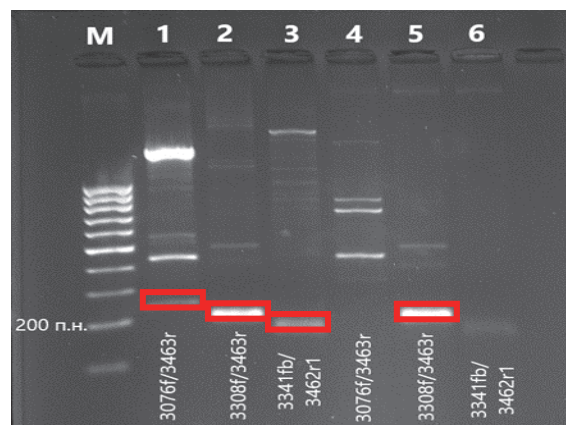


Рис. 1. Электрофореграмма амплификации бактерий *P. syringae* (1–3) и *X. campestris* (4–6):
М – маркер молекулярного веса

В ходе исследований были амплифицированы образцы ДНК инфицированных растительных тканей, искусственно зараженных фитопатогенными грибами *Fusarium oxysporum* Schltdl. и *Rhizoctonia solani* Kuhn (возбудители инфекционного полегания) семян сосны обыкновенной и семян, собранных в очаге инфекционного полегания на территории лесного питомника Хойнического лесхоза (время сбора: июнь 2023 г.). На рис. 2 представлены результаты ПЦР данных образцов.

Как видно из рис. 2, в образцах растений были диагностированы продукты амплификации гена *ina*.

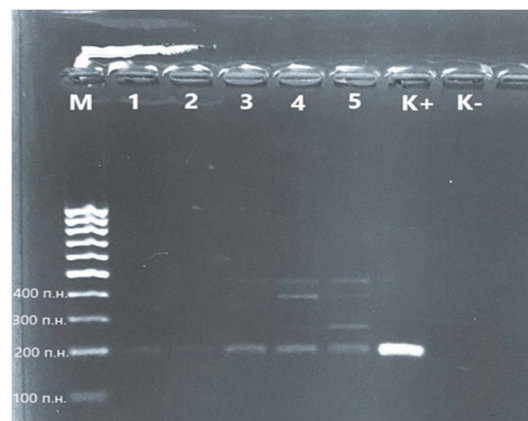


Рис. 2. Электрофореграмма амплификации инфицированных растительных тканей:
М – маркер молекулярного веса; 1–2 – образцы семян, собранные на лесном питомнике;
3–5 – искусственно зараженные семена;
K+ – положительный контроль; K– – отрицательный контроль

На втором этапе нами был произведен посев семян сосны обыкновенной в почву, собранную

на лесных питомниках Чечерского и Дисненского лесхозов в местах протекания инфекционного полегания семян в мае–июне 2023 г. Семена проращивались в контролируемых условиях при температуре 22°C и относительной влажности воздуха 60%. После прорастания семян для них искусственно были созданы условия околонулевых температур – контейнеры с проростками помещались на несколько дней в холодильник и содержались при температуре 4°C [12]. После появления симптомов полегания (истончение и побурение стебелька, у большинства семян вершинки остались в семенных колпачках из-за ослабления тургора в растениях) сеянцы изымали из почвы для дальнейшего молекулярно-генетического анализа.

Для выявления последовательности гена *ina* образцы амплифицировали с помощью праймеров 3308f и 3463r [6] с использованием следующей программы ПЦР: начальная стадия денатурации при 95°C в течение 4 мин с последующими 35 циклами – денатурация при 94°C 30 с, отжиг праймеров при 58°C 30 с и элонгация при 72°C 1 мин с финальной элонгацией при температуре 72°C в течение 5 мин.

В качестве положительного контроля нами был использован INA+–штамм *P. syringae*, отрицательный контроль представлял собой амплифицируемую смесь с деионизированной водой. Также для наглядности получаемых данных дополнительно были амплифицированы образцы семян сосны, характеризующиеся признаками инфекционного полегания, собранные в июне 2023 г. (на рис. 2 образцы № 1 и 2). Результаты ПЦР представлены на рис. 3.

Исходя из рис. 3 можно сделать вывод, что во всех образцах, за исключением образца № 4ч,

наблюдается наличие специфических продуктов ПЦР-амплификации размером примерно 200 п. н. это свидетельствует о наличии бактерий с геном *ina* в экспериментальном материале.

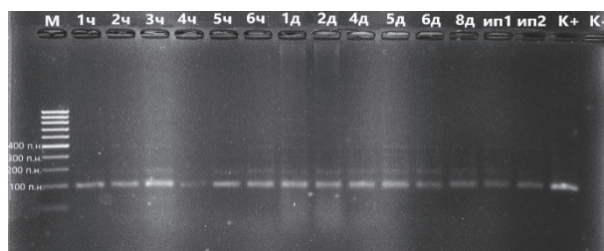


Рис. 3. Результаты амплифицирования проростков сосны, характеризующихся симптомами инфекционного полегания:

М – маркер молекулярного веса; 1ч–6ч – образцы проростков сосны на почве из Чечерского лесхоза; 1д–2д, 4д–6д, 8д – образцы проростков сосны на почве из Дисненского лесхоза; ип1, ип2 – образцы инфекционного полегания из Хойникского лесхоза; K+ – положительный контроль (бактерия *P. syringae*); K– – отрицательный контроль

Закключение. Таким образом, в результате исследований нами проведены тесты *in vitro* по выявлению INA-бактерий в образцах сосны обыкновенной, характеризующихся признаками инфекционного полегания. Как видно на рис. 3, в 11 из 12 экспериментальных проб было выявлено наличие бактерий, которые обладают льдонуклеирующей способностью. Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что на начальной стадии протекания инфекционного полегания в ослаблении молодых растений сосны могут принимать участие INA-бактерии.

Список литературы

1. Waturangi D. E., Tjhen A. Isolation, characterization, and genetic diversity of ice nucleation active bacteria on various plants // HAYATI Journal of Biosciences, 2009. Vol. 16 (2). P. 54–58.
2. Toward understanding bacterial ice nucleation / M. Lukas [et al.] // The Journal of Physical Chemistry B. 2022. Vol. 126 (9). P. 1861–1867.
3. Prevalence and characterization of Ice Nucleation Active (INA) bacteria from rainwater in Indonesia / V. Khosasih [et al.] // BMC microbiology. 2022. Vol. 22 (1). P. 116–127.
4. Biochemical characterization and identification of ice-nucleation-active (INA) willow pathogens by means of BIOLOG® MicroPlate, INA gene primers and PCR-based 16S rRNA-gene analyses / P. Nejad [et al.] // Journal of Plant Diseases and Protection. 2006. Vol. 113 (3). P. 97–106.
5. Measurement of ice nucleation-active bacteria on plants and in precipitation by quantitative PCR / T. C. J. Hill [et al.] // Applied and environmental microbiology. 2014. Vol. 80 (4). P. 1256–1267.
6. Nejad P., Ramstedt M. Presence of quorum-sensing-mediated gene regulation in pathogenic ice-nucleation-active (INA) bacteria // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2006. Vol. 22. P. 1373–1375.
7. Ice nucleation induced by *Pseudomonas syringae* / L. R. Maki [et al.] // Appl. Microbiol. 1974. Vol. 28. P. 456–459.
8. Army D. C., Lindow S. E., Upper C. D. Frost sensitivity of *Zea mays* increased by application of *Pseudomonas syringae* // Nature. 1976. Vol. 262. P. 282–284.
9. Molecular characterization of an ice nucleation protein variant (*inaQ*) from *Pseudomonas syringae* and the analysis of its transmembrane transport activity in *Escherichia coli* / Q. Li [et al.] // International journal of biological sciences. 2012. Vol. 8 (8). P. 1097–1108.
10. Evaluation of Ice Nucleation Activity (INA) and INA Gene Detection in the Bacteria Isolated from Pistachio Trees in Kerman Province, Iran / M. Rostami [et al.] // Journal of Nuts. 2018. Vol. 9 (2). P. 147–157.

11. Highly active and stable fungal ice nuclei are widespread among *Fusarium* species / A. T. Kunert [et al.] // *Biogeosciences*. 2019. Vol. 16 (23). P. 4647–4659.
12. Идентификация и функциональная аннотация патоген-индуцированных генов проростков сосны обыкновенной / Л. В. Мозжаровская [и др.] // Молекулярная и прикладная генетика. 2019. № 27. С. 70–79.

References

1. Waturangi D. E., Tjhen A. Isolation, characterization, and genetic diversity of ice nucleation active bacteria on various plants. *HAYATI Journal of Biosciences*, 2009, vol. 16 (2), pp. 54–58.
2. Lukas M., Schwidetzky R., Eufemio R. J., Bonn M., Meister K. Toward understanding bacterial ice nucleation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2022, vol. 126 (9), pp. 1861–1867.
3. Khosasih V., Prasetyo N., Sudianto E., Waturangi D. E. Prevalence and characterization of Ice Nucleation Active (INA) bacteria from rainwater in Indonesia. *BMC microbiology*, 2022, vol. 22 (1), pp. 116–127.
4. Nejad P., Ramstedt M., Granhall U., Roos S., McIvor I. Biochemical characterization and identification of ice-nucleation-active (INA) willow pathogens by means of BIOLOG® MicroPlate, INA gene primers and PCR-based 16S rRNA-gene analyses. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2006, vol. 113 (3), pp. 97–106.
5. Hill T. C. J., Moffett B. F., DeMott P. J., Georgakopoulos D. G., Stump W. L., Franc G. D. Measurement of ice nucleation-active bacteria on plants and in precipitation by quantitative PCR. *Applied and environmental microbiology*, 2014, vol. 80 (4), pp. 1256–1267.
6. Nejad P., Ramstedt M. Presence of quorum-sensing-mediated gene regulation in pathogenic ice-nucleation-active (INA) bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2006, vol. 22, pp. 1373–1375.
7. Maki L. R., Galyon E. L., Chang C. M., Galdwell D. R. Ice nucleation induced by *Pseudomonas syringae*. *Appl. Microbiol.*, 1974, vol. 28, pp. 456–459.
8. Arny D. C., Lindow S. E., Upper C. D. Frost sensitivity of *Zea mays* increased by application of *Pseudomonas syringae*. *Nature*, 1976, vol. 262, pp. 282–284.
9. Li Q., Yan Q., Chen J., He Y., Wang J., Zhang H., Li L. Molecular characterization of an ice nucleation protein variant (*inaQ*) from *Pseudomonas syringae* and the analysis of its transmembrane transport activity in *Escherichia coli*. *International journal of biological sciences*, 2012, vol. 8 (8), pp. 1097–1108.
10. Rostami M., Hasanzadeh N., Khodaygan P., Riahi Madvar A. Evaluation of Ice Nucleation Activity (INA) and INA Gene Detection in the Bacteria Isolated from Pistachio Trees in Kerman Province, Iran. *Journal of Nuts*, 2018, vol. 9 (2), pp. 147–157.
11. Kunert A. T., Pohlker M. L., Krevert C. S., Wieder C., Speth K. R., Hanson L. E., Frohlich-Nowoisky J. Highly active and stable fungal ice nuclei are widespread among *Fusarium* species. *Biogeosciences*, 2019, vol. 16 (23), pp. 4647–4659.
12. Mozharovskaya L. V., Panteleev S. V., Baranov O. Yu., Padutov V. E. Identification and functional annotation of pathogen-induced genes in Scots pine seedlings. *Molekularnaya i prikladnaya genetika* [Molecular and Applied Genetics], 2019, no. 27, pp. 70–79 (In Russian).

Информация об авторах

Ивашенко Любовь Олеговна – младший научный сотрудник кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь); соискатель по специальности «Лесные культуры, селекция и семеноводство» Институт леса НАН Беларуси (246001, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: lyba281997@mail.ru

Баранов Олег Юрьевич – доктор биологических наук, доцент, академик-секретарь отделения биологических наук. Национальная академия наук Беларуси (220072, г. Минск, пр-т Независимости, 66, Республика Беларусь); профессор кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: betula-belarus@mail.ru

Information about the authors

Ivashchenko Lyubov Olegovna – Junior Researcher, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); external doctorate student in the specialty “Forest crops, selection and seed production”. Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246001, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: lyba281997@mail.ru

Baranov Oleg Yurievich – DSc (Biological), Associate Professor, Academician-Secretary, the Department of Biological Sciences. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Professor, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: betula-belarus@mail.ru

Поступила 10.10.2023

УДК 513.864.2(076.5)

А. В. Козел, А. И. Блинцов, А. В. Хвасько, В. Н. Кухта
Белорусский государственный технологический университет

**ФОРМИРОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЛЕСНАЯ ЭНТОМОЛОГИЯ»
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ЗАЩИТА ЛЕСА»**

В статье приведен опыт наработки и применения учебно-методического комплекса по дисциплине «Лесная энтомология». Отмечена роль учебно-методического обеспечения в организации учебного процесса. Рассмотрены и проанализированы четыре основных блока структурных элементов, формирующих учебно-методическую базу дисциплины «Лесная энтомология»: учебно-программная документация, включающая учебный план, типовую и учебную программы, которые разрабатываются и обновляются по мере необходимости на основе образовательных стандартов новых поколений; учебные издания, не только имеющие историческую ценность, но и официально утвержденные и рекомендованные к использованию в образовательном процессе; средства обучения, состоящие из натуральных объектов, видео- и аудиозаписей, электронных презентаций; средства контроля качества усвоения учебного материала путем осуществления текущей, промежуточной и итоговой аттестаций. Представлен также ставший в настоящее время достаточно популярным опыт применения технологии дистанционного обучения в рамках разработанного электронного учебно-методического комплекса учебной дисциплины, включающего результаты новейших достижений науки и техники, использование современных методов и технических средств в образовательном процессе, организацию и методическое обеспечение самостоятельной работы студентов по данной дисциплине, позволяющих эффективно усваивать учебный материал.

Ключевые слова: методическое обеспечение, образовательный процесс, учебно-программная документация, средства обучения и контроля, дистанционное обучение, самостоятельная работа студентов.

Для цитирования: Козел А. В., Блинцов А. И., Хвасько А. В., Кухта В. Н. Формирование и использование учебно-методического комплекса по дисциплине «Лесная энтомология» для улучшения образовательного процесса по направлению «Защита леса» // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 87–91.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-11.

A. V. Kozel, A. I. Blintsov, A. V. Khvasko, V. N. Kukhta
Belarusian State Technological University

**FORMATION AND USE OF THE EDUCATIONAL AND METHODOLOGICAL
COMPLEX OF THE DISCIPLINE “FOREST ENTOMOLOGY” TO IMPROVE
THE EDUCATIONAL PROCESS IN THE DIRECTION
OF “FOREST PROTECTION”**

The article presents the experience of development and application of the educational and methodological complex on the discipline “Forest entomology”. The role of educational and methodological support in the organization of the educational process is noted. Four main blocks of structural elements forming the educational and methodological base of the discipline “Forest entomology” are considered and analyzed: educational and program documentation, including the academic plan and curriculum, which are developed and updated as necessary on the basis of educational standards of new generations; educational publications that have both historical value and officially approved and recommended for use in the educational process; teaching tools consisting of full-scale objects, video and audio recordings, electronic presentations and means of monitoring the quality of learning through the implementation of current, intermediate and final attestations. The experience of the distance learning technology application, which has now become quite popular, is also presented within the framework of the developed electronic educational and methodological complex of the discipline, that includes the results of the latest achievements of science and technology, the use of modern methods and technical means in the educational process, the organization and methodological support of independent work of students in this discipline, allowing to effectively assimilate educational material.

Keywords: methodological support, educational process, educational and program documentation, teaching and control tools, distance learning, independent work of students.

For citation: A. V. Kozel, A. I. Blintsov, A. V. Khvasko, V. N. Kukhta Formation and use of the educational and methodological complex of the discipline “Forest entomology” to improve the educational process in the direction of “Forest protection”. *Processing of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 87–91 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-11.

Введение. Разработка учебно-методического комплекса – весьма ответственная часть преподавательской работы. По сути, учебно-методический комплекс – это неотъемлемая часть системы образования, включающая планирование, разработку и создание оптимального комплекса учебно-методической документации и средств обучения, необходимых для эффективной организации учебного процесса в рамках времени и содержания, определяемых профессиональной образовательной программой. Учебно-методический комплекс должен быть эффективным средством не только обучения, но и самостоятельной учебной деятельности студента и контроля качества знаний.

Основная часть. Комплексное учебно-методическое обеспечение – это совокупность всех учебно-методических документов (планов, программ, методик, учебных пособий и т. д.), представляющих собой проект системного описания образовательного процесса, который впоследствии будет реализован на практике. Учебно-методическое обеспечение образовательного процесса должно отличаться разнообразием, соответствовать вариативным образовательным программам, разрабатываться для всех видов учебной деятельности студентов и отличаться комплексностью, особенно в условиях модернизации и стандартизации учебного процесса. Важность формирования учебно-методической базы по учебным дисциплинам обусловлена необходимостью не только совершенствования педагогического мастерства, но и оптимизации содержания профессионального образования будущих специалистов.

Для успешного восприятия учебного материала обучающимся нужны разнообразные учебно-методические средства, позволяющие овладеть необходимыми знаниями и научиться эффективно их применять, выполняя сложные задачи современного производства. Правильное наполнение и своевременное обновление учебно-методической базы позволяет существенно повысить качество самостоятельной работы учащихся, способствует формированию и развитию у них профессионально важных компетенций. Данная работа важна не меньше, чем прямое общение со студентами, а если она выполнена, это означает, что преподаватель отчетливо видит перед собой весь спланированный

процесс, каждый его этап, любое действие. Досконально проработанная учебно-методическая база – основа хорошо организованного и эффективного обучения. Главная цель учебно-методической базы состоит в том, чтобы обеспечить реализацию требований образовательного стандарта по соответствующей специальности. Она должна способствовать удовлетворению индивидуальных образовательных потребностей обучающихся и повышению эффективности образовательного процесса в целом. Конструирование и применение адекватной учебно-методической базы должно рассматриваться с точки зрения единого концептуального подхода, обусловленного содержанием и целями обучения [1–3].

Согласно учебному плану специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство», дисциплина «Лесная энтомология» является составной частью государственного компонента и входит в модуль «Защита леса». Цель изучения дисциплины «Лесная энтомология» заключается в профессиональной подготовке инженеров лесного хозяйства специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» в области защиты леса и защиты от повреждений вредителями заготовленных лесоматериалов.

Задачи дисциплины состоят в изучении наиболее распространенных и опасных вредителей леса, особенностей их биологии, экологии и вредоносности, санитарного и лесопатологического состояния насаждений, причин и закономерностей массовых размножений фитофагов, условий формирования их очагов, методов и средств защиты леса, природы устойчивости древесных растений к вредителям и путей повышения биологической устойчивости насаждений.

«Лесная энтомология» опирается на многие специальные дисциплины: по вопросам экологии лесных насекомых – на «Экологию с основами метеорологии», по применению энтомопатогенных микроорганизмов – на «Физиологию растений с основами микробиологии», по организации лесопатологического мониторинга – на «Лесную фитопатологию». Она необходима для изучения учебных дисциплин «Лесоводство», «Лесные культуры и защитное лесоразведение», «Лесоустройство» и дисциплин специализации 1-75 01 01 03 «Защита леса».

Структурные элементы, на основе которых формируется учебно-методическая база учебной дисциплины «Лесная энтомология», можно рассматривать

на трех взаимосвязанных уровнях: методологическом, методическом и практическом. При этом их целесообразно распределить на следующие блоки:

1) учебно-программная документация. Сюда можно отнести учебный план, типовую и учебную программы, которые разрабатываются по мере необходимости или с определенной периодичностью на основе образовательных стандартов новых поколений;

2) учебные издания – перечень учебных изданий, имеющих историческую ценность, официально утвержденных, рекомендованных либо допущенных к использованию в образовательном процессе по данной учебной дисциплине (учебники, учебные пособия, учебные наглядные пособия, практикумы). Список основной и дополнительной литературы представлен широким перечнем учебных и нормативно-технических изданий (21 источник литературы) в учебной программе дисциплины. В библиотеке БГТУ и на кафедре лесозащиты и древесиноведения имеется достаточное количество учебных изданий для успешного изучения материалов по дисциплине «Лесная энтомология»;

3) средства обучения (объемные – средства изображения натуральных объектов, натурные объекты; технические – видео-, аудиозаписи; электронные – презентации). По дисциплине «Лесная энтомология» в учебном процессе широко задействован наглядный материал по всем изучаемым темам. На кафедре имеются учебные фильмы о биоэкологических особенностях типичных представителей хозяйственно важных групп вредителей леса. Кроме того, при изучении таких тем дисциплины студентам раздается Атлас вредителей леса Беларуси, содержащий изображения всех стадий развития вредителя, наносимых повреждений и краткую информацию об их биоэкологических особенностях. Одним из наиболее важных и эффективных средств обучения по данной дисциплине является работа на лабораторных занятиях с натурными объектами – коллекциями насекомых, типами повреждений растений фитофагами. При этом энтомологическими сборами занимаются сами студенты в процессе прохождения учебной практики по «Лесной энтомологии» в Негорельском учебно-опытном лесхозе с целью закрепления полученных теоретических знаний. Учебная практика длится на протяжении шести дней в шестом семестре. Одной из задач данной практики является сбор и оформление коллекции насекомых, включающей не менее 40 их видов. Процесс энтомологических сборов весьма занятный и увлекательный, поэтому всегда интересен студентам. Таким образом, студенты на лабораторных занятиях обучаются по энтомологическим коллекциям, собранным студентами стар-

шего курса, а собранные уже ими коллекции используются студентами следующего за ними курса;

4) средства контроля (средства текущей, промежуточной и итоговой аттестации). Повышение качества учебного процесса в условиях сокращения количества аудиторных часов можно осуществлять, лишь управляя самостоятельной работой студентов, при постоянном контроле за качеством усвоения учебного материала. В учебном процессе формы контроля знаний классифицируются как текущая, промежуточная и итоговая. Текущий контроль позволяет в течение семестра установить «обратную связь» между студентами и преподавателем, фиксирует глубину усвоения учебного материала. Данный контроль осуществляется для четырех модулей, которые входят в учебную программу дисциплины. При текущем контроле упор делается на самостоятельную работу студентов, на возможность сочетания контроля преподавателя и самоконтроля. Это воспитывает у студента стремление к самостоятельной работе не только в сессию, но и в течение всего семестра. Организация текущего контроля реализуется с учетом принципов обратной связи, объективности, всесторонности, эффективности. Контроль в обучении является средством управления процессом усвоения знаний и умений. Он должен быть строго дозированным, корректным и не должен принижать личность обучаемого [4]. Основными формами текущего контроля являются контрольная работа, устный опрос, тестирование. Контрольные работы проводятся по следующим темам: 1) морфология и анатомия насекомых; 2) классификация насекомых, морфобиологическая характеристика отрядов и семейств; 3) морфобиологическая характеристика массовых хвое- и листогрызущих вредителей по фазам развития; 4) морфобиологическая характеристика стволовых вредителей по имаго и повреждениям (ходам). Итоговый контроль осуществляется путем проведения экзамена по дисциплине. По окончании летней учебной практики осуществляется контроль правильности определения собранных коллекций насекомых и образцов повреждений, защита отчетов по практике.

Современные проблемы в обществе, связанные с распространением коронавируса, потребовали изменения организации учебного процесса на всех ступенях образования. Востребованной технологией стало дистанционное обучение. Этот вид обучения стал возможен благодаря развитию компьютерных технологий, давших возможность хранить и передавать информацию с использованием сети Интернет [5]. Чтобы обеспечить непрерывность процесса обучения в условиях, когда дневное обучение фактически стало заочным, нами был создан электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по дисциплине

«Лесная энтомология». Разработанные учебно-методические материалы, разбитые на 4 раздела (теоретический, практический, вспомогательный и контроля знаний), были поделены на отдельные темы согласно учебной программе, подготовлены и выложены в формате PDF и других удобных для работы форматах (текстовых или форматах презентаций). Данные материалы полностью обеспечили учебный процесс. При разработке ЭУМК было обеспечено выполнение требований образовательного стандарта: своевременное отражение результатов достижений науки и техники, последовательное изложение учебного материала, использование современных методов и технических средств в учебном процессе, организация и методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Опыт работы в таком формате, несмотря на некоторую его экстремальность, является ценным для дальнейшего развития технологий обучения, а возникающие иногда проблемы представляются вполне решаемыми [6].

Заключение. Все разработанные и предложенные структурные элементы сформированного и используемого учебно-методического комплекса, на основе которого обеспечивается реализация требований образовательного стандарта, отражают современный уровень развития дисциплины, предусматривают последовательное изложение учебного материала, использование современных методов и технических средств интенсификации учебного процесса. Это позволит студентам успешно усваивать учебный материал и получать навыки применения его на практике, что в результате будет способствовать повышению разнообразия и эффективности образовательного процесса и удовлетворению индивидуальных образовательных потребностей будущих специалистов лесного хозяйства в области учебной дисциплины «Лесная энтомология», входящей в модуль «Защита леса» государственного компонента теоретического обучения студентов.

Список литературы

1. Тимофеева И. Е., Завадская С. В. Разработка структурных элементов учебно-методических комплексов в учреждениях профессионального образования // Репозиторий БГПУ. URL: <http://elib.bspu.by/handle/doc/37726> (дата обращения: 25.11.2021).
2. Удотов А. С. Создание учебно-методической базы данных как фактор повышения качества учебного процесса // Сибирский педагогический журнал. 2007. № 9. С. 82–89.
3. Андреев С. Ф., Сталович Н. С. Разнообразие форм текущего контроля знаний как средство активизации учебной деятельности студента // Проблемы современного образования в техническом вузе: материалы III Респ. науч.-метод. конф., Гомель, 31 окт. – 1 нояб. 2013 г. Гомель, 2013. С. 20–21.
4. Жестокова Ю. Е. Методические указания по формированию комплексного учебно-методического обеспечения. Ярославль: ЯТЭК, 2015. 14 с.
5. Гиль В. И., Исаченков В. С., Рашупкин С. В. Опыт преподавания дисциплины «Инженерная и машинная графика» в дистанционном формате // Проблемы и основные направления развития высшего технического образования: материалы XXIV Респ. науч.-метод. конф., Минск, 25–26 марта 2021 г. Минск, 2021. С. 112–113.
6. Применение информационных технологий в учебном процессе / Д. С. Карпович [и др.] // Проблемы и основные направления развития высшего технического образования: материалы XXIV Респ. науч.-метод. конф., Минск, 25–26 марта 2021 г. Минск, 2021. С. 152–154.

References

1. Timofeeva I. E., Zavadskaya S. V. Development of structural elements of educational and methodical complexes in vocational education institutions. Available at: <http://elib.bspu.by/handle/doc/37726> (accessed 25.11.2021) (In Russian).
2. Udotov A. S. Creation of an educational and methodological database as a factor in improving the quality of the educational process. *Sibirskiy pedagogicheskiy zhurnal* [Siberian Pedagogical Journal], 2007, no. 9, pp. 82–89 (In Russian).
3. Andreev S. F., Stalovich N. S. Variety of forms of current knowledge control as a means of activating student's educational activity. *Problemy sovremennogo obrazovaniya v tekhnicheskoy vuzovskoy sredy: materialy III Respublikanskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Problems of modern education in a technical university: materials of III Republic scientific methodological conference]. Homel, 2013, pp. 20–21 (In Russian).
4. Zhestokova Yu. E. *Metodicheskiye ukazaniya po formirovaniyu kompleksnogo uchebno-metodicheskogo obespecheniya* [Methodological guidelines for the formation of comprehensive educational and methodological support], Yaroslavl YATEK Publ., 2015. 14 p. (In Russian).
5. Gil V. I., Isachenkov V. S., Raschupkin S. V. Experience of teaching the discipline “Engineering and machine graphics” in a remote format. *Problemy i osnovnyye napravleniya razvitiya vysshego tekhnicheskogo obrazovaniya: materialy XXIV Respublikanskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Problems and

main directions of development of higher technical education: materials of XXIV Republic scientific methodological conference]. Minsk, 2021, pp. 112–113 (In Russian).

6. Karpovich D. S., Kobrinets V. P., Korovkina N. P., Pustovalova N. N. Application of information technologies in the educational process. *Problemy i osnovnyye napravleniya razvitiya vysshego tekhnicheskogo obrazovaniya: materyaly XXIV Respublikanskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Problems and main directions of development of higher technical education: materials of XXIV Republic scientific methodological conference]. Minsk, 2021, pp. 152–154 (In Russian).

Информация об авторах

Козел Александр Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kozel@belstu.by

Блинцов Александр Иванович – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: blintsov@belstu.by

Хвасько Андрей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: khvasko@belstu.by

Кухта Валерий Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kukhta@belstu.by

Information about the authors

Kozel Aleksandr Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kozel@belstu.by

Blintsov Alexander Ivanovich – PhD (Biology), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: blintsov@belstu.by

Khvasko Andrey Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khvasko@belstu.by

Kukhta Valery Nikolaevich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kukhta@belstu.by

Поступила 12.10.2023

УДК 595.782:632.782 (476)

Н. В. Синчук, В. Н. Тихомиров, С. В. Буга

Белорусский государственный университет

**ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МОЛИ-ПЕСТРЯНКИ *PHYLLONORYCTER POPULIFOLIELLA* (TREITSCHKE, 1833) В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ:
РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КОЛЛЕКЦИИ ТОПОЛЕЙ (*POPULUS* L.)
ГЕРБАРИЯ БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Минирующая моль *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke), представитель семейства молей-пестрянок (Lepidoptera: Gracillariidae), в условиях Беларуси и других регионов Евразии является вредителем тополей, дающим вспышки массового размножения в зеленых насаждениях. В Гербарии Белорусского государственного университета (MSKU) хранится 276 гербарных листов с образцами видов и форм тополей (*Populus* L.), собранных в период с 1948 г. в разных регионах Беларуси. Просмотр коллекции выявил присутствие мин личинок нижнесторонней тополевой минирующей моли на листовых пластинках 49 образцов тополя. В образцах тополей секции *Populus* отсутствовали листья, поврежденные личинками *Ph. populifoliella*. Минируемые листья присутствовали в сборах тополей секций *Aigeiros* и *Tacamahaca*, а также были многочисленны в сборах межсекционных гибридов (nothosect. *Tacageiros*). Впервые для Беларуси выявлены повреждения личинками *Ph. populifoliella* листовых пластинок *Populus maximowiczii*, а также гибридов *Populus* × *rasumowskiana*, *Populus* × 'Lettland', *Populus laurifolia* × *Populus balsamifera*, *Populus maximowiczii* × *Populus* × *berolinensis*, *Populus suaveolens* × *Populus balsamifera*. Высокое относительное число сборов с поврежденными листовыми пластинками тополей берлинского (*Populus* × *berolinensis*) и Разумовского (*Populus* × *rasumowskiana*) соответствует наблюдаемой высокой повреждаемости их в зеленых насаждениях.

Ключевые слова: вредители декоративных растений, минирующие филлофаги, моли-пестрянки, нижнесторонняя тополевая минирующая моль.

Для цитирования: Синчук Н. В., Тихомиров В. Н., Буга С. В. Трофические связи моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) в условиях Беларуси: результаты анализа коллекции тополей (*Populus* L.) Гербария Белорусского государственного университета // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 92–98.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-12.

N. Sinchuk, V. Tikhomirov, S. Buga

Belarusian State University

**TROPHIC ASSOCIATIONS OF THE POPLAR LEAF MINER, *PHYLLONORYCTER POPULIFOLIELLA* (TREITSCHKE, 1833), IN BELARUS: RESULTS
OF AN ANALYSIS OF POPLAR (*POPULUS* L.) COLLECTION
OF THE HERBARIUM OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY**

The poplar leaf-miner, *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke) (Lepidoptera: Gracillariidae), in Belarus and some other regions of Eurasia is a dangerous pest of poplars, having population outbreaks in green areas. In the Herbarium of the Belarusian State University (MSKU) are stored 276 herbarium sheets with samples of species and forms of poplars (*Populus* L.), collected since 1948 in different regions of Belarus. A review of the collection revealed the presence of the specific mines of the poplar leaf-miner larvae on the leaf blades of 49 poplar samples. The samples of the white poplars (sect. *Populus*) did not contain leaves damaged by *Ph. populifoliella* larvae. Mined leaves were present in collections of the black poplars (sect. *Aigeiros*) and the balsam poplars (sect. *Tacamahaca*), and the ones were numerous in collections of intersectional hybrids (nothosect. *Tacageiros*). For the first time in Belarus, damage by *Ph. populifoliella* larvae has been registered of the leaf blades of *Populus maximowiczii*, as well as hybrids *Populus* × *rasumowskiana*, *Populus* × 'Lettland', *Populus laurifolia* × *Populus balsamifera*, *Populus maximowiczii* × *Populus* × *berolinensis*, *Populus suaveolens* × *Populus balsamifera*. The high occurrence of samples of *P.* × *berolinensis* and *P.* × *rasumowskiana* with mined leaf blades corresponds well with observed high damage level of them by poplar leaf-miner in green areas.

Keywords: leaf-mining insects, pests of ornamental plants, Gracillariidae, poplar leaf-miner.

For citation: Sinchuk N., Tikhomirov V., Buga S. Trophic associations of the poplar leaf miner, *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833), in Belarus: results of an analysis of poplar (*Populus* L.) collection of the Herbarium of the Belarusian State University. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 92–98 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-12.

Введение. Тополевая нижнесторонняя моль-пестрянка (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke)) – представитель семейства молей-пестрянок (Lepidoptera: Gracillariidae), описанный в 1833 г. из Германии. В последующем этот листовой минер отмечался в 1846 г. на территории Австрии и Польши [1], в 1893 г. вспышка его массового размножения произошла в одном из регионов Франции. В Восточной Европе массовое размножение *Ph. populifoliella* описано в 1898 г. в Харькове, а позднее, в 1913 г., на Урале [2]. В Московском регионе присутствие тополовой моли констатируется с 1927 г. [3]. На территории Республики Беларусь вспышка массового размножения тополовой моли-пестрянки впервые была зарегистрирована в 1960 г. [4]. В настоящее время *Ph. populifoliella* широко распространена в Палеарктике, по крайней мере в тех регионах, где произрастают представители рода *Populus* L. Вид эвритопен, однако высокая популяционная плотность минера характерна для посадок тополей в условиях населенных пунктов. Здесь очаги массового размножения этого фитофага могут существовать на протяжении десятилетия и более, в ряде работ хронические очаги тополовой нижнесторонней моли-пестрянки охарактеризованы как постоянные [5].

Ph. populifoliella принадлежит к числу минирующих фитофагов, личинки обитают в камерах-минах, которые они формируют преимущественно на нижней стороне листовых пластинок тополей (*Populus* L.; Salicaceae). Выяснение круга повреждаемых растений в условиях того или иного региона современного ареала не только представляет практический интерес (какие культивируемые растения повреждаются и в какой мере?), но и позволяет расширить знания трофоэкологии вида, выяснить его статус в региональной фауне (аборигенный или чужеродный?). Данных по географическому распространению и трофическим связям *Ph. populifoliella*, несмотря на наличие соответствующих публикаций [6, 7], в настоящее время явно недостаточно для обоснованного заключения о происхождении (естественно исторически сформировавшемся ареале) этого вида, что позволяет относить его к числу криптогенных.

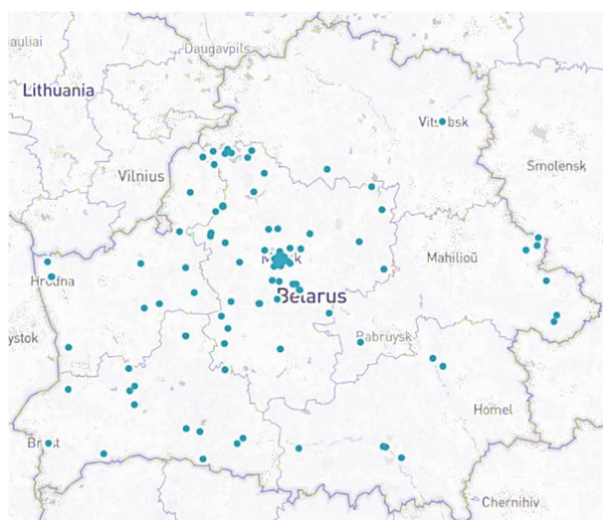
Трофические связи специализированных фитофагов в отдельных регионах определяются как кругом произрастающих здесь, пригодных для их питания и развития растений, так и спецификой природно-климатических условий в целом. В Беларуси исследования спектра кормовых растений нижнесторонней тополовой минирующей моли до сих пор носили ограниченный характер либо в географическом аспекте, либо в аспекте охвата представленных в посадках видов и форм тополей. Сведения о повреждении

Ph. populifoliella тополей канадского (*P. × canadensis* Moench) и бальзамического (*Populus balsamifera* L.) присутствуют в уже упомянутой монографии С. В. Горленко и Н. А. Панько [4]. В рамках выполнявшихся в начале 10-х годов текущего столетия исследований повреждаемости нижнесторонней тополовой молью-пестрянкой исследуемые тополя дифференцировались на 2 группы: к первой отнесены виды и формы с широкотреугольной или треугольно-ромбической формой листовых пластинок (*Populus × canadensis* Moench (в работе фигурирует как *Populus × euramerica* (Dode) Guinier + *Populus deltoides* Marsh. и *Populus nigra* L., т. е. представители *Populus* sect. *Aigeiros* Duby), ко второй – с широкояйцевидными, заостренно-яйцевидными и удлинненными листовыми пластинками (*Populus trichocarpa* Torr., *Populus longifolia* Fisch., *Populus suaveolens* Fisch., *Populus laurifolia* Ledeb.), *Populus simonii* Carr., *Populus balsamifera* L. (представители *Populus* sect. *Tacamahaca* Spach) и их гибриды) [8]. В целом остается констатировать отсутствие четкого видения спектра трофических связей *Ph. populifoliella* в условиях Беларуси.

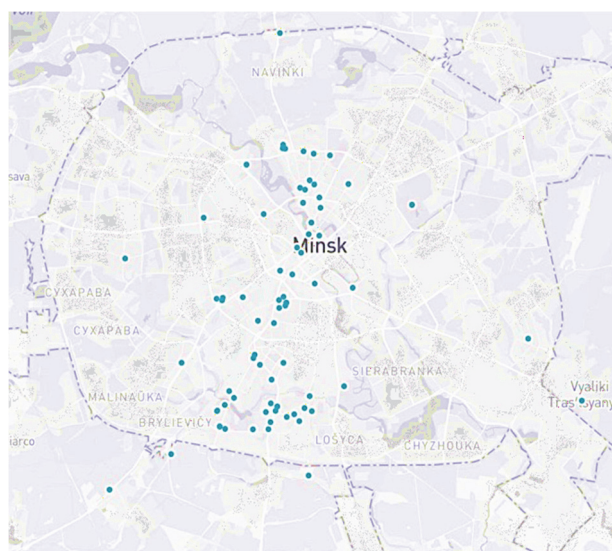
Нижнесторонняя тополовая моль-пестрянка принадлежит к числу массовых видов, в конце сезона вегетации этим минером может быть заселено большинство листовых пластинок повреждаемых видов и форм тополей. Это создает предпосылки для сбора в целях гербаризации минированных фитофагами листьев в отсутствие или при малодоступности неповрежденных. Данное обстоятельство представляет возможность анализировать географию регистраций и таксономическую принадлежность поврежденных растений по гербарным сборам. Примером успешного использования данного подхода является обнаружение повреждений (мин) с личинками каштановой минирующей моли (*Cameraria ochridella* Deschka & Dimić, 1986) в гербарных образцах, коллектированных в период до первоописания этого фитофага [9]. В Гербарии Белорусского государственного университета помимо прочих хранятся коллекции тополей, выполненные в рамках исследований по проекту «Тополя Минска и их консортивные связи», которые и послужили материалом для установления трофических связей *Ph. Populifoliella* в условиях Беларуси.

Основная часть. В ходе исследований рассмотрены гербарные сборы рода *Populus* L. с территории Республики Беларусь фондовых коллекций Гербария Белорусского государственного университета общим объемом 276 листов.

Географию сборов на территории Беларуси и г. Минска иллюстрирует карта на рис. 1. Регистрационные данные сборов представлены в датасете.



Беларусь



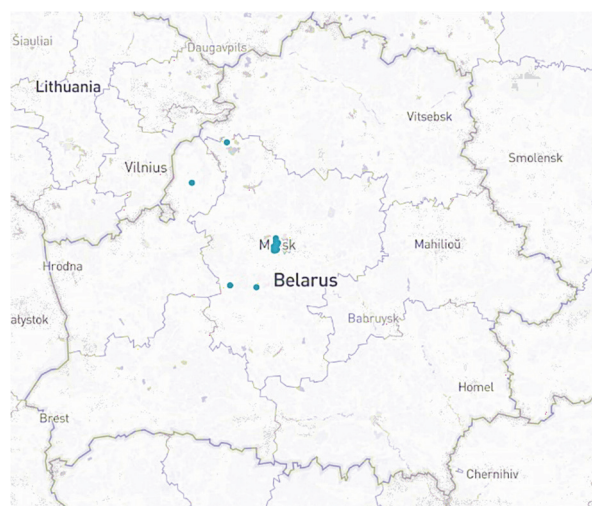
Минск

Рис. 1. География охваченных исследованиями сборов тополей (*Populus* L.) коллекции Гербария Белорусского государственного университета

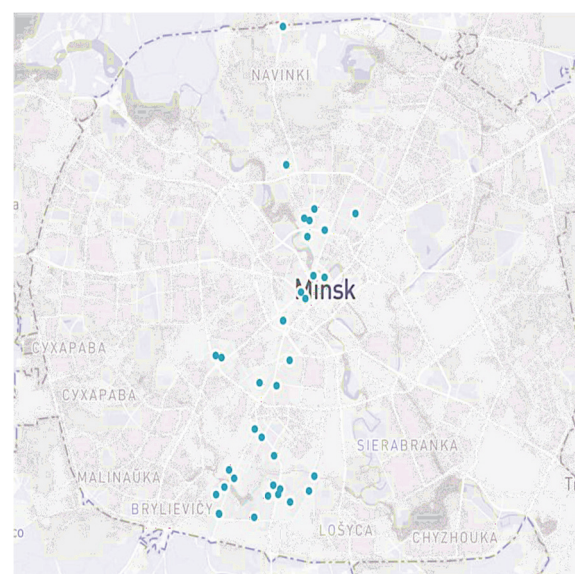
Мины нижнесторонней листовой минирующей моли видоспецифичны. Идентификация данного минера по повреждениям основана на определительных ключах специализированных порталов <https://bladmineerders.nl>, www.gracillariidae.net [10, 11], а также ряда публикаций [12–14].

Исследования выполнены в рамках проекта «Трофэкология личинок тополевой моли-пестрянки: сравнительная характеристика повреждений (мин) на различных видах и формах тополей» (номер госрегистрации НИР 20230703), поддержанного грантом Министерства образования Республики Беларусь.

Географическое положение мест произрастания тополей, поврежденных нижнесторонней тополевой молю-пестрянкой, что было констатировано по результатам просмотра гербарных сборов, представлено на рис. 2.



Беларусь



Минск

Рис. 2. География сборов поврежденных тополевой молю-пестрянкой экземпляров тополей коллекции Гербария Белорусского государственного университета

Мины *Ph. populifoliella* отмечены на листовых пластинках тополей из ограниченного числа местопроизрастаний, а именно в городах Минске и Узде Центрального региона Беларуси, а также на ст. Ошмяны и в к. п. Нарочь на северо-западе страны. В результате характер распределения точек сбора образцов тополей и характер распределения точек местопроизрастания растений, которые оказались повреждены минером, разительно отличаются, тогда как для Минска они схожи.

В анализируемой выборке, структуру которой отражают данные таблицы, представлены сборы по меньшей мере 22 видов и форм (включая гибридные) тополей.

Ранее в качестве кормовых растений нижнесторонней тополевой минирующей моли в

условиях Беларуси были отмечены: *P. × berolinensis* [15], *P. × canadensis*, *P. nigra* var. *italica*, *P. simonii*, *P. alba*, *P. balsamifera*, *P. longifolia* [6]. По результатам выполненной обработки гербарных сборов впервые для Беларуси выявлены повреждения личинками *Ph. populifoliella* листовых пластинок *P. maximowiczii*, а также гибридов *P. × rasumowskiana*, *P. × 'Lettland'*, *P. laurifolia × P. balsamifera*, *P. maximowiczii × P. × berolinensis*, *P. suaveolens × P. balsamifera*.

В гербарных сборах отсутствовали образцы белых тополей (sect. *Populus*) с поврежденными минером листовыми пластинками, что вполне ожидаемо, поскольку в ходе наших исследований экологии моли-пестрянки и обследований растений, произрастающих в разных регионах Беларуси, регистрировались лишь единичные их повреждения данным филлобионтом. Поврежденные личинками *Ph. populifoliella* листовые пластинки присутствовали в гербарных сборах

тополей секции *Aigeiros*, а также многих представителей секции *Tacamahaca*, однако незначительные объемы выборок не позволяют выдвигать предположения о сравнительных уровнях повреждаемости бальзамических тополей данным фитофагом. При этом вполне очевидна высокая повреждаемость межсекционных гибридов (nothosect. *Tacageiros*). Высокое относительное количество гербарных сборов с минерованными личинками нижнесторонней тополевой моли-пестрянки листовых пластинок тополей берлинского (*P. × berolinensis*) и Разумовского (*P. × rasumowskiana*), которые являются гибридными формами, полученными скрещиванием *P. laurifolia × P. nigra*. И действительно, в городах Беларуси тополь берлинский сильно повреждается нижнесторонней тополевой минирующей молью [15], в его насаждениях формируются очаги массового размножения вредителя.

Структура анализируемой на предмет наличия мин личинок нижнесторонней тополевой минирующей моли (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke)) выборки сборов тополей (*Populus* L.) Гербария Белорусского государственного университета

Вид / форма / гибрид	Количество образцов		
	общее, гербарных листов	с повреждениями, гербарных листов	относительное количество образцов с повреждениями, %
<i>Populus</i> sect. <i>Populus</i>	78	—	—
<i>Populus tremula</i> L.	36	—	—
<i>Populus alba</i> L.	39	—	—
<i>Populus bolleana</i> Lauche	3	—	—
<i>Populus</i> sect. <i>Aigeiros</i> Duby	39	5	12,82
<i>Populus nigra</i> L.	10	1	10,00
<i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i> (Moench.) Kochne	3	—	—
<i>Populus deltoides</i> W. Bartram ex Marshall	2	—	—
<i>Populus × canadensis</i> Moench	24	4	16,67
<i>Populus</i> sect. <i>Tacamahaca</i> Spach	55	7	12,73
<i>Populus balsamifera</i> L.	10	—	—
<i>Populus laurifolia</i> Ledeb.	1	—	—
<i>Populus longifolia</i> Fisch.	6	—	—
<i>Populus maximowiczii</i> A. Henry	2	1	50,00
<i>Populus simonii</i> Carriere	23	2	8,70
<i>Populus suaveolens</i> Fisch.	4	—	—
<i>Populus trichocarpa</i> Torr. et Gray ex Hook	2	—	—
<i>Populus laurifolia × Populus balsamifera</i>	1	1	100,00
<i>Populus suaveolens × Populus balsamifera</i>	6	3	50,00
<i>Populus</i> nothosect. <i>Tacageiros</i> Dolat. & Ziel.	104	37	35,58
<i>Populus × berolinensis</i> K. Koch	34	17	50,00
<i>Populus × jackii</i> Sarg.	2	—	—
<i>Populus × rasumowskiana</i> R. I. Schrod. ex Dippel.	23	11	47,83
<i>Populus × 'Lettland'</i>	24	4	16,67
<i>Populus maximowiczii × Populus × berolinensis</i>	5	2	40,00
<i>Populus nigra × Populus simonii</i> (?)	1	—	—
Неопределенные межсекционные гибриды	15	3	20,00

Таким образом, обращение к гербарным коллекциям позволило дополнить список известных для региона кормовых растений, поврежденных нижнесторонней тополевой молью-пестрянкой, и расширить географию регистраций данного фитофага и его неочевидное географическое распространение, а также дополнить имеющиеся представления об экологии этого опасного вредителя зеленых насаждений, дающего вспышки массового размножения в Беларуси и других регионах Евразии.

Заключение. Анализ гербарных коллекций позволяет получить дополнительную информацию о круге кормовых растений фитофагов, надежно идентифицируемых по наносимым повреждениям. Просмотр гербарных сборов тополей (*Populus* L.), коллектированных с 1948 г. во всех районах интродукции древесных растений и лесорастительных подзонах Беларуси (всего 276 гербарных листов), хранящихся в фондах Гербария Белорусского государственного университета, позволил выявить 22 вида и формы тополей, которые повреждаются личинками нижнесторонней тополевой минирующей моли (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)). Мины личинок этой моли-пестрянки отмечены на листовых пластинках образцов, собранных в

1997–2002 гг. (всего 49 гербарных листов), в период всплеска вспышек массового размножения данного вредителя. Впервые для Беларуси выявлены повреждения личинками *Ph. populifoliella* листовых пластинок *P. maximowiczii*, а также гибридов *P. × rasumowskiana*, *P. × 'Lettland'*, *P. laurifolia × P. balsamifera*, *P. maximowiczii × P. × berolinensis*, *P. suaveolens × P. balsamifera*. Среди гербарных сборов отсутствовали образцы с поврежденными личинками данного минера листовыми пластинками белых тополей (sect. *Populus*), были немногочисленны – для черных (sect. *Aigeiros*) и бальзамических (sect. *Tacamahaca*) тополей и многочисленны для межсекционных гибридов (nothosect. *Tacageiros*). Констатируется высокое относительное количество сборов, поврежденных личинками листовых пластинок для тополей берлинского (*P. × berolinensis*) и Разумовского (*P. × rasumowskiana*), которые считаются формами, полученными в результате гибридизации тополей лавровлистного (*P. laurifolia*) и черного (*P. nigra*).

Результаты исследований позволили дополнить список тополей, повреждаемых нижнесторонней тополевой минирующей молью в условиях Беларуси и имеют практическую значимость для разработки методов контроля этого опасного вредителя посадок тополей.

Список литературы

1. Селиховкин А. В., Денисова Н. В., Тимофеева Ю. А. Динамика плотности популяций минирующих микрочешуекрылых в Санкт-Петербурге // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. № 200. С. 148–159.
2. Флоров Д. Н. Тополевая моль – вредитель зеленых насаждений г. Иркутска // Труды ИГУ. 1948. Т. 3, № 2. С. 1–19.
3. Белов Д. А. Вспышки массового размножения листогрызущих насекомых и минеров и характеристика их очагов в Москве // Лесной вестник. 2000. № 6. С. 124–131.
4. Горленко С. В., Панько Н. А. Вредители и болезни интродуцированных растений / под ред. Н. А. Дорожкина. Минск: Наука и техника, 1967. 143 с.
5. Ермолаев И. В. Экологические механизмы непериодической популяционной волны на примере тополевой моли-пестрянки – *Phyllonorycter populifoliella* (Lepidoptera, Gracillariidae) // Журнал общей биологии. 2019. Т. 80, № 6. С. 451–476.
6. Синчук О. В., Трещева А. Б. Спектр кормовых растений тополевой моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) в условиях Беларуси и других регионах мира // Биологическая осень 2017 (к Году науки в Беларуси). 2017. С. 281–282.
7. Трофическая специализация тополевой моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae) / И. В. Ермолаев [и др.] // Энтомологическое обозрение. 2020. Т. 99, № 2. С. 271–288.
8. Чумаков Л. С., Лозинская О. В. Экологическая оценка поражения насаждений тополя тополевой минирующей молью (*Lithocolletis populifoliella*) в городе Минске // Экологический вестник. 2015. Т. 31, № 1. С. 94–101.
9. Tracking origins of invasive herbivores through herbaria and archival DNA: the case of the horse-chestnut leaf miner / D. C. Lees [et al.] // Frontiers in Ecology and the Environment. 2011. Vol. 9, no. 6, pp. 322–328.
10. Ellis W. N. *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) // Leafminers and plant galls of Europe. URL: <https://bladmineers.nl/parasites/animalia/arthropoda/insecta/lepidoptera/ditrysia/gracillarioidea/gracillariidae/lithocolletinae/phyllonorycter/phyllonorycter-populifoliella/> (date of access: 30.09.2023).
11. A Linnaeus NG interactive key to the Lithocolletinae of North-West Europe aimed at accelerating the accumulation of reliable biodiversity data (Lepidoptera, Gracillariidae) / C. Doorewaard [et al.] // Naturalis Biodiversity Center. URL: https://lithocolletinae.linnaeus.naturalis.nl/_ng/app/views/matrixkey/index.php?epi=9 (date of access: 30.09.2023).

12. Бондаренко Е. А. Массовое размножение тополевой нижнесторонней моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Lepidoptera, Gracillariidae) на территории г. Санкт-Петербурга // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2008. № 182. С. 45–55.

13. Davis D. R., Deschka G. Biology and systematics of the North American *Phyllonorycter* leafminers on Salicaceae, with a synoptic catalogue of the Palearctic species (Lepidoptera: Gracillariidae) // Smithsonian Contributions to Zoology. 2001. № 614. P. 1–89.

14. Селиховкин А. В., Алексеев А. С., Лаутнер Э. М. Особенности популяционной динамики тополевой нижнесторонней моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Gracillariidae) // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2010. № 192. С. 220–235.

15. Синчук Н. В. Характер поврежденности листовых пластинок тополя *Populus × berolinensis* личинками тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella*) в г. Витебске в 2021 г. // Итоги и перспективы развития энтомологии в Восточной Европе: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти Александра Михайловича Терешкина (1953–2020), Минск, 1–3 дек. 2021 г. / отв. ред. О. В. Прищепчик, Е. В. Маковецкая. Минск, 2021. С. 339–345.

References

1. Selikhovkin A. V., Denisova N. V., Timofeeva YU. A. Dynamics of population density of mining microlepidoptera in St. Petersburg. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy], 2012, no. 200, pp. 148–159 (In Russian).

2. Florov D. N. Poplar moth is a pest of green spaces in Irkutsk. *Trudy IGU* [Proceedings of ISU], 1948, vol. 3, no. 2, pp. 1–19 (In Russian).

3. Belov D. A. Outbreaks of mass reproduction of leaf-eating insects and leaf miners and characteristics of their foci in Moscow. *Lesnoy vestnik* [Forestry bulletin], 2000, no. 6, pp. 124–131 (In Russian).

4. Gorlenko S. V., Pan'ko N. A. *Vrediteli i bolezni introdutsirovannykh rasteniy* [Pests and diseases of introduced plants]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1967. 143 p. (In Russian).

5. Ermolaev I. V. Ecological mechanisms of nonperiodical population wave: a case study of the poplar leafminer – *Phyllonorycter populifoliella* (Lepidoptera, Gracillariidae). *Zhurnal obshchey biologii* [Biology Bulletin Reviews], 2019, vol. 80, no. 6, pp. 451–476 (In Russian).

6. Sinchuk O. V., Treshcheva A. B. Spectrum of fodder plants *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) in conditions of Belarus and other regions of the world. *Biologicheskaya osen' 2017 (k Godu nauki v Belarusi)* [Biological autumn 2017 (for the Year of Science in Belarus)], 2017, pp. 281–282 (In Russian).

7. Ermolaev I. V., Rubleva E. A., Rysin S. L., Kozhenkova A. A., Ermolaeva M. V. Trophic specialization of the poplar leafminer *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) (Lepidoptera, Gracillariidae). *Entomologicheskoye obozreniye* [Entomological Review], 2020, vol. 100, pp. 287–300 (In Russian).

8. Chumakov L. S., Lozinskaya O. V. Ecological evaluation of poplar plantings' affection by mine moth (*Lithocolletis populifoliella* Tr.) in Minsk. *Ekologicheskii vestnik* [Ecological Bulletin], 2015, vol. 31, no. 1, pp. 94–101 (In Russian).

9. Lees D. C., Lack H. W., Rougerie R., Hernandez-Lopez A., Raus T., Avtzis N. D., Lopez-Vaamonde C. Tracking origins of invasive herbivores through herbaria and archival DNA: the case of the horse-chestnut leaf miner. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, vol. 9, no. 6, pp. 322–328.

10. Ellis W. N. *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833). Available at: <https://bladmineers.nl/parasites/animalia/arthropoda/insecta/lepidoptera/ditrysia/gracillarioidea/gracillariidae/lithocolletinae/phyllonorycter/phyllonorycter-populifoliella/> (accessed 30.09.2023).

11. Doorenweerd C., van Haren M. M., Schermer M., Pieterse S., van Nieuwerkerken E. J. A Linnaeus NG interactive key to the Lithocolletinae of North-West Europe aimed at accelerating the accumulation of reliable biodiversity data (Lepidoptera, Gracillariidae). Available at: https://lithocolletinae.linnaeus.naturalis.nl/linnaeus_ng/app/views/matrixkey/index.php?epi=9 (accessed 30.09.2023).

12. Bondarenko E. A. Outbreak of *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Lepidoptera, Gracillariidae) in Saint-Petersburg. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy], 2008, no. 182, pp. 45–55 (In Russian).

13. Davis D. R., Deschka G. Biology and systematics of the North American *Phyllonorycter* leafminers on Salicaceae, with a synoptic catalogue of the Palearctic species (Lepidoptera: Gracillariidae). *Smithsonian Contributions to Zoology*, 2001, no. 614, pp. 1–89.

14. Selikhovkin A. V., Alekseev A. S., Lautner E. M. Peculiarities of the population dynamics of the poplar lowersided mottled moth *Phyllonorycter populifoliella* Tr. (Gracillariidae). *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy], 2010, no. 192, pp. 220–235 (In Russian).

15. Sinchuk N. V. Damage to the leaf blades of *Populus × berolinensis* by larvae of poplar moth *Phyl- lonorycter populifoliella* in Vitebsk in 2021. *Itogi i perspektivy razvitiya entomologii v Vostochnoy Evrope: sbornik statey IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati Aleksan- dra Mikhaylovicha Tereshkina (1953–2020)* [Results and prospects of entomology development in Eastern Europe: collection of articles of the IV International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Alexander Mikhailovich Tereshkin (1953–2020)]. Minsk, 2021, pp. 339–345 (In Russian).

Информация об авторах

Синчук Надежда Владимировна – аспирант кафедры зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: n.v.sinchuk@gmail.com

Тихомиров Валерий Николаевич – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ботаники. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: Tikhomirov_V_N@list.ru

Буга Сергей Владимирович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: sergey.buga@gmail.com

Information about the authors

Sinchuk Nadzeya – PhD student, the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.v.sinchuk@gmail.com

Tikhomirov Valery – PhD (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Botany. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Tikhomirov_V_N@list.ru

Buga Sergey – DSc (Biology), Professor, Head of the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.buga@gmail.com

Поступила 15.10.2023

УДК 630*221.02

А. В. Хвасько, Ю. А. Ларина, Г. А. Волченкова, В. Г. Корзон

Белорусский государственный технологический университет

**НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ ДУБА,
ПОРАЖЕННОЙ ГНИЛЯМИ**

В исследовании рассматривались вопросы оценки скорости деградации древесины дуба, пораженной гнилями, и влияния их на физико-механические свойства заготавливаемых круглых лесоматериалов. В статье приведены результаты изменения физико-механических свойств древесины дуба, поврежденной желтовато-белой полосатой (ложный дубовый трутовик – *Phellinus robustus* Karst.) и красно-бурой призматической (серно-желтый трутовик – *Laetiporus sulphureus* Bond.) ядровыми гнилями. Отмечено, что стволовые гнили дуба, вызываемые ложным дубовым и серно-желтым трутовиками, значительно ухудшают как количественные, так и качественные свойства древесины дуба только при развитии на дереве в течение нескольких лет до момента перехода деревьев в категорию старого сухостоя.

Выявлено, что плотность древесины свежего и старого сухостоя по сравнению с древесиной без признаков ослабления снижается на 3,2 и 6,6% соответственно, предел прочности при сжатии вдоль волокон – на 10,3 и 15,0%, предел прочности при сжатии поперек волокон – на 12,1 и 15,5%, предел прочности при статическом изгибе – на 9,8 и 10,5%, твердость – на 8,8 и 9,9%, ударная вязкость – на 9,3 и 10,4% соответственно. Статистическая оценка результатов исследований показала, что установленные различия между показателями древесины разных категорий состояния достоверно значимы.

Ключевые слова: дуб, стволовые гнили, категории состояния, плотность древесины, механические свойства.

Для цитирования: Хвасько А. В., Ларина Ю. А., Волченкова Г. А., Корзон В. Г. Некоторые физико-механические свойства древесины дуба, пораженной гнилями // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 99–104. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-13.

A. V. Khvasko, Yu. A. Larina, G. A. Volchenkova, V. G. Korzon

Belarusian State Technological University

**SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF OAK WOOD
AFFECTED BY ROT**

The study examined the issues of assessing the rate of degradation of oak wood affected by rot, and their influence on the physical and mechanical properties of harvested round timber. The article presents the results of changes in the physical and mechanical properties of oak wood damaged by yellowish-white striped (causing agent – *Phellinus robustus* Karst.) and red-brown prismatic (*Laetiporus sulphureus* Bond.) heart rots. It has been noted that oak stem rot, caused by *Ph. robustus* and *L. sulphureus*, significantly worsens both the quantitative and qualitative properties of oak wood only when developing on the tree for several years until the tree death.

It was revealed that the density of fresh and old dead wood compared with wood without signs of weakening decreases by 3.2 and 6.6% respectively, the compressive strength along the fibers – by 10.3 and 15.0%, the compressive strength across the fibers – by 12.1 and 15.5%, the tensile strength at static bending – by 9.8 and 10.5%, hardness – by 8.8 and 9.9%, impact strength – by 9.3 and 10.4%. A statistical assessment of the results showed that the established differences between the wood properties of different categories of tree condition are reliably significant.

Keywords: oak, stem rot, condition categories, wood density, mechanical properties.

For citation: Khvasko A. V., Larina Yu. A., Volchenkova G. A., Korzon V. G. Some physical and mechanical properties of oak wood affected by rot. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 99–104 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-13.

Введение. По данным государственного лесного кадастра Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2023 г., дубравы в республике про-

израстают на площади 272 779,1 га, что составляет 3,3% от лесопокрытой площади с общим запасом насаждений 53 685,1 тыс. м³ [1].

Дуб является одним из наиболее ценных лесообразующих древесных видов Беларуси, что обусловлено высоким качеством его древесины. Древесина дуба имеет красивую текстуру, плотная, способна выдерживать высокие механические нагрузки, хорошо сохраняется на воздухе, в земле и под водой, стойкая к гниению вследствие влияния вредоносных микроорганизмов, умеренно растрескивается и коробится, хорошо поддается обработке и отделке, сохраняет твердость распила разных типов, проявляет деформационную стойкость [2, 3]. Все эти свойства делают древесину дуба широко используемой и незаменимой в промышленности, машиностроении, мебельном и паркетном производстве, строительстве домов, производстве бочек.

Одной из главных задач лесоводства является выращивание деревьев дуба с высококачественной древесиной. Но в связи с неоднократно повторяющимся на протяжении XX в. усыханием дубрав на территории Беларуси, возникающим в результате воздействия абиотических и биотических факторов [4, 5], актуальными стали вопросы своевременного использования древесины патологического отпада.

Средние размеры деревьев патологического отпада, как правило, приближаются к средним размерам деревьев в насаждении, а нередко и превышают их. В связи с этим с лесоводственной точки зрения патологический отпад необходимо выбирать еще на этапе сильно ослабленных и усыхающих деревьев, что позволит кроме выполняемых санитарных целей удовлетворить и цели хозяйственные – получить еще не сильно поврежденную болезнями стволую древесину дуба.

В целом комплекс дереворазрушающих грибов в древостоях дубовой формации представлен широко. Он включает как группу грибов, поражающих живые деревья, так и грибы, способствующие разложению древесного отпада [6, 7].

В ходе ранее проведенных авторами данной статьи исследований установлено, что в Беларуси важнейшими биотическими факторами, оказывающими негативное воздействие на дубравы, являются возбудители гнилевых болезней ствола дуба – ложный дубовый (*Phellinus robustus* Karst.) и серно-желтый (*Laetiporus sulphureus* Bond.) трутовики [8].

С повышением возраста зараженность деревьев дуба ложным дубовым и серно-желтыми трутовиками увеличивается. Во всех геоботанических подзонах Беларуси отмечено значительное поражение спелых и перестойных дубрав [9].

Деревья дуба, пораженные ядровыми гнилями, теряют свои товарные качества, что сильно сказывается на выходе деловых сортиментов. Выход деловой древесины из фаутных деревьев зависит от протяженности гнили в

стволе. Общая протяженность гнили ложного дубового трутовика в среднем составляет 5,2 м, серно-желтого трутовика – 6,9 м [10].

Основная часть. Цель данной работы заключается в определении скорости деградации древесины дуба, поврежденной желтовато-белой полосатой (ложный дубовый трутовик – *Phellinus robustus* Karst.) и красно-бурой призматической (серно-желтый трутовик – *Laetiporus sulphureus* Bond.) ядровыми гнилями, и в оценке влияния данных стволовых гнилей на физико-механические свойства заготавливаемых круглых лесоматериалов.

Отбор модельных деревьев дуба для оценки физико-механических свойств древесины, поврежденной ядровыми гнилями, проводился как в суходольных, так и в пойменных условиях местопроизрастания. Исследования были выполнены на протяжении 2018–2022 гг. Предварительные данные по изменению физико-механических свойств древесины дуба патологического отпада пойменных дубрав были получены в 2018 г. [11].

Для определения физико-механических свойств древесины дуба, пораженной стволовыми гнилями, были проведены исследования плотности, прочности при сжатии вдоль и поперек волокон, статическом изгибе и твердости древесины.

Отбор деревьев был проведен в филиале Белорусского государственного технологического университета «Негорельский учебно-опытный лесхоз», в государственном опытном лесхозе-защитном учреждении «Мозырский опытный лесхоз» и государственном природоохранном учреждении «Национальный парк “Припятский”». Всего было отобрано по шесть модельных деревьев различных категорий состояния: без признаков ослабления, ослабленных, усыхающих, свежего и старого сухостоя [12].

Отмечалось состояние кроны деревьев, коры и корневых лап, наличие плодовых тел дереворазрушающих грибов, заселение стволовыми вредителями и другие патологические изменения, измерялся диаметр на высоте 1,3 м.

На модельных деревьях II категории состояния (ослабленные) наблюдалось объедание около 3% листы, усыхание отдельных ветвей в кроне (от 7 до 10%), незначительное снижение прироста по сравнению с деревьями без признаков ослабления. На деревьях из категории усыхающих выявлено усыхание 65–70% ветвей в верхней и средней частях кроны, наличие плодовых тел ложного дубового и серно-желтого трутовиков, на двух деревьях повреждение стволовым вредителем.

Все деревья свежего сухостоя были повреждены ложным дубовым или серно-желтым трутовиком, листва отсутствовала, кора в нижней части частично отпала. На одном дереве присутствовали два живых водяных побега. Два дерева

были также поражены белой заболонной гнилью корней, под корой отмечены в большом количестве ризоморфы опенка.

Высота расположения плодовых тел ложного дубового трутовика составила от 0,4 до 16,5 м, серно-желтого – от 0,65 до 12,1 м. Наиболее часто (64,3%) на деревьях встречались 2 и более плодовых тела ложного дубового трутовика. Плодовые тела серно-желтого трутовика или отсутствовали (3,5%), или располагались одиночно.

Для детальной характеристики модельных деревьев фиксировались места проникновения инфекции. Так, местами проникновения спор ложного дубового трутовика являлись отмирающие сучья (54,5% всех взятых модельных деревьев, поврежденных ложным дубовым трутовиком), морозные трещины (36,4%) и механические повреждения комлевой части (9,1%). Общая протяженность гнили в зависимости от вышеописанных мест проникновения спор в среднем составляла 6, 7,5 и 1,9 м, интенсивность распространения гнили по сечению ствола – от 15 до 80%.

Местами проникновения спор серно-желтого трутовика являлись морозные трещины (57,1%) и механические повреждения коры (42,9%). Общая протяженность гнили в среднем составляла 8,5 м, интенсивность распространения гнили по сечению ствола – от 25 до 60% [10].

На деревьях из категории старого сухостоя листва отсутствовала, часть ветвей отпала, кора отслоилась от древесины, выявлено повреждение гнилями и наличие плодовых тел трутовиков. На одном дереве также зафиксировано поражение белой заболонной гнилью корней.

После рубки деревьев из каждого ствола на расстоянии 1,3 м от комля выпиливался круглый лесоматериал длиной 1,5 м. Заготовленные из круглых лесоматериалов бруски кондиционировали при комнатных условиях в течение 3 месяцев до достижения влажности 12–15%. После этого из них изготавливали образцы для стандартных испытаний на определение физико-механических свойств древесины.

В лаборатории кафедры лесозащиты и древесиноведения БГТУ были проведены испытания древесины для определения показателей физико-механических свойств [13–19]. Для этого использовались универсальная испытательная машина MTS Insight 100, маятниковый копр. Обработка данных проводилась в программах Test Works 4 и Microsoft Excel с последующим приведением всех полученных показателей к влажности 12%.

Одним из наиболее важных и объективных физических показателей состояния и качества древесины является плотность. Плотность древесины влияет почти на все физико-механические свойства, качество и долговечность изделий из нее [20].

Плотность древесины при влажности в момент испытания и при влажности 12% определяли на 500 образцах с размерами 20×20×30 мм (последний размер вдоль волокон), по 100 образцов для каждой взятой для анализа категории состояния деревьев дуба.

При эксплуатации в разных отраслях хозяйствования древесина подвергается влиянию внешних механических нагрузок. Ее способность сопротивляться действию таких нагрузок выражается механическими свойствами, которые являются наиболее характерными признаками состояния или степени разрушенности древесины.

Показатель прочности при сжатии вдоль волокон важен при использовании древесины в качестве стоек, колонн, подпорок, частей строительных конструкций, элементов мебели и др. Предел прочности при сжатии вдоль волокон определяли на 250 образцах с размерами 20×20×30 мм, по 50 образцов для каждой исследуемой группы деревьев по состоянию.

В практической деятельности человека древесина часто подвергается нагрузкам, направленным на сжатие поперек волокон: нижние венцы бревенчатых срубов, концы балок в деревянных перекрытиях, деревянный пол под мебелью, при сопряжении деревянных элементов с помощью шайбы и болтов и др. Предел прочности при сжатии поперек волокон определяли на 400 образцах с размерами 20×20×30 мм, по 80 образцов для каждой взятой для анализа категории состояния деревьев дуба.

Прочность при статическом изгибе необходимо учитывать при использовании древесины в качестве балок, лаг, досок пола и т. п. Предел прочности при статическом изгибе определяли на 400 образцах с размерами 20×20×300 мм, по 80 образцов для каждой взятой для анализа категории состояния деревьев дуба.

Твердость древесины характеризует ее способность сопротивляться внедрению другого, более твердого тела и сказывается на качестве обработки древесины режущими инструментами при пилении, строгании, лущении и т. д. Торцевая статическая твердость определялась на 200 образцах с размерами 50×50×50 мм, по 40 образцов для каждой взятой для анализа категории состояния деревьев дуба.

Ударная вязкость как показатель величины работы, затраченной на разрушение древесины, оценивается ее способностью сопротивляться ударным нагрузкам при эксплуатации элементов деревянных конструкций и изделий. Данный показатель определялся на 400 образцах с размерами 20×20×300 мм, по 80 образцов для каждой взятой для анализа категории состояния деревьев дуба.

Средние показатели основных физико-механических свойств древесины деревьев дуба разного состояния представлены в таблице.

Физико-механические свойства древесины деревьев дуба разного состояния

Категория состояния	Плотность ρ_{12} , кг/м ³	Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	Предел прочности при сжатии поперек волокон, МПа	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Торцевая статическая твердость, Н/мм ²	Ударная вязкость, Дж/см ²
Деревья без признаков ослабления	685,8 ± 7,94	58,0 ± 1,32	5,9 ± 0,23	107,8 ± 1,26	68,1 ± 0,84	7,6 ± 0,12
Ослабленные	685,1 ± 6,25	53,8 ± 1,12	5,5 ± 0,54	105,6 ± 1,35	66,0 ± 0,92	7,5 ± 0,11
Усыхающие	681,5 ± 7,75	52,5 ± 1,26	5,1 ± 0,42	103,5 ± 1,39	63,2 ± 0,90	7,2 ± 0,21
Свежий сухостой	664,8 ± 7,21	51,0 ± 1,34	4,8 ± 0,40	96,1 ± 1,40	61,4 ± 0,86	6,8 ± 0,15
Старый сухостой	639,2 ± 3,10	48,4 ± 1,28	4,6 ± 0,37	94,8 ± 0,98	59,8 ± 0,80	6,6 ± 0,12

С целью определения достоверности полученных результатов нами проведена их статистическая обработка и оценка существенности разности средних по t -критерию.

Установлено, что при влажности 12% плотность древесины свежего и старого сухостоя по сравнению с древесиной без признаков ослабления снижается на 3,1 и 6,8% соответственно, предел прочности при сжатии вдоль волокон – на 12,1 и 16,6%, предел прочности при сжатии поперек волокон – на 18,6 и 22,0%, предел прочности при статическом изгибе – на 10,9 и 12,1%, твердость – на 9,8 и 12,2%, ударная вязкость – на 10,7 и 13,0% соответственно.

Точность определения данных во всех случаях является весьма высокой – не превышает 5%. Коэффициент вариации изменяется в пределах от 0,5 до 12,1%, за исключением показателей ударной вязкости (от 15 до 22%). Однако во всех случаях он ниже 25%, что означает среднюю степень вариации данных.

Коэффициент корреляции между показателями физико-механических свойств древесины и категориями состояния деревьев составляет 0,95–0,98, т. е. корреляционная зависимость сильная. Установленные различия между показателями древесины разных категорий состояния достоверно значимы ($t_{\text{факт}} > t_{\text{теор}}$).

Проведенные исследования влияния желто-вато-белой полосатой и красно-бурой призматической ядровых гнилей на физико-механические свойства древесины дуба показали, что с увеличением продолжительности времени после перехода деревьев в категорию сухостойных эти показатели уменьшаются. У деревьев старого сухостоя все исследованные показатели механических свойств снижаются более чем на 12%. Причиной являются особенности развития ложного дубового и серно-желтого трутовиков, которые приводят к биологическому разложению всех компонентов клеточных стенок.

Заключение. Таким образом, стволовые гнили дуба, вызываемые ложным дубовым и серно-желтым трутовиками, значительно ухудшают как количественные (физико-механические), так и качественные свойства древесины дуба только при развитии на дереве в течение нескольких лет до момента перехода деревьев в категорию старого сухостоя. Это подтверждает необходимость систематического проведения лесопатологического мониторинга в дубравах Беларуси для своевременного выявления стволовых гнилей, назначения и осуществления санитарно-оздоровительных мероприятий с целью минимизации последствий их развития.

Список литературы

1. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2023 г. Минск: Белгослес, 2023. 87 с.
2. Вихров В. Е. Строение и физико-механические свойства древесины дуба. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1954. 264 с.
3. Новосельцев В. Д., Бугаев В. А. Дубравы. М.: Агропромиздат, 1985. 214 с.
4. Сазонов А. А. Массовое усыхание дубовых лесов Восточной Европы как периодический процесс // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О. А. Катаева): материалы Всерос. конф. с междунар. участием, СПб., 24–27 нояб. 2020 г. СПб., 2020. С. 281–282.
5. Федоров Н. И., Блинцов А. И. Лесопатологическое состояние дубрав Беларуси и причины нарушения их устойчивости // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2001. Вып. IX. С. 11–15.
6. Чеботарев П. А., Чеботарева В. В., Стороженко В. Г. Гнилевые фауны спелых и перестойных дубовых древостоев Теллермановского опытного лесничества // Лесоведение. 2019. № 1. С. 49–56.

7. Кожевников А. М., Решетников В. Ф., Колодий П. В. Дубравы Беларуси: состояние, проблемы и пути улучшения ведения хозяйства в них // Дуб – порода третьего тысячелетия: тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 1998. Вып. 48. С. 40–49.
8. Хвасько А. В., Ларина Ю. А., Блинцов А. И. Распространенность болезней в пойменных дубравах с разными лесоводственно-таксационными показателями // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). С. 199–205.
9. Встречаемость возбудителей стволовых гнилей дуба в различных геоботанических подзонах Беларуси / А. В. Хвасько [и др.] // Проблемы лесоведения и лесоводства. 2021. № 81. С. 100–107.
10. Особенности развития стволовых гнилей на деревьях дуба / А. В. Хвасько [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 73–79.
11. Изменение физико-механических свойств древесины дуба патологического отпада пойменных дубрав / А. В. Хвасько [и др.] // Лесное хозяйство: материалы докл. 83-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 4–14 фев. 2019 г. Минск, 2019. С. 78.
12. Санитарные правила в лесах Республики Беларусь. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2016. 21 с.
13. Древесина. Метод отбора модельных деревьев и краёв для определения физико-механических свойств древесины насаждений: ГОСТ 16483.6–80. М.: Изд-во стандартов, 1986. 7 с.
14. Древесина. Метод определения плотности: ГОСТ 16483.1–84. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
15. Древесина. Метод определения статической твердости: ГОСТ 16483.17–81. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
16. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон: ГОСТ 16483.10–73. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
17. Древесина. Методы определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон: ГОСТ 16483.11–72. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
18. Древесина. Методы определения предела прочности при статическом изгибе: ГОСТ 16483.3–84. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
19. Древесина. Методы определения ударной вязкости при изгибе: ГОСТ 16483.4–73. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
20. Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесная пром-сть, 1976. 160 с.

References

1. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2023* [The State Forest Cadastre of the Republic of Belarus as of 01.01.2023]. Minsk, Belgosles Publ., 2023. 87 p. (In Russian).
2. Vihrov V. E. *Stroyeniye i fiziko-mekhanicheskiye svoystva drevesiny duba* [Structure and physico-mechanical properties of oak wood]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR Publ., 1954. 264 p. (In Russian).
3. Novosel'cev V. D., Bugaev V. A. *Dubravyye* [Oak forests]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 214 p. (In Russian).
4. Sazonov A. A. Mass desiccation of oak forests in Eastern Europe as a periodic process. *Dendrobiontye bespozvonochnyye zhivotnyye i griby i ikh rol' v lesnykh ekosistemakh (XI Chteniya pamyati O. A. Kataeva): materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdynodnym uchastiyem* [Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems (XI Readings in memory of O. A. Kataev): materials of the All-Russian Conference with international participation]. St. Petersburg, 2020, pp. 281–282 (In Russian).
5. Fedorov N. I., Blintsov A. I. Forest-pathological condition of Belarusian oak forests and the reasons for the violation of their stability. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2001, issue IX, pp. 11–15 (In Russian).
6. Chebotarev P. A., Chebotareva V. V., Storozhenko V. G. Rotten fautes of ripe and overgrown oak stands of the Tellerman Experimental Forestry. *Lesovedeniye* [Forest science], 2019, no. 1, pp. 49–56 (In Russian).
7. Kozhevnikov A. M., Reshetnikov V. F., Kolodiy P. V. Oak forests of Belarus: state, problems and ways to improve farming in them. *Dub – poroda tret'ego tysyacheletiya: trudy Instituta lesa NANBelarusi* [Oak – a breed of the third millennium: proceedings of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel, 1998, issue 48, pp. 40–49 (In Russian).
8. Khvas'ko A. V., Larina Yu. A., Blintsov A. I. Prevalence of diseases in floodplain oak forests with different forestry and taxation indicators. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2017, no. 2 (198), pp. 199–205 (In Russian).
9. Khvas'ko A. V., Larina Yu. A., Korzon V. G., Volchenkova G. A., Serko N. V. Occurrence of the oak stem rot in different geobotanical subzones of Belarus. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva* [Problems of forescience and forestry], 2021, no. 81, pp. 100–107 (In Russian).

10. Khvas'ko A. V., Larinina Yu. A., Volchenkova G. A., Korzon V. G. Features of the stem rot development on oak trees. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 1 (252), pp. 73–79 (In Russian).

11. Khvas'ko A. V., Larinina Yu. A., Kozel A. V., Blintsov A. I., Shukalovich M. I., Kukhta I. N. Changes in the physical and mechanical properties of oak wood due to pathological decay of floodplain oak forests. *Lesnoye khozyaystvo: materialy dokladov 83-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forestry: materials of reports of the 83rd scientific-technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2019, pp. 78 (In Russian).

12. Sanitary rules in forests of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus Publ., 2016. 21 p. (In Russian).

13. GOST 16483.6–80. Wood. Method of selection of model trees and ridges to determine the physical and mechanical properties of wood plantings. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. 7 p. (In Russian).

14. GOST 16483.1–84. Wood. Density determination method. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

15. GOST 16483.17–81. Wood. Method for determining static hardness. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

16. GOST 16483.10–73. Wood. Methods for determining the compressive strength along the fibers. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

17. GOST 16483.11–72. Wood. Methods for determining the conditional compressive strength across fibers. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

18. GOST 16483.3–84. Wood. Methods for determining the ultimate strength in static bending. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

19. GOST 16483.4–73. Wood. Methods for determining the impact strength during bending. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

20. Poluboyarinov O. I. *Plotnost' drevesiny* [Wood density]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russian).

Информация об авторах

Хвасько Андрей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: khvasko@belstu.by

Ларинина Юлия Александровна – магистр биологических наук, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lesya25106@mail.ru

Волченкова Галина Александровна – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ландшафтного проектирования и садово-паркового строительства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: volchenkova@belstu.by

Корзон Виктор Георгиевич – аспирант кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: poiuytrewq19744@mail.ru

Information about the authors

Khvasko Andrey Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khvasko@belstu.by

Larinina Yuliya Aleksandrovna – Master of Biology, PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lesya25106@mail.ru

Volchenkova Galina Aleksandrovna – PhD (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Landscape Design and Architecture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volchenkova@belstu.by

Korzon Viktor Georgiyevich – PhD student, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: poiuytrewq19744@mail.ru

Поступила 13.10.2023

ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS

УДК 630*371

Д. А. Кононович¹, С. Е. Арико², С. П. Мохов²

¹ООО «ЗУМЛИОН БЕЛ-РУС»

²Белорусский государственный технологический университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ С УЧЕТОМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНЫХ РЕАКЦИЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

В статье представлены результаты анализа способов погрузки и разгрузки лесосечных отходов, влияющих на изменение распределения величин опорных реакций машины для их транспортировки. В процессе проведения теоретического исследования рассматривались различные варианты и способы укладки лесосечных отходов на грузовую платформу. В зависимости от угла поворота гидравлического манипулятора и веса поднимаемых лесосечных отходов определено перераспределение величин реакций под колесами полуприцепа при работе с аутригерами и без них. Выполнен сравнительный анализ диагональной укладки лесосечных отходов на полуприцеп, укладки на гидроуправляемый борт и центр грузовой платформы. Рассмотрены способы укладки лесосечных отходов с открытыми и закрытыми гидроуправляемыми бортами. Даны рекомендации по выбору способа укладки лесосечных отходов на грузовую платформу на основе изучения устойчивости полуприцепа. Выполнен анализ эффективности применения аутригеров на разгрузке лесосечных отходов в зависимости от изменения веса лесосечных отходов в грузовой платформе полуприцепа.

Ключевые слова: лесосечные отходы, способы погрузки, укладка, анализ, опорные реакции.

Для цитирования: Кононович Д. А., Арико С. Е., Мохов С. П. Сравнительный анализ способов выполнения погрузочно-разгрузочных операций с учетом перераспределения опорных реакций машины для транспортировки лесосечных отходов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 105–111.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-14.

D. A. Kononovich¹, S. Ye. Ariko², S. P. Mokhov²

¹LLC “ZOOMLION BEL-RUS”

²Belarusian State Technological University

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR PERFORMING LOADING AND UNLOADING OPERATIONS TAKEN INTO ACCOUNT OF REDISTRIBUTION OF SUPPORTS REACTIONS OF MACHINE FOR TRANSPORTING LOGGING WASTE

The article presents the results of an analysis of the methods of loading and unloading logging waste, which influence the change in the distribution of the values of the support reactions of the machine for their transportation. In the process of conducting a theoretical study, various options and methods for placing logging waste on a loading platform were considered. Depending on the angle of rotation of the hydraulic manipulator and the weight of the logging waste being lifted, the redistribution of reaction values under the wheels of a semi-trailer was determined when working with and without outriggers.

A comparative analysis of diagonal stacking of logging waste on a semi-trailer, laying on a hydraulically controlled side and the center of a loading platform was carried out. Methods for laying logging waste with open and closed hydraulically controlled sides are considered. Recommendations are given for choosing a method for placing logging waste on a loading platform based on a study of the stability of the semi-trailer. An analysis was made of the effectiveness of using outriggers for unloading logging waste depending on the change in the weight of logging waste in the cargo platform of a semi-trailer.

Keywords: logging waste, ways of loading, stowage, analysis, normal reactions.

For citation: Kononovich D. A., Ariko S. Ye., Mokhov S. P. Comparative analysis of methods for performing loading and unloading operations taken into account of redistribution of supports reactions of machine for transporting logging waste. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 105–111 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-14.

Введение. Эффективность эксплуатации машины для транспортировки лесосечных отходов во многом зависит от их объема. Увеличение данного показателя можно достичь за счет уплотнения и рациональной укладки на грузовой платформе. Оборудование для транспортировки лесосечных отходов, устанавливаемое на полуприцеп, может оснащаться гидроуправляемыми бортами, функциональное назначение которых заключается в увеличении объема грузовой платформы и степени уплотнения лесосечных отходов путем периодического закрытия и открытия бортов [1–4]. При этом укладка должна осуществляться с возможностью наиболее эффективного и равномерного наполнения полуприцепа. Процесс погрузки и разгрузки лесосечных отходов связан с работой манипулятора и подъемом груза на его максимальном вылете, что влияет на устойчивость полуприцепа. С учетом этого существует необходимость анализа способов выполнения технологических операций с целью определения наиболее эффективных и рациональных вариантов их укладки, которые будут обеспечивать устойчивость полуприцепа и эффективное его наполнение. С учетом вышесказанного актуальным является проведение исследований различных способов погрузки и разгрузки лесосечных отходов, анализ их влияния на устойчивость транспортной системы на основе изучения изменения величин опорных реакций под колесами полуприцепа и базового трактора согласно разработанной математической модели [2] с учетом работы гидроманипулятора.

Основная часть. Теоретическими исследованиями установлено, что на устойчивость машины для транспортировки лесосечных отходов значительное влияние будет оказывать способ укладки и вес погружаемого материала. С учетом влияния поворота гидроманипулятора с грузом можно выделить несколько способов загрузки полуприцепа. Первый способ связан с загрузкой лесосечных отходов с открытыми гидроуправляемыми бортами, второй – с закрытыми.

Погрузка первым способом предусматривает несколько вариантов укладки: диагональная укладка лесосечных отходов по краям бортов, укладка с одной стороны борта и укладка центральной части грузовой платформы.

Исследованиями, проводимыми по разработанной математической модели [2], установлено, что при повороте порожнего гидроманипулятора на 90° перераспределение величин опорных реакций между левым и правым бортами порожнего полуприцепа достигает до 44,08%, а при подъеме первой пачки весом 1 кН – до 51% (рис. 1). При этом величины реакций под колесами полуприцепа снижаются до 16,2 кН с грузом в грейфере гидроманипулятора и до 17,57 кН без груза.

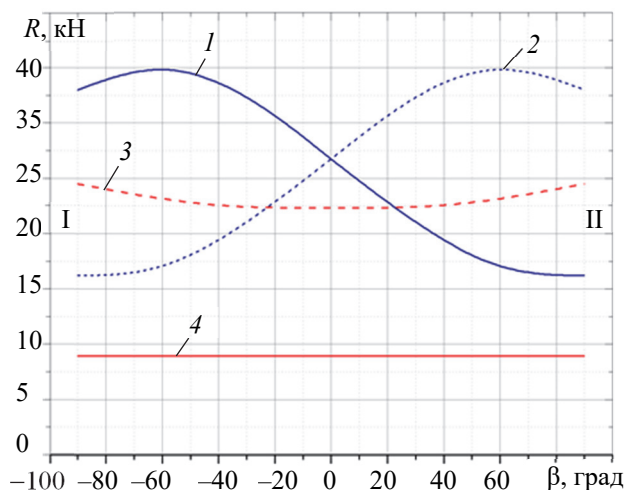


Рис. 1. Изменение реакции под колесами полуприцепа и базового шасси в зависимости от угла поворота гидроманипулятора при загрузке лесосечных отходов весом 1 кН:

1, 2 – левый и правый борта полуприцепа; 3, 4 – задняя и передняя оси базового трактора соответственно;

I – область, соответствующая повороту гидроманипулятора в левую сторону; II – область, соответствующая повороту гидроманипулятора в правую сторону

В случае диагональной укладки лесосечных отходов и размещения первой пачки весом 1 кН

на дальний угол ближайшего борта со стороны поворота гидроманипулятора устойчивость снижается на 35,20% по сравнению с расположением гидроманипулятора над грузовой платформой, а при повороте гидроманипулятора на 90° с грузом такого же веса устойчивость снижается на 40,71%. Для повышения устойчивости при таком способе загрузки рекомендуется укладку пачки начинать с противоположного по отношению к стороне погрузки борта по схеме взаимного пересечения «крест-накрест», с последующей укладкой центральной части грузовой платформы (рис. 2).

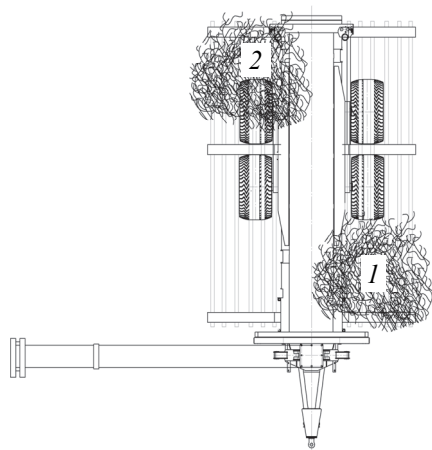


Рис. 2. Схема диагональной укладки лесосечных отходов

Повышения устойчивости полуприцепа еще до 3% можно добиться, соблюдая следующую схему укладки лесосечных отходов на грузовую платформу. Так, первая пачка должна укладываться на край борта, противоположный стороне поворота гидроманипулятора, и размещаться ближе к защитному ограждению, а вторая пачка – по диагонали на дальний край противоположного борта, ближайший к стороне поворота манипулятора. Дальнейшая погрузка осуществляется по схеме взаимного пересечения «крест-накрест», а после заполняется центральная часть грузовой платформы.

Изменения величин опорных реакций под колесами полуприцепа представлены на рис. 3.

В процессе погрузки лесосечных отходов и укладки их на гидроуправляемый борт полуприцепа (рис. 3) было установлено, что работа с аутригерами (рис. 3, б) приводит к повышению устойчивости полуприцепа на 10–64% в зависимости от веса лесосечных отходов, расположенных на грузовой платформе и веса лесосечных отходов в грейфере. Это связано с тем, что работа с аутригерами изменяет геометрию опорного контура, а погруженные лесосечные отходы на гидроуправляемый борт догружают колеса полуприцепа, увеличивая отношение

между восстанавливающим и опрокидывающим моментами [5–6].

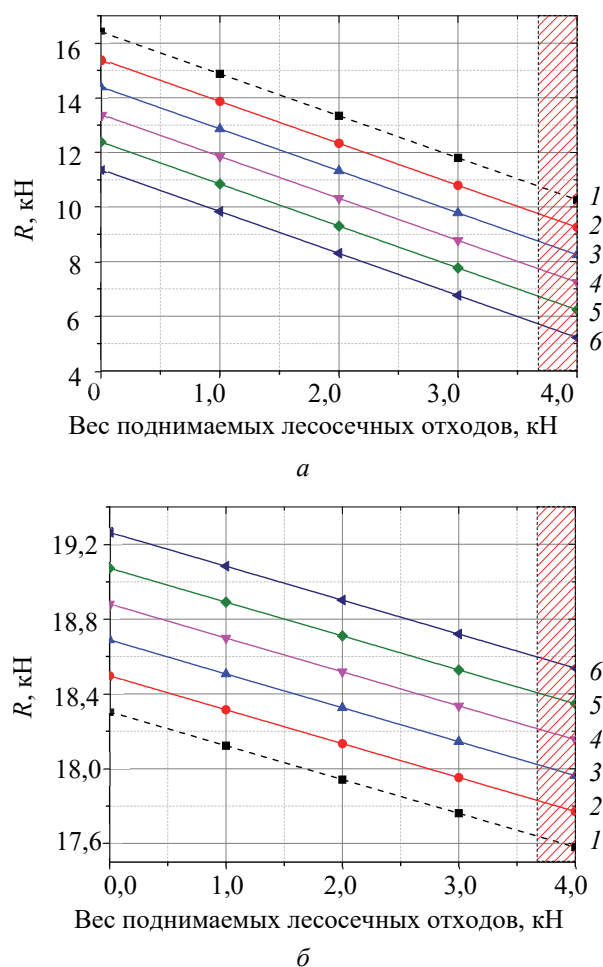


Рис. 3. Изменение опорных реакций под колесами полуприцепа при погрузке лесосечных отходов (поворот гидроманипулятора 90°):
а – работа без аутригеров; б – работа с аутригерами;
1 – $M = 0$ кН; 2 – $M = 1$ кН; 3 – $M = 2$ кН;
4 – $M = 3$ кН; 5 – $M = 4$ кН; 6 – $M = 5$ кН

Однако на практике вариант укладки лесосечных отходов с первоначальной полной загрузкой гидроуправляемого борта применяется крайне редко в связи со снижением обзорности при погрузке и увеличением высоты подъема манипулятора при погрузке последующих пачек. Аутригеры наиболее целесообразно использовать при разгрузке грузовой платформы, так как начало операции разгрузки осуществляется из центра грузовой платформы и уплотненные лесосечные отходы, цепляясь друг за друга, увеличивают вес поднимаемых отходов в грейфере [7].

Исследованиями установлено, что укладка первой пачки весом 1 кН на гидроуправляемый борт, совпадающий со стороной поворота гидроманипулятора, приводит к снижению устойчивости полуприцепа на 6,15%, а при весе пачки 5 кН – на 30,71% при повороте манипулятора

на 90° в сравнении с поворотом порожнего грейфера (рис. 3, а). В таком случае наибольшее влияние на устойчивость полуприцепа будет оказывать вес погружаемых лесосечных отходов. Так, при реализации максимальной грузоподъемности манипулятора ГМ-42, соответствующего подъему груза 3,63 кН, устойчивость полуприцепа снизится на 65,36%.

Наиболее рациональным вариантом укладки лесосечных отходов по распределению опорных реакций под колесами полуприцепа будет являться первоначальная загрузка центральной части грузовой платформы (рис. 4).

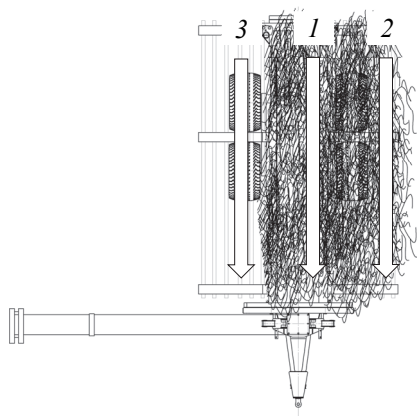
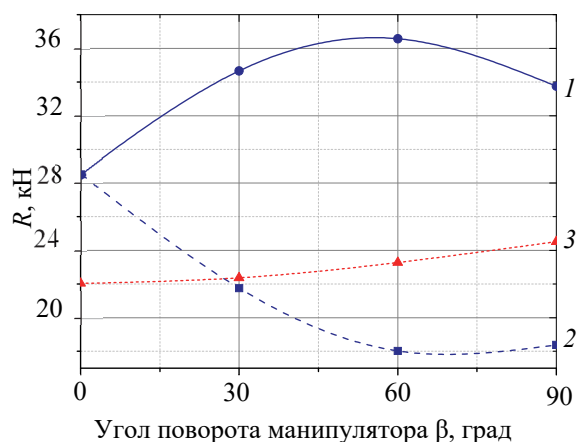


Рис. 4. Схема укладки лесосечных отходов в центральной части грузовой платформы

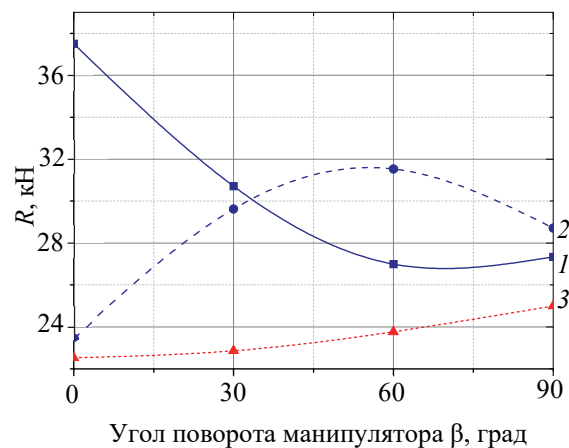
Следует отметить, что погрузка должна осуществляться рядами. Укладка первого ряда должна начинаться с задней части грузовой платформы и заполняться по всей ее длине [8]. Такая укладка лесосечных отходов приведет к дозагрузке реакций под колесами полуприцепа, что позволит на 42,50% увеличить его устойчивость при повороте гидроманипулятора на 90° (рис. 5, а). Исследованиями установлено, что второй ряд укладки лесосечных отходов должен осуществляться на гидроуправляемый борт, противоположный повороту манипулятора. Укладка также должна проводиться с задней части гидроуправляемого борта и заполняться по всей его длине. Такой вариант загрузки позволит повысить устойчивость полуприцепа при загрузке на 32,77% (рис. 5, б).

После погрузки второго ряда третьим рядом будет являться другой гидроуправляемый борт, расположенный со стороны поворота манипулятора. Так происходит выравнивание величин опорных реакций под колесами правого и левого бортов полуприцепа, в результате повышается его устойчивость и появляется возможность обеспечивать эффективный сбор лесосечных отходов по обе стороны полуприцепа. Дальнейшая погрузка грузовой платформы повторяется согласно схеме рядов и производится до полной

загрузки полуприцепа с периодическим уплотнением лесосечных отходов.



а



б

Рис. 5. Изменение опорных реакций под колесами полуприцепа при укладке центра грузовой платформы:

а – укладка центра грузовой платформы;

б – укладка центра грузовой платформы и противоположного повороту гидроманипулятора борта;

1, 2 – левый и правый борта полуприцепа;

3 – задняя ось базового трактора

Второй способ загрузки лесосечных отходов не имеет существенных отличий от загрузки с открытыми гидроуправляемыми бортами. Основное отличие заключается в отсутствии возможности осуществлять укладку лесосечных отходов на гидроуправляемые борта. Однако такая погрузка значительно снижает рейсовую нагрузку, что приводит к падению производительности транспортировки лесосечных отходов.

Разгрузка лесосечных отходов согласно теоретическим исследованиям должна осуществляться в обратном порядке. Первым разгружается ряд лесосечных отходов с ближайшего гидроуправляемого борта к стороне поворота

гидроманипулятора. Вторым будет являться ряд отходов, расположенный на противоположном борту к стороне поворота гидроманипулятора. Это приведет к выравниванию величин опорных реакций под колесами полуприцепа на разгрузке лесосечных отходов. Третьей разгружается центральная часть грузовой платформы полуприцепа. При таком способе разгрузки происходят наименьшие перераспределения опорных реакций под колесами полуприцепа, что позволяет повысить устойчивость машины для транспортировки лесосечных отходов. Далее технологические приемы повторяются до полной разгрузки грузовой платформы полуприцепа [9, 10].

Установлено, что с увеличением загрузки грузовой платформы лесосечными отходами до 50 кН устойчивость полуприцепа возрастает на 46% при повороте манипулятора на 90° (рис. 6, а).

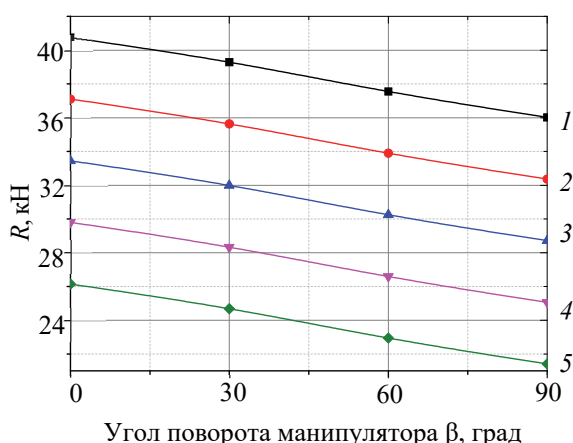
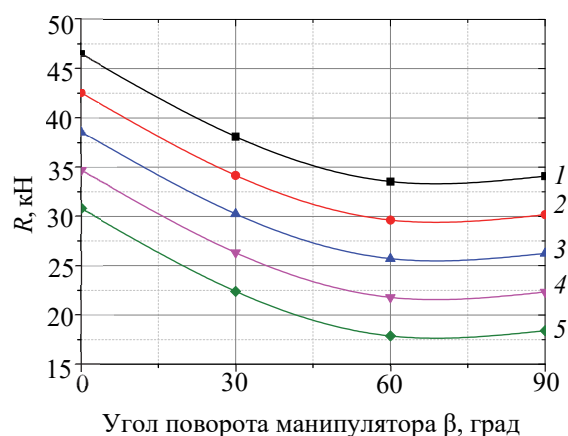


Рис. 6. Изменение опорных реакций под колесами полуприцепа при разгрузке лесосечных отходов
 а – без аутригеров; б – с аутригерами;
 1 – $M = 50$ кН; 2 – $M = 40$ кН; 3 – $M = 30$ кН;
 4 – $M = 20$ кН; 5 – $M = 10$ кН

Это связано с дозагрузкой опорных реакций под колесами левого и правого бортов

полуприцепа машины для транспортировки лесосечных отходов [11–15]. Однако по мере разгрузки грузовой платформы устойчивость полуприцепа будет снижаться, в связи с чем на разгрузке лесосечных отходов целесообразно использовать аутригеры (рис. 6, б).

Так, применение аутригеров на разгрузке лесосечных отходов позволит повысить устойчивость полуприцепа на 5,32% при весе отходов в полуприцепе 50 кН и повороте манипулятора на 90°, а при весе 10 кН – на 14%.

Заключение. В результате сравнительного анализа различных способов погрузки и разгрузки лесосечных отходов установлено, что наполнение центральной части грузовой платформы при открытых гидроуправляемых бортах приводит к повышению устойчивости полуприцепа на 42,50% за счет перераспределения опорных реакций. При этом наиболее эффективным является осуществление укладки лесосечных отходов в начальный период с задней части грузовой платформы. Заполнение первого ряда грузовой платформы в таком случае проводится по всей ее длине до защитного ограждения. Вторым рядом укладки лесосечных отходов должен являться гидроуправляемый борт, расположенный на противоположной стороне поворота гидроманипулятора, который также заполняется по всей его длине начиная с задней части. Этот способ приведет к снижению распределения опорных реакций под колесами полуприцепа до 32,77%, что позволит повысить его устойчивость при погрузке. Продолжается погрузка лесосечных отходов по третьему ряду – ближайшему гидроуправляемому борту к стороне поворота гидроманипулятора. Далее процесс погрузки повторяется по такой же схеме до полной загрузки полуприцепа, при этом осуществляется уплотнение лесосечных отходов гидроуправляемыми бортами. Такой способ укладки кроме повышения устойчивости позволит повысить производительность за счет отсутствия необходимости затрат времени на опускание и подъем аутригеров.

Загрузка лесосечных отходов без открытия гидроуправляемых бортов должна осуществляться также от задней части платформы к защитному ограждению. Данный способ загрузки может использоваться в определенных природно-производственных условиях, например на рубках ухода, где использование гидроуправляемых бортов затруднительно. Уплотнение лесосечных отходов в таком случае осуществляется непосредственно гидроманипулятором за счет придавливания.

При использовании диагональной укладки лесосечных отходов для повышения устойчивости полуприцепа рекомендуется размещать первую пачку лесосечных отходов на краю борта,

противоположного к стороне поворота гидроманипулятора. Причем укладывать ее необходимо ближе к защитному ограждению. Вторая пачка укладывается на дальний противоположный край борта. Дальнейшая погрузка должна осуществляться по схеме укладки взаимного пересечения «крест-накрест», после чего заполняется центральная часть грузовой платформы.

Разгрузка полуприцепа лесосечными отходами осуществляется рядами по схеме в

обратном порядке, причем первым рядом разгрузки должен являться последний загружаемый ряд. Также установлено, что по мере увеличения интенсивности разгрузки устойчивость полуприцепа будет снижаться. А так как при разгрузке отсутствует необходимость переездов, то для выполнения данных технологических операций целесообразно использовать аутригеры, позволяющие повысить устойчивость до 14%.

Список литературы

1. Перспективный комплекс машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов / С. П. Мохов [и др.] // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск, 2017. С. 178–181.
2. Математическая модель работы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов / Д. А. Кононович [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 2. С. 192–198.
3. Федоренчик А. С., Ледницкий А. В. Энергетическое использование низкокачественной древесины и древесных отходов. Минск: БГТУ, 2010. 446 с.
4. Оценка компоновочной схемы и технологического оборудования проектируемой погрузочно-транспортной машины / С. П. Мохов [и др.] // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 48–49.
5. Семенов Ю. П. Лесная биоэнергетика. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 350 с.
6. Жуков А. В. Теория лесных машин. Минск: БГТУ, 2001. 640 с.
7. Методика и оценка эффективности эксплуатации погрузочно-транспортной машины в условиях Республики Беларусь / С. А. Голякевич [и др.] // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 30–32.
8. Леонов Е. А. Оценка влияния вида перевозимого груза на статическую загрузку погрузочно-транспортных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 108–111.
9. Федоренчик А. С. Оценка влияния формы и размеров кониковых устройств погрузочно-транспортных машин на их грузоподъемность // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 47–51.
10. Методика оценки эффективности применения комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов / С. П. Мохов [и др.] // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 231. С. 76–90. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.76-90.
11. Леонов Е. А., Федоренчик А. С., Ледницкий А. В. Определение коэффициентов полндревесности отходов лесозаготовок // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. № XVI. С. 57–60.
12. Матвейко А. П., Федоренчик А. С. Технология и машины лесосечных работ. Минск: Технопринт, 2002. 479 с.
13. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2, Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 23–27.
14. Кочегаров В. Г., Бит Ю. А., Меньшиков В. Н. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесная пром-сть, 1990. 392 с.
15. Кононович Д. А. Технологии очистки лесосек от лесосечных отходов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 245–250.

References

1. Mokhov S. P., Korobkin V. A., Golyakevich S. A., Kononovich D. A. Perspective complex machines for collection and transportation logging waste. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging industry: problems and solutions: materials of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 2017, pp. 178–181 (In Russian).
2. Kononovich D. A., Ariko S. Ye., Mokhov S. P., Asmolovskiy M. K. Mathematical model of work of the complex of machines for collection and transportation of forestry wastes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2020, no. 2, pp. 192–198 (In Russian).
3. Fedorenchik A. S., Lednitskiy A. V. *Energeticheskoye ispol'zovaniye nizkokachestvennoy drevesiny i drevesnykh otkhodov* [Energy use of low-quality wood and wood waste]. Minsk, BSTU Publ., 2010. 446 p. (In Russian).

4. Mokhov S. P., Golyakevich S. A., Pishchov S. N., Golyakevich S. A. Assessment of the layout diagram and technological equipment of the designed loading and transporting machine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2, Forest and Woodworking Industry, pp. 48–49 (In Russian).
5. Semenov Yu. P. *Lesnaya bioenergetika* [Forest bioenergetics]. Moscow, MGUL Publ., 2008. 350 p. (In Russian).
6. Zhukov A. V. *Teoriya lesnykh mashin* [The theory of forest machines]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 640 p. (In Russian).
7. Golyakevich S. A., Mokhov S. P., Pishchov S. N., Ariko S. Ye. Methodology and assessment of the effectiveness of operating a loading and transporting machine in the conditions of the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2, Forest and Woodworking Industry, pp. 30–32 (In Russian).
8. Leonov E. A. Assessment of the influence of the type of cargo transported on the static loading of loading and transport vehicles. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue XVIII, pp. 108–111 (In Russian).
9. Fedorenchik A. S. Assessment of the influence of the shape and size of conical devices of loading and transport machines on their load capacity. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 47–51 (In Russian).
10. Mokhov S. P., Ariko S. Ye., Kononovich D. A., Protas P. A. Method of evaluating the efficiency of application complex machines for collection and transportation logging waste. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, issue, 231, pp. 76–90. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.76-90 (In Russian).
11. Leonov E. A., Fedorenchik A. S., Lednitskiy A. V. Determination of full wood coefficients of logging waste. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 57–60 (In Russian).
12. Matveyko A. P., Fedorenchik A. S. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines logging activities]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2002. 479 p. (In Russian).
13. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Substantiation of the parameters of tow technology equipment wheeled skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2, Forest and Woodworking Industry, pp. 23–27 (In Russian).
14. Kochegarov V. G., Bit Yu. A., Men'shikov V. N. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines logging activities]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 392 p. (In Russian).
15. Kononovich D. A. Technologies cleaning cutting areas form logging waste. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2017, no. 2, pp. 245–250 (In Russian).

Информация об авторах

Кононович Денис Александрович – специалист по послепродажному обслуживанию отдела сервиса. ООО «ЗУМЛИОН БЕЛ-РУС» (22205, Китайско-Белорусский индустриальный парк “Беликий Камень”, пр-т Пекинский, 16, Республика Беларусь). E-mail: denkon_92@mail.ru

Арико Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, заместитель декана факультета заочного образования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Мохов Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmditlp@belstu.by

Information about the authors

Kononovich Denis Aleksandrovich – After-Sales Service Specialist. LLC “ZOOMLION BEL-RUS” (16, Pekinskiy Ave., 22205, Chinese-Belarusian Industrial Park “Great Stone”, Republic of Belarus). E-mail: denkon_92@mail.ru

Ariko Sergey Yevgen'evich – PhD (Engineering), Deputy Dean of Faculty of Extramural Studies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Mokhov Sergey Petrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of 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: lmditlp@belstu.by

Поступила 18.10.2023

УДК 630*2:502.174

И. А. Евкович, П. А. Протас

Белорусский государственный технологический университет

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ
В ЛЕСНОМ ФОНДЕ ПО КРИТЕРИЯМ СЭВИДЖА И ВАЛЬДА
В ПРОГРАММЕ MATHCAD**

Для эффективной ликвидации последствий стихийных бедствий в лесном фонде, повышения качества управленческих решений требуется прогноз динамики стихийных бедствий, затрат на их ликвидацию и влияния на лесные экосистемы. Такой прогноз можно получить с помощью методов предиктивной аналитики на основании анализа статистических данных прошлых лет.

В статье рассмотрена возможность применения теории игр по критериям Сэвиджа и Вальда для оценки и прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде. На основании анализа программных методов, которые могут применяться для прогнозирования стихийных бедствий в лесном фонде, установлена целесообразность применения программного пакета MathCAD. Приведена методика решения данной задачи в программном пакете MathCAD с детальным описанием решения и графической интерпретацией полученных результатов. Для решения задач по оценке и прогнозированию последствий стихийных бедствий в лесном фонде были описаны особенности, необходимые условия и исходные данные характеристик исследуемых объектов и определяемых параметров с учетом разработанного алгоритма в программном пакете MathCAD.

Ключевые слова: лесной фонд, стихийные бедствия, прогнозирование, ликвидация последствий, MathCAD, теория игр.

Для цитирования: Евкович И. А., Протас П. А. Прогнозирование последствий стихийных бедствий в лесном фонде по критериям Сэвиджа и Вальда в программе MathCAD // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 112–119.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-15.

I. A. Evkovich, P. A. Protas

Belarusian State Technological University

**FORECASTING THE CONSEQUENCES OF NATURAL DISASTER
IN THE FOREST FUND BY SAVAGE AND WALD CRITERIA
IN THE MATHCAD PROGRAM**

To effectively eliminate the consequences of natural disasters in the forest fund and improve the quality of management decisions, a forecast of the dynamics of natural disasters, the costs of their elimination and the impact on forest ecosystems is required. Such a forecast can be obtained using predictive analytics methods based on the analysis of statistical data from past years.

The article discusses the possibility of using game theory according to the Savage and Wald criteria to assess and predict the consequences of natural disasters in the forest fund. Based on the analysis of software methods that can be used to predict natural disasters in the forest fund, the feasibility of using the MathCAD software package has been established. A technique for solving this problem in the MathCAD software package is presented with a detailed description of the solution and a graphical interpretation of the results obtained. To solve problems of assessing and predicting the consequences of natural disasters in the forest fund, the features, necessary conditions and initial data of the characteristics of the objects under study and the parameters being determined were described, taking into account the developed algorithm in the MathCAD software package.

Keywords: forest fund, natural disasters, forecasting, liquidation of consequences, MathCAD, game theory.

For citation: Evkovich I. A., Protas P. A. Forecasting the consequences of natural disaster in the forest fund by Savage and Wald criteria in the MathCAD program. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 112–119 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-15.

Введение. Существенными и разрушительными стихийными бедствиями в лесном фонде, которые приводят к значительным затратам на их

ликвидацию, потере лесных ресурсов, а также обостряют экологические проблемы, являются ветровалы, буреломы, усыхания насаждений и лесные

пожары. Такие стихийные бедствия являются стохастическими и непредсказуемыми, которые невозможно спрогнозировать с достаточной степенью вероятности.

Учитывая тенденцию в изменении климата, многие специалисты предполагают дальнейшее усиление воздействия стихийных бедствий на лесной фонд, что и подтверждается статистикой последних лет [1–3].

Необходимо также отметить, что последствия от стихийных бедствий на лесные экосистемы наблюдаются в течение длительного времени. Так, после ветровалов и буреломов возрастает вероятность появления вторичных повреждений лесонасаждений, которые вызваны вредителями, болезнями леса и лесными пожарами. Это создает и дополнительную экономическую нагрузку для лесного хозяйства за счет снижения устойчивости, ухудшения качества оставшихся лесов и поврежденных деревьев [4–6].

Ввиду актуальности изучаемой проблемы и ее влияния на экономику, а также на экологию и социальную сферу в последние годы были выполнены некоторые исследования по оценке последствий стихийных бедствий в лесах. Такие исследования проводились в научно-исследовательском институте леса земли Баден-Вюртемберг (Германия), Белорусском государственном технологическом университете, Львовском лесотехническом университете (Украина) и др. Данные исследования ввиду важности и значимости проблемы финансировались в том числе международными организациями: FAO, Всемирным банком, фондом GFDDR.

Так, например, авторы в работе [7] разработали методологию оценки ущерба в лесу на основе полевых наблюдений, пространственных данных лесничеств и сведений действующих планов ведения лесного хозяйства.

Применение предиктивной аналитики в лесном хозяйстве рассмотрено в исследованиях Шубина И. В. [8].

Итальянские ученые Tampakis S., Papageorgiou A. [9] рассматривали элементы, связанные с пожарным риском и анализом его поведения, и подчеркивали важность моделирования и компьютерных технологий в борьбе с лесными пожарами.

Sikora A., Ukalska J. исследовали влияние увеличения лесохозяйственных мероприятий, вызванных стихийными бедствиями, на затраты отдельных основных единиц продукции [10].

Указанные и ряд других авторов внесли существенный вклад в разработку методов оценки последствий стихийных бедствий в лесах и приемов автоматизации расчетов. Однако в основном проводимые исследования были направлены на

изучение состоявшихся стихийных бедствий, их влияния на экономику, лесные экосистемы, оценку экономических потерь от стихийных бедствий. До настоящего времени для условий Республики Беларусь не выполнялись исследования, позволяющие оценить возможность прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесфонде и с учетом прогноза разработать способы их ликвидации и планирование мероприятий.

В этой связи одним из наиболее важных и актуальных направлений исследований в данной области является разработка методики оценки прогнозирования последствий стихийных бедствий, которая позволит ускорить принятие рациональных организационных и технических решений, сократить затраты на ликвидацию последствий.

В настоящее время активно используется такой метод анализа, как предиктивный для обработки и интерпретации информации с целью принятия правильных решений. Этот метод базируется на статистических моделях и позволяет находить закономерности в исторических и транзакционных данных, определять потенциальные риски и возможности. В качестве основы при выполнении анализа используется опыт аналогичных решений, принятых в прошлом. Главными принципами такой методики являются: классическая стратегия, теория вероятности, функциональная математика, теория игр, корреляционный анализ, экономическая закономерность, экстраполяция трендов и др. [11].

В настоящее время на практике используют три основных метода прогнозирования: метод математической статистики, экономической эффективности и программной системы [12].

Изучив и выполнив анализ различных методов, установили, что наиболее перспективными и современными с учетом развития информационных технологий являются программные методы прогнозирования, которые применяются для составления самых разнообразных прогнозов – от глобальных до локальных.

В рамках проводимых исследований и имеющихся исходных данных целесообразно выполнить анализ методов предиктивной аналитики и на базе наиболее эффективных разработать методику оценки и прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде.

Основная часть. На основании анализа методов прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде разработан алгоритм их оценки с применением теории игр.

Анализ программных методов прогнозирования последствий стихийных бедствий. В настоящее время применяется большое количество программных пакетов, например:

- MathCAD;
- MathLAB;

- Excel;
- Maple;
- Statistica и др. [13].

Выбор той или иной программы будет зависеть от следующих факторов:

- целевое назначение (численные и аналитические расчеты, решение задач математического анализа);
- возможности обработки данных (статистические расчеты);
- область объекта моделирования (построение графиков и диаграмм);
- сложность и разновидность проектируемого объекта (программирование, анимация);
- уровень комплексности (интеграция с САПР-системами, использование результатов вычислений в качестве управляющих параметров) [14].

Кроме программных пакетов есть также языки программирования, такие как C#, Java, C++ и другие, которые позволяют разрабатывать различные программы под определенные нужды.

На основании языков программирования также могут создаваться платформы рисков, сайты, которыми пользуются различные организации. Они позволяют накапливать данные, актуализировать их, иметь доступ к лесопользователям, лесфондодержателям для принятия своевременных решений.

Программные методы прогнозирования стихийных бедствий включают следующие этапы:

- характеристика объекта исследования;
- сбор исходных данных;
- выбор и подтверждение программной методики;
- обработка информации;
- приобретение дополнительных характеристик;
- прогнозирование последствий стихийного бедствия;
- получение результата об объекте исследования [15].

Альтернативным вариантом может стать применение нескольких видов программ, каждая из которых будет использоваться на отдельных стадиях исследовательской работы.

При создании прогностической модели должны выполняться три основных условия:

- выявление факторов, имеющих существенное значение для предсказания;
- определение действительного отношения факторов к предсказуемому явлению;
- разработка алгоритма и программы.

Выполнив анализ различных методов, установили, что для решения задачи прогнозирования последствий стихийных бедствий на базе математических моделей может быть применен программный пакет MathCAD.

MathCAD – инженерное, математическое программное обеспечение, которое позволяет выполнять и анализировать важнейшие инженерные расчеты, обмениваться ими [16]. Здесь процесс вычислений сильно автоматизирован, что позволяет экономить время и больше внимания уделять физическому смыслу получаемого результата.

Методика прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде по критериям Сэвиджа и Вальда в программе MathCAD. На основании анализа различных математических методов прогнозирования установлено, что наиболее целесообразными могут быть методы математической статистики, а именно метод *теории игр* по критерию Вальда и Сэвиджа.

Наибольшее распространение при прогнозировании событий в лесозаготовительном комплексе получили парные стратегические игры. Такие игры имеют два метода решения задач:

- 1) с противодействующим противником;
- 2) с объективной действительностью (природой).

Для прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде подходит второй метод решения задач с объективной действительностью (природой). Отличительная особенность игры с природой состоит в том, что в ней сознательно действует только один из участников, в большинстве случаев называемый игроком 1. Игроку 2 (природа) не важен результат, либо он не способен к осмысленным решениям. В данной методике условия не зависят от действий игрока, а определяются внешними природными факторами. Решение данной задачи может выполняться по оценке критериев Вальда или Сэвиджа [17]. При этом каждый из них имеет свою особенность.

Критерий Вальда. В качестве оптимальной выбирается стратегия, гарантирующая выигрыш не менее чем «нижняя цена игры с природой».

Критерий Сэвиджа. Оптимальной считается такая стратегия, при которой величина риска принимает наименьшее значение в самой неблагоприятной ситуации.

Алгоритм выполнения исследований с применением MathCAD. Основным преимуществом использования программы MathCAD для решения поставленной задачи является сокращение трудоемкости и времени на проведение расчетов и создание моделей исследований. Но в то же время стоит принять во внимание, что качественное выполнение моделирования и расчетов в программной среде зависит от наличия необходимых данных.

Поэтому первоначальная стадия работ для проведения вычислительных экспериментов в MathCAD должна включать в себя формулировку

целей и задач проводимых исследований, сбор и подготовку исходных данных, разработку математического обеспечения, получение результатов аналитических и экспериментальных исследований [18].

Необходимый набор исходных данных будет формулироваться на основании объектов исследований, поставленных задач по изучению определенных процессов и получению конкретных данных. Исходными данными для прогнозирования последствий стихийных бедствий являются: объем поврежденной древесины, затраты на заготовку 1 м³ древесины, затраты на вывозку, потери от ухудшения товарной структуры заготавливаемой древесины, потери за счет снижения прироста древесины в поврежденных насаждениях. Эти исходные данные подразделяются на следующие категории:

- 1) природно-эксплуатационные – площадь, время года, климатические условия;
- 2) объемные – объем поврежденной древесины, объем работ при ликвидации последствий стихийных бедствий;
- 3) экономические – снижение стоимости на лесоматериалы ввиду их низкого качества, затраты на ликвидацию последствий, затраты на лесовосстановление, затраты на защиту лесов и др.;
- 4) экологические – необходимость в последующем лесовосстановлении, учет потерь экосистемных услуг, лесной среды.

Перечень задаваемых параметров будет зависеть от принятой модели прогнозирования.

Проведение анализа в программе MathCAD предусматривает определение основных параметров: площади поврежденного лесфонда, времени года, объемов поврежденной древесины, затрат на ликвидацию.

При этом в качестве построения модели для оценки ликвидации последствий стихийного бедствия в лесном фонде вводятся следующие обозначения, например: игрок A_i (A_1, A_2, A_n) может выступать за лесохозяйственное учреждение, а игрок P_j (P_1, P_2, P_3, P_n) – в качестве последствий стихийного бедствия с такими альтернативами, как объем поврежденной древесины, время на ликвидацию, затраты на заготовку поврежденной древесины в единицу времени, лесовосстановление поврежденного лесфонда и др. Выигрышем для игрока A_i в нашем случае будет являться прибыль от реализации поврежденной древесины одного из вариантов или минимизация затрат на ликвидацию последствий стихийного бедствия.

Исследование данных параметров необходимо проводить путем варьирования следующих показателей:

- P_1 – объем поврежденной древесины, млн м³;
 P_2 – затраты на заготовку 1 м³, руб.;

P_3 – затраты на вывозку 1 м³, руб.;

P_4 – потери от ухудшения товарной структуры заготавливаемой древесины, руб.;

P_5 – потери за счет снижения прироста древесины в поврежденных насаждениях, руб.

Оценка точности полученных результатов будет осуществляться путем сравнения их с теоретическими данными при использовании разработанной математической модели и/или с экспериментальными данными.

Пример расчета по разработанному алгоритму. В соответствии с программным методом системных матриц в условиях природной неопределенности выработка решения начинается с анализа результатов предполагаемого решения при различных вариантах условий обстановки (видах стихийных бедствий: ветровалах, буреломах, пожарах и т. д. и их параметрах).

Каждое предполагаемое решение от последствий стихийных бедствий в лесфонде сопоставляется с каждым вариантом обстановки, и определяется значение эффективности этого решения в данных условиях.

Следовательно, задачу принятия решения в условиях природной неопределенности можно сформулировать следующим образом:

- а) известны исходные величины, которые представлены в виде матрицы эффективности:
 - перечень предполагаемых решений A_i ;
 - перечень возможных вариантов условий обстановки P_j ;
 - значения эффективности E_{ij} для каждого i -го решения и j -го варианта условий обстановки;
- б) нужно выбрать оптимальное решение по ликвидации последствий стихийного бедствия:
 - сформировать матрицу эффективности, элементами которой являются значения эффективности E_{ij} ;
 - упорядочить решения путем выполнения операций определения следующих значений: среднего, минимального, максимального, усредненного и т. п.;
 - сформировать системную матрицу, элементами которой являются упорядоченные значения;
 - выбрать оптимальный вариант предполагаемого решения на основе матрицы эффективности, системной матрицы и критериев оптимальности.

Примеры матриц эффективности для такого стихийного бедствия, как ветровал, прошедший в Чаусском лесхозе, представлены на рис. 1.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	min
max						

Рис. 1. Матрица эффективности при ветровале

В нижней строке матрицы представлены максимальные значения по каждому условию обстановки Π_j (по каждому столбцу матрицы).

Следовательно, математическая задача с применением метода теории игр в программе MathCAD в условиях природной неопределенности решается следующим образом (на примере решения по критерию Сэвиджа).

1. Составляют две матрицы эффективности по критерию Сэвиджа, элементами которой являются значения эффективности E_{ij} (max и min), представленные в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Матрица показателей по критерию Сэвиджа

Сроки	Показатели				
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5
1 мес	1,720	28,0	14,8	11,5	3,5
2 мес	1,720	29,5	13,4	12,2	3,52
3 мес	1,720	30,7	12,7	12,9	3,54
6 мес	1,720	35,2	10,2	17,4	3,9
1 год	1,720	39,4	9,4	22,1	4,2
max	1,720	39,4	14,8	22,1	4,2

Таблица 2
Матрица остатков по критерию Сэвиджа

Сроки	Показатели					
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	max
1 мес	1,720	11,4	0	10,6	0,7	11,4
2 мес	1,720	9,9	1,4	9,9	0,68	9,9
3 мес	1,720	8,7	2,1	9,2	0,66	9,2
6 мес	1,720	4,2	4,6	4,7	0,3	4,7
1 год	1,720	0	5,4	0	0	5,4

2. Проводят обработку данных путем определения следующих значений: среднего, минимального, максимального, усредненного и т. п.;

$$M := \begin{pmatrix} 28.0 & 14.8 & 11.5 & 3.5 \\ 29.5 & 13.4 & 12.2 & 3.52 \\ 30.7 & 12.7 & 12.9 & 3.54 \\ 35.2 & 10.2 & 17.4 & 3.9 \\ 39.4 & 9.4 & 22.1 & 4.2 \end{pmatrix}.$$

3. Составляют системный код, элементами которого являются упорядоченные символы:

```

ORIGIN:=1
maxCols(M) := for c ∈ ORIGIN..ORIGIN-1 + cols(M)
               | Rc ← max(M(c))
               | R
maxM := maxCols(M).
```

4. Выбирают оптимальный вариант предполагаемого решения на основе матрицы

эффективности, системной матрицы и критериев оптимальности:

$$\max M = \begin{pmatrix} 39.4 \\ 14.8 \\ 22.1 \\ 4.2 \end{pmatrix}.$$

5. Составляют системный код для max и min значений матрицы:

```

risks(M, maxM) := M ← MT
                  | for c ∈ ORIGIN..ORIGIN-1 + cols(M)
                  | R(c) ← maxM - M(c)
                  | R ← RT
```

K := risks (M, max M).

6. Проводят расчет эффективности по матричным остаткам:

$$K = \begin{pmatrix} 11.4 & 0 & 10.6 & 0.7 \\ 9.9 & 1.4 & 9.9 & 0.68 \\ 8.7 & 2.1 & 9.2 & 0.66 \\ 4.2 & 4.6 & 4.7 & 0.3 \\ 0 & 5.4 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

7. Составляют системный код, элементами которого являются упорядоченные символы матричных остатков:

```

maxRows(K) := K ← KT
              | for c ∈ ORIGIN..ORIGIN-1 + cols(K)
              | Rc ← max(K(c))
              | R
```

8. Производят вычисления в программе и получают минимальный риск при всевозможных благоприятных ситуациях:

$$\maxRows(K) = \begin{pmatrix} 11.4 \\ 9.9 \\ 9.2 \\ 4.7 \\ 5.4 \end{pmatrix} \quad \text{time} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 6 \\ 12 \end{pmatrix}.$$

F := min (max Rows (K)),

где match (F, maxRows(K)) = (4) – строка, соответствующая решению; F = 4,7 – минимальный риск при всевозможных неблагоприятных ситуациях.

9. На основании полученных данных строят график (рис. 2).

Вывод по критерию Сэвиджа: при наименее благоприятных условиях обстановки по каждому решению (периоду времени) риски имеют минимум, поэтому, согласно критерию Сэвиджа,

оптимальным решением является период времени, равный 6 месяцам (предпоследнее решение).

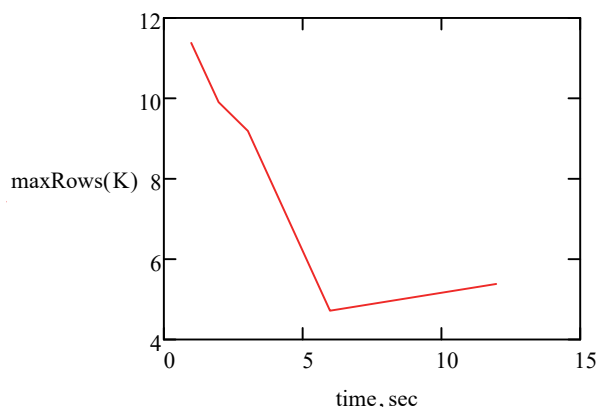


Рис. 2. График расчетов по критерию Сэвиджа

Аналогичен подход в составлении программы для решения задачи по критерию Вальда, однако она решается в 5 этапов с составлением матрицы показателей, как и по критерию Сэвиджа, и направлена на поиск максимального риска при всевозможных благоприятных ситуациях (рис. 3).

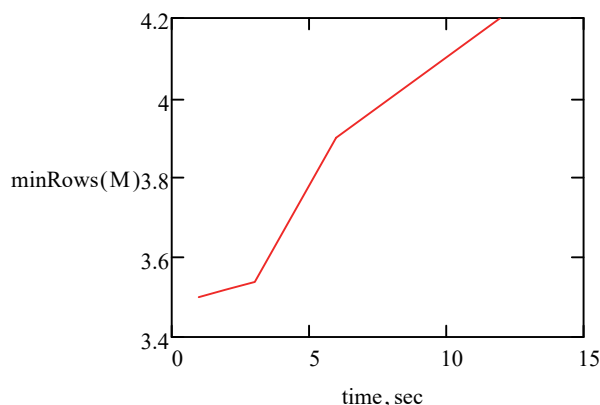


Рис. 3. График расчетов по критерию Вальда

Вывод по критерию Вальда: при наиболее благоприятных условиях обстановки по каждому решению (периоду времени) риски растут,

и по критерию Вальда оптимальным решением является наибольший период времени.

Заключение. Результаты, представленные в данной статье, получены путем анализа программных и математических методов и их возможностей в выполнении задач и составлении прогнозных моделей по оценке ликвидации стихийных бедствий в лесах.

С учетом специфики и параметров лесопользования для решения поставленной задачи принят метод теории игр по критериям Сэвиджа и Вальда.

Разработана методика прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде по критериям Сэвиджа и Вальда и алгоритм выполнения исследований с применением программы MathCAD.

Разработанная методика на основании реальных исходных данных, полученных по результатам случившегося в 2023 г. в Чаусском лесхозе ветровала, прошла апробацию и показала свою эффективность.

Установлено, что точность полученных результатов существенно зависит от подбора исходных данных и составления матриц показателей, что требует сбора и актуализации статистических данных в лесохозяйственных учреждениях. Необходимый набор исходных параметров должен формулироваться на основании анализа объектов исследований, поставленных задач по изучению определенных процессов и получению конкретных данных.

Для более детальной оценки и прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде при использовании теории игр оценка должна проводиться по двум критериям (Сэвиджа и Вальда) с последующим сравнительным анализом.

На практике разработанная методика может применяться при подготовке прогнозов и оценке затрат на ликвидацию последствий стихийных бедствий в лесном фонде, что позволит сократить время принятия решений, сделать их более точными и рациональными и снизить организационные и эксплуатационные затраты.

Список литературы

1. Протас П. А., Ледницкий А. В., Мисуно Ю. И. Экономическая оценка потерь в результате стихийных бедствий в лесном секторе Беларуси в контексте климатических изменений // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов 2018. № 1. С. 14–18.
2. Евкович И. А., Протас П. А. Повышение эффективности освоения труднодоступных и ветровальных участков лесфонда // Импортзамещение, научно-техническая и экономическая безопасность: сб. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2022», Минск, 7 дек. 2022 г.: в 3 т. Минск, 2022. Т. 3. С. 116–120.
3. Экономическая оценка потерь в результате стихийных бедствий в лесном секторе Беларуси в контексте климатических изменений: современное состояние и направления совершенствования с учетом международного опыта / А. В. Ледницкий [и др.]. Минск: World Bank Group, 2018. 123 с.

4. Протас П. А., Завойских Г. И., Федоренчик А. С. Классификация ветровально-буреломных лесосек с учетом эксплуатационных особенностей их освоения // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 51–52.
5. Протас П. А., Федоренчик А. С. Особенности разработки ветровально-буреломных лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: материалы междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 25–27 марта 2014. Воронеж, 2014. № 2. Ч. 3. С. 202–206.
6. Состояние ветровально-буреломного лесфонда в Республике Беларусь и проблемы его освоения / П. А. Протас [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 55–57.
7. Assessment of Forest Damage in Croatia Caused by Natural Hazards in 2014 / D. Vuletić [et al.] // Southeast Eur. 2014. № 5 (1). P. 65–79. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.14-07>.
8. Шубин И. В. Прогнозирование лесопользования и совершенствование планирования качественного состава лесов на основе автоматизации расчетов (на примере БССР): дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Минск, 1982. 171 с.
9. The forest fires in the Mediterranean from a policy point of view / S. Tampakis [et al.] // Mediterranean Journal of Economics, Agriculture, and Environment. 2005. № 3. P. 47–51.
10. Sikora A. T., Ukalska J. The main costs of natural disasters in the Forest District of Węgierska Gyrka // Leśne Prace Badawcze. 2014. Vol. 75 (3). P. 263–275.
11. Евкович И. А., Протас П. А. Предикивная аналитика и ее применение в лесопромышленном производстве // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 87-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 36–39.
12. Предикивная аналитика // Клеверенс. URL: <https://www.cleverence.ru/articles/auto-busines/prediktivnaya-analitika-chto-eto-takoe-metody-i-instrumenty-prognosticheskogo-analiza/> (дата обращения: 02.03.2023).
13. Программные методы математической статистики // Витеб. ордена «Знак почета» гос. акад. ветеренар. медицины. URL: <https://www.vsavm.by/knigi/kniga3/1290.html> (дата обращения: 02.11.2023).
14. Луцко Н. Я., Кавальчук О. Н. Инженерные расчеты в Mathcad. Минск: БНТУ, 2018. 46 с.
15. Евкович И. А., Протас П. А. Методы прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесном фонде // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: XVIII Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Екатеринбург, 4–15 апр. 2022 г. Екатеринбург, 2022. С. 111–115.
16. Математический пакет MathCAD // Поиск лекций. URL: <https://poisk-gu.ru/s59151t1.html> (дата обращения: 04.11.2023).
17. Игнатенко В. В., Турлай И. В., Федоренчик А. С. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. Минск: БГТУ, 2004. 178 с.
18. Применение современных компьютерных программ при решении задач прогнозирования // Библиофонд. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=787249> (дата обращения: 10.11.2023).

References

1. Protas P. A., Lednitsky A. V., Misuno Yu. I. Economic assessment of losses as a result of natural disasters in the forest sector of Belarus in the context of climate change. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 1, pp. 14–18 (In Russian).
2. Evkovich I. A., Protas P. A. Increasing the efficiency of development of hard-to-reach and windfall areas of the forest fund. *Importozameshcheniye, nauchno-tekhnicheskaya i ekonomicheskaya bezopasnost': sbornik statey V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Minskiye nauchnyye chteniya-2022"* [Import substitution, scientific, technical and economic security: collection of articles of the V International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings-2022"]. Minsk, 2022, vol. 3, pp. 116–120 (In Russian).
3. Lednitsky A. V., Shoshin A. O., Yarmolovich V. A., Malashevich D. G., Protas P. A., Misuno Yu. I. *Ekonomicheskaya otsenka poter' v rezul'tate stikhiynykh bedstviy v lesnom sektore Belarusi v kontekste klimaticheskikh izmeneniy: sovremennoye sostoyaniye i napravleniya sovershenstvovaniya s uchetom mezhdunarodnogo opyta* [Economic assessment of losses due to natural disasters in the forest sector of Belarus in the context of climate change: current state and directions for improvement, taking into account international experience]. Minsk, World Bank Group Publ., 2018. 123 p. (In Russian).
4. Protas P. A., Zavoiskikh G. I., Fedorenchik A. S. Classification of windy-deadfall cutting areas taking into account the operational features of their development. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 51–52 (In Russian).
5. Protas P. A., Fedorenchik A. S. Features of the development of windfall forests. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy*

konferentsii [Current directions of scientific research of the 21st century: theory and practice: materials of the international scientific-technical conference]. Voronezh, 2014, no. 2, part 3, pp. 202–206 (In Russian).

6. Protas P. A., Fedorenchik A. S., Lednitsky A. V., Zavoiskikh G. I. The state of the windy-deadfall forest fund in the Republic of Belarus and the problems of its development. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 55–57 (In Russian).

7. Vuletić D., Kauzlaric Z., Balenovic I., Krajter G., Ostoic S. Assessment of Forest Damage in Croatia Caused by Natural Hazards in 2014. *Southeast Eur.* 2014, no. 5 (1), pp. 65–79. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.14-07>.

8. Shubin I. V. *Prognozirovaniye lesopol'zovaniya i sovershenstvovaniye planirovaniya kachestvennogo sostava lesov (na primere BSSR). Dissertatsiya kandidata ekonomicheskikh nauk* [Forecasting forest management and improving the planning of the qualitative composition of forests based on automation of calculations (using the example of the BSSR). Dissertation PhD (Economic). Minsk, 1982. 171 p. (In Russian).

9. Tampakis S., Papageorgiou A., Karanikola P., Arabatzis G. The forest fires in the Mediterranean from a political point of view. *Mediterranean Journal of Economics, Agriculture, and Environment*, 2005, no. 3, pp. 47–51.

10. Sikora A. T., Ukalska J. The main costs of natural disasters in the Forest District of Węgierska Góra. *Leśne Prace Badawcze*, 2014, vol. 75 (3), pp. 263–275.

11. Evkovich I. A., Protas P. A. Predictive analytics and its application in the forest industry. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry engineering, materials science and design: materials of the 87th scientific and technical conference of faculty and research workers and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 36–39 (In Russian).

12. Predictive analytics. Available at: <https://www.cleverence.ru/articles/auto-busines/prediktivnaya-analitika-chto-eto-takoe-metody-i-instrumenty-prognosticheskogo-analiza/> (accessed 03.02.2023) (In Russian).

13. Software methods of mathematical statistics. Available at: <https://www.vsavm.by/knigi/kniga3/1290.html> (accessed 02.11.2023) (In Russian).

14. Lutsko N. Ya., Kavalchuk O. N. *Inzhenernyye raschety v Mathcad* [Engineering calculations in Mathcad]. Minsk, BNTU Publ., 2018. 46 p. (In Russian).

15. Evkovich I. A., Protas P. A. Methods for forecasting the consequences of natural disasters in the forest fund. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: materialy XVIII Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Scientific creativity of youth – the forest complex of Russia. XIX All-Russian (national) scientific and technical conference of students and graduate students]. Ekaterinburg, 2022, pp. 111–115 (In Russian).

16. Mathematical package MathCAD. Available at: <https://poisk-ru.ru/s59151t1.html> (accessed 04.11.2023) (In Russian).

17. Ignatenko V. V., Turlay I. V., Fedorenchik A. S. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov lesozagotovok* [Modeling and optimization of logging processes]. Minsk, BSTU Publ., 2004. 178 p. (In Russian).

18. Application of modern computer programs in solving forecasting problems. Available at: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=787249> (accessed 10.11.2023) (In Russian).

Информация об авторах

Евкович Ирина Александровна – магистрант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: evcovich.irina@mail.ru

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

Information about the authors

Evkovich Irina Aleksandrovna – Master's degree student, 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: evcovich.irina@mail.ru

Protas Pavel Aleksandrovich – 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: protas@belstu.by

Поступила 18.10.2023

УДК 629.735.4-519:630*5

А. А. Петровская, С. П. Мохов

Белорусский государственный технологический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРНО-КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДРЕВОСТОЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДРОНОВ И МЕТОДОВ
НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

В настоящее время для решения задач мониторинга и оценки лесных насаждений использование измерительных методов и средств лазерного сканирования является одним из наиболее актуальных и приоритетных направлений. Такое измерение может выполняться самостоятельно или в комплексе с воздушной видеосъемкой, а также может осуществляться наземными исследованиями на пробных площадях. По ряду показателей лазерное сканирование превосходит другие известные на сегодняшний день дистанционные методы оценки качественных и количественных характеристик лесного фонда, такие как аэрофотосъемка, зондирование земли и др. Использование воздушного и наземного мониторинга лесных насаждений с применением лазеров позволяет достигать высокой точности измерения основных лесотаксационных параметров.

Сформированные методические принципы и приемы целесообразно использовать при разработке конкретных методик определения показателей как отдельных факторов, указывающих на соответствующие виды доступности лесов. Так как рубки ухода требуют более детального исследования (а именно: необходимо выяснить данные по распределению деревьев в древостое и его доступности, получить более точные размерно-качественные показатели с учетом расположения деревьев), в данной публикации рассмотрен способ определения размерно-качественных показателей древостоя с помощью беспилотных летательных аппаратов совместно с наземными лазерными сканерами. Они позволяют с высокой точностью устанавливать: породный (видовой) состав лесного фонда, измерять диаметры древесного ствола на любой высоте, высоту деревьев, выявлять основные пороки древесины, площадь поперечного сечения, сортиментный общий и видовой запас древесины.

Ключевые слова: размерно-качественные показатели древостоя, дрон, лазерные сканеры.

Для цитирования: Петровская А. А., Мохов С. П. Определение размерно-качественных показателей древостоя с применением дронов и методов наземного лазерного сканирования // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 120–124. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-16.

A. A. Petrovskaya, S. P. Mokhov

Belarusian State Technological University

**DETERMINATION OF DIMENSIONAL AND QUALITY INDICATORS
OF THE TREE STAND USING DRONES AND METHODS
GROUND-BASED LASER SCANNING**

Currently, the use of measuring methods and laser scanning tools is one of the most relevant and priority areas for solving the problems of monitoring and evaluation of forest plantations. Such measurement can be carried out independently or in combination with aerial video shooting, and can also be carried out by ground studies on test areas. According to a number of indicators, laser scanning surpasses others known today, such as aerial photography, earth sounding, etc., remote methods for assessing the qualitative and quantitative characteristics of the forest fund. The use of aerial and ground laser scanning in combination will allow achieving high accuracy in determining the main forest taxation parameters.

It is advisable to use the formed methodological principles and techniques when developing specific methods for determining indicators as separate factors determining the appropriate types of forest availability. Since logging of machine complexes requires more detailed research, namely, it is necessary to have data on the distribution of trees in the stand, their availability, more accurate dimensional and quality indicators taking into account the location of trees, this article discusses a method for measuring the size and quality indicators of a stand based on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in conjunction with ground-based laser scanners. They allow to measure with high accuracy the main forest taxational characteristics: the species (species) composition of the forest fund, the diameters of the tree trunk at any height, the height of trees, the main defects of wood, the cross-sectional area, the sortable total and sortable stock of wood.

Keywords: dimensional and quality indicators of the tree stand, drone, laser scanners.

For citation: Petrovskaya A. A., Mokhov S. P. Determination of dimensional and quality indicators of the tree stand using drones and ground-based laser scanning methods. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 120–124 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-16.

Введение. Для оценки и учета древостоев разработаны таксационные показатели, которые отражены в ряде таблиц: сортиментные и товарные таблицы (Н. П. Анучин), таблицы хода роста насаждений (В. В. Загреев), бонитетная шкала (М. М. Орлов) [1–3] и др. Данные показатели способствуют распределению лесного фонда по классам возраста, классам бонитета, полнотам, типам леса, среднему диаметру древостоя, средней высоте и распределению запасов по классам товарности. Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений состоит из общей характеристики лесов лесохозяйственных учреждений, для которых разрабатываются проектируемые мероприятия, характеристики и анализ насаждений на пробных площадях, закладываемых для оценки эффективности мероприятий (технологий), их влияния на рост, развитие и продуктивность насаждений и т. д. Общая характеристика включает анализ видовой, типологической, возрастной, полнотной структуры рассматриваемой части (или всех) лесов лесничества и других показателей.

Также ранее разработаны методики определения данных показателей, методы таксации, учета, отвода лесосек, которые регламентируются такими документами, как ТКП 622-2018 «Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь», правила отвода и таксации лесосек, санитарные правила, в том числе с использованием информационных систем и технологий в АРМ «Лесопользование» [4–6]. Они включают в себя таблицы на основе проводимых ранее экспериментальных исследований, которые позволяют проводить отвод и таксацию лесосек, оценку показателей древостоя и т. д. Комплекс таксационных показателей достаточно эффективно отображает характеристики древостоев и позволяет планировать лесохозяйственные мероприятия.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что в настоящее время существует

достаточное количество различных методов определения показателей древостоя, которые имеют свои особенности.

Однако для планирования рубок ухода машинными способами с учетом доступности древостоя кроме имеющихся показателей необходимо знать особенности распределения деревьев в древостое и зависящие от этого детальные размерно-качественные показатели, для определения которых в нашей работе использовались беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и наземные лазерные сканеры (НЛС).

Основная часть. В настоящее время при оценке доступности древостоя подразумевают произрастание деревьев по закону нормального распределения. Если для планирования работы на сплошных рубках этого может быть достаточно, то на рубках ухода машинными комплексами это является спорным моментом и требует более детального проведения данного исследования [7].

Распределение показателей древостоя может зависеть от разных факторов, в связи с чем для установления более точной закономерности необходимо провести большое количество измерений (рис. 1). Исходя из этого с целью сокращения трудозатрат данные измерения предлагается осуществлять с использованием беспилотных летательных аппаратов (дронов) и методов наземного лазерного сканирования [8].

В последнее время технология НЛС все шире используется для решения задач в лесном хозяйстве [9, 10]. Она представляет собой активный метод съемок, который работает аналогично воздушному лазерному сканированию, но со статических положений [11]. Принцип работы НЛС заключается в получении трехмерных моделей исследуемого участка лесного фонда. Технология основана на излучении-приеме лазерного луча, который отклоняется зеркалом и автоматически сканирует местность, при этом лазер отражается от первого встреченного объекта.



Рис. 1. Показатели, влияющие на доступность древостоя

В результате съемки лазерным сканером получается несколько облаков точек. Для того чтобы измерить объект полностью и получить точные результаты, его нужно отсканировать со всех сторон. Основной формой представления результатов наземного лазерного сканирования является массив (облако) точек. Результатом работы НЛС является трехмерная модель участка лесонасаждения, которая описывается множеством точек, с пространственными координатами X, Y, Z . С помощью наземных лазерных сканеров определяются основные лесотаксационные характеристики: породный (видовой) состав лесного фонда, диаметры древесного ствола на любой высоте, высота деревьев, основные пороки древесины, площадь поперечного сечения, сортиментный общий и видовой запас древесины [12–14]. На сегодняшний день выпускаются НЛС таких производителей, как RIEGL (Австрия), Leica (Швеция), Trimble (США) и др. Принцип действия наземных лазерных сканеров показан на рис. 2.

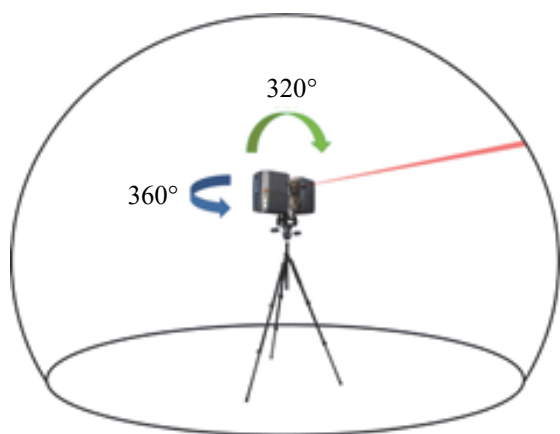


Рис. 2. Принцип действия наземного лазерного сканера

Рубки ухода машинным способом требуют качественного подхода в организации работы, выборке и применении машин, чтобы с минимальными повреждениями древостоя обеспечить необходимое изъятие худших деревьев [15].

Предложен способ измерения размерно-качественных показателей древостоя на основе использования БПЛА и НЛС. Работа заключается в следующем: на делянке отводится участок (выдел), где будут закладываться временные пробные площадки (ВПП) (размер пробной площади зависит от породы, возраста насаждений, полноты и условий роста). После чего по периметру пробной площадки устанавливаются наземные лазерные сканеры, которые оценивают и фиксируют древостой, выполняя измерения различных геометрических параметров (расстояния, углы, диаметры, радиусы кривизны и т. д.). Особенно

важным является тот факт, что системы НЛС позволяют производить высокоточные измерения удаленных объектов с недоступной ранее скоростью до 976 000 точек/с на расстоянии до 153 м со следующими углами поля зрения: вертикальный – до 320°, горизонтальный – 360°. При этом величина углового шага сканирования может достигать 0,01° с точностью измерения до 0,009°. Разрешение измерительного блока составляет 0,07 мм [16]. Далее над участком запускается дрон для съемки пробной площади сверху. После чего совмещаются и сравниваются показатели дрона и лазерных сканеров, их данные обрабатываются с использованием средств программного обеспечения (ПО). После первичной обработки выполняется построение векторных моделей (рис. 3).

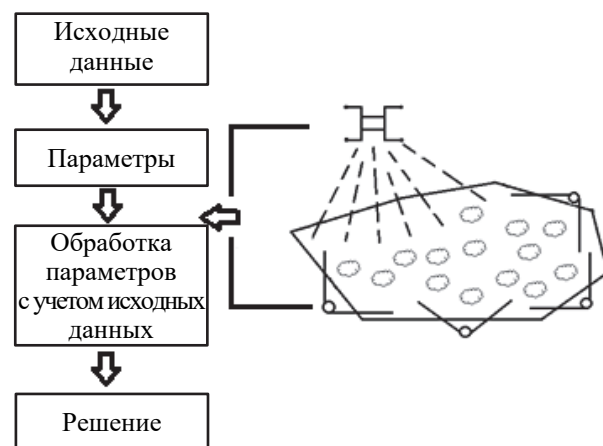


Рис. 3. Способ измерения размерно-качественных показателей древостоя

Полученные векторные данные переносятся в программы трехмерной векторной графики, такие как AutoCad, ArcView и др.

Данный способ позволяет получить наиболее точные размерно-качественные показатели лесных насаждений, которые будут влиять на доступность древостоя. В дальнейших исследованиях планируется провести апробацию данного метода с учетом рассматриваемых выше показателей.

Для контроля данных единичные участки могут проверяться стандартными методами таксации, после чего сравниваются измеренные показатели.

Заключение. При установлении таксационных показателей насаждений рекомендуется применять предложенный в данной статье способ определения размерно-качественных показателей древостоя с применением БПЛА и методов наземного лазерного сканирования. Для решения задач лесоустройства, осуществления различного вида мониторинга, моделирования динамики древостоя наиболее перспективным методом оценки лесных насаждений

является НЛС в сочетании с воздушной съемкой БПЛА. Использование методов и средств воздушной съемки и сканирования для оценки лесного покрова позволят в значительной мере

повысить эффективность и точность определения основных лесотаксационных показателей лесных насаждений при оценке качественных и количественных характеристик лесного фонда.

Список литературы

1. Анучин Н. П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
2. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребов [и др.]. М.: Колос, 1992. 495 с.
3. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / под общ. ред. В. Ф. Багинского. М.: ЦБНТИ-лесхоз, 1984. 300 с.
4. Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь: ТКП 622-2018. Минск: Белгипролес, 2018. 110 с.
5. Об утверждении Правил отвода и таксации лесосек в лесах Республики Беларусь: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 26.12.2016, № 84 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631598> (дата обращения: 20.10.2023).
6. Об утверждении санитарных норм и правил: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 13.07.2023, № 113 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631598> (дата обращения: 20.10.2023).
7. Давыдов А. В. Рубки ухода за лесом. М.: Лесная пром-сть, 1971. 184 с.
8. Варыгин К. А., Данилин И. М., Рыльский И. А. Инвентаризация и мониторинг лесов на основе лазерной локации, цифровой аэро- и космической фотосъемки и спутникового геопозиционирования // Материалы 3-й Междунар. практ. конф. по лесоустройству. Новосибирск, 29 нояб. – 1 дек. 2012 г. Новосибирск, 2012. С. 56–59.
9. Данилин И. М., Медведев Е. М. Некоторые результаты международного проекта по исследованию возможностей лазерной, радарной и цифровой аэросъемки лесов // Лесной журн. 2008. № 1. С. 15–23.
10. Рыльский И. А., Малеванная М. С. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. 2014. № 5 (4). С. 23–34.
11. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геолидар: Геокосмос; Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. 230 с.
12. Calculation of live tree timber volume based on particle swarm optimization and support vector regression / J. Youquan [et al.] // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2013. Vol. 29. P. 160–167.
13. New hybrid algorithms for estimating tree stem diameters at breast height using a two dimensional terrestrial laser scanner / J. Kong [et al.] // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 15661–15683.
14. Данилин И. М., Фаворская М. Н. Трехмерное моделирование лесных ландшафтных сцен на основе данных дистанционного зондирования // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 151–159.
15. Духовник А. А., Мохов С. П. Оценка методов и приемов проведения рубок ухода за лесом системой машин «харвестер – форвардер» в Республике Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 88–97.
16. Технические характеристики FARO Laser Scanner Photon 120/20 // FARO Sphere XG. URL: http://metrologiold.metrolog.tnweb.ru/img/flash/browyri/trexmer_kontr/laser_scanner/techsheet_photon120_ru_fin.pdf (дата обращения: 20.10.2023).

References

1. Anuchin N. P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest Taxation]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russian).
2. Zagreev V. V., Sukhoi V. I., Shvidenko A. Z., Gusev N. N., Moshkalev A. G. *Obshchesoyuznyye normativy dlya taksatsii lesov* [All-Union standards for forest taxation]. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p. (In Russian).
3. Baginskiy V. F. *Normativnye materialy dlya taksatsii lesa Belorusskoy SSR* [Normative materials for forest taxation of the Belarusian SSR]. Minsk, CBNTI-forestry Publ., 1984. 300 p. (In Russian).
4. ТКП 622-2018. Technical requirements for forest management. Allotment and taxation of cutting areas in the forests of the Republic of Belarus. Minsk, Belgiproles Publ., 2018. 110 p. (In Russian).
5. On the approval of the Rules of allotment and taxation of cutting areas in the forests of the Republic of Belarus: resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 26.12.2016, no. 84. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631598> (accessed 20.10.2023) (In Russian).

6. On the approval of sanitary norms and rules: Resolution of the Ministry of Health Republic of Belarus, 13.07.2023, no. 113. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631598> (accessed 20.10.2023) (In Russian).
7. Davydov A. V. *Rubki ukhoda za lesom* [Forest thinning]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 184 p. (In Russian).
8. Varygin K. A., Danilin I. M., Rylskiy I. A. Forest Inventory and Monitoring Based on Laser Detection and Ranging, Digital Aerial and Space Photography and Satellite Geolocation. *Materialy 3-y Mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii po lesoustroystvu* [Proceedings of the 3rd International Practical Conference on Forest Management]. Novosibirsk, 2012, pp. 56–59 (In Russian).
9. Danilin I. M., Medvedev E. M. Some Results of International Project on Investigation of Possibilities for Laser, Radar and Digital Aerial Survey of Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2008, no. 1, pp. 15–23 (In Russian).
10. Rylskiy I. A., Malevannaya M. S. Terrestrial laser methods – new approaches to information support for geographical research. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography], 2014, no. 5 (4), pp. 23–34 (In Russian).
11. Medvedev E. M., Danilin I. M., Melnikov S. R. *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa* [Laser location of land and forests]. Moscow, Geolidar Publ., Geokosmos Publ.; Krasnoyarsk, Sukachev Institut of Forest Publ., 2007. 230 p. (In Russian).
12. Youquan J., Lixi Z., Ou D., Weiheng X., Zhongke F. Calculation of live tree timber volume based on particle swarm optimization and support vector regression. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, vol. 29, pp. 160–167.
13. Kong J., Ding X., Liu J., Yan L., Wang J. New hybrid algorithms for estimating tree stem diameters at breast height using a two dimensional terrestrial laser scanner. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 15661–15683.
14. Danilin I. M., Favorskaya M. N. *Trekhmernoye modelirovaniye lesnykh landshaftnykh stsen na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Three-dimensional modeling of forest landscape scenes, based on remote sensing data], 2013, no. 2, pp. 151–159 (In Russian).
15. Dukhovnik A. A., Mokhov S. P. Evaluation of methods and techniques for preparation felling behind the forest with system of machines “harvest – forwarder” in the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 1 (264), pp. 88–97 (In Russian).
16. Technical characteristics of FARO® Laser Scanner Photon 120/20. Available at: http://metrologiold.lmetrolog.tmweb.ru/img/flash/browyri/trexmer_kontr/laser_scanner/techsheet_photon120_ru_fin.pdf (accessed 20.10.2023) (In Russian).

Информация об авторах

Петровская Алеся Александровна – аспирант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alesya.duhovnik@mail.ru

Мохов Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

Information about the authors

Petrovskaya Alesya Aleksandrovna – PhD student, 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: alesya.duhovnik@mail.ru

Mokhov Sergey Petrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of 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: lmitlz@belstu.by

Поступила 23.10.2023

УДК 630*36:621.9

С. А. Голякевич¹, А. Р. Гороновский¹, В. А. Коробкин²¹Белорусский государственный технологический университет²Белорусский национальный технический университет**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

В статье изложена методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин. В основе методики лежит гипотеза о том, что все эксплуатационные свойства лесозаготовительных машин и их оценочные показатели на практике влияют на ограниченное число эксплуатационных потребительских качеств: эксплуатационную надежность, производительность, экономичность, безопасность и экологичность. Установлено, что все они могут быть оценены величинами полезно выполненной работы, затраченной энергии и времени на осуществление операции. Данные величины объединены в единый оценочный критерий энергетического потенциала производительности. Отмечено, что данные для расчета критерия могут быть получены как экспериментальным путем, так и теоретически на основе математического моделирования технологий работы, конструкций машин, энергопотребления и ресурса. Изложен порядок использования методики при получении данных теоретическим путем. Она разбита на ряд блоков, отвечающих за моделирование условий эксплуатации, общее моделирование технологического процесса, моделирование технологических операций, анализ эксплуатационных свойств, оценку ресурса машин, анализ подготовленности операторов и в целом за прогнозирование эффективности на основе работы предыдущих блоков. Даны ссылки на предыдущие работы авторов, в которых приводятся математические модели, лежащие в основе работы отдельных блоков методики, раскрывается вывод оценочного критерия.

Ключевые слова: харвестер, форвардер, рубильная машина, методика, эффективность, комплекс машин, технология, ресурс, энергопотребление, безопасность, экологичность.

Для цитирования: Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Коробкин В. А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 125–131. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17.

S. A. Golyakevich¹, A. R. Goronovsky¹, V. A. Korobkin²¹Belarusian State Technological University²Belarusian National Technical University**METHODOLOGY FOR PREDICTING THE EFFICIENCY
OF FORESTRY MACHINERY COMPLEXES**

The article outlines a methodology for predicting the efficiency of logging machine complexes. The methodology is based on the hypothesis that all operational properties of forestry machines and their evaluation indicators in practice determine a limited number of operational consumer qualities: operational reliability, productivity, efficiency, safety and environmental friendliness. It has been established that all of them can be assessed by the values of useful work performed, energy expended and time spent on performing the operation. These values are combined into a single evaluation criterion of the energy potential of productivity. It is noted that the criteria for calculating can be obtained both experimentally and theoretically on the basis of mathematical modeling of operating technologies, machine designs, energy consumption and resource. The procedure for using the methodology when obtaining data theoretically is outlined. The methodology is divided into a number of blocks responsible for modeling operating conditions, general modeling of the technological process, modeling technological operations, analysis of operational properties, assessment of machine life, analysis of operator preparedness and, in general, for forecasting efficiency based on the work of previous blocks. References are given to the author's previous works, which provide mathematical models underlying the work of individual blocks of the methodology, reveal the conclusion of the evaluation criterion.

Keywords: harvester, forwarder, chipper, methodology, efficiency, complex of machines, technology, resource, energy consumption, safety, environmental friendliness.

For citation: Golyakevich S. A., Goronovsky A. R., Korobkin V. A. Methodology for predicting the efficiency of forestry machinery complexes. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 125–131 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17.

Введение. Лесозаготовительное производство в нашей стране базируется на использовании многооперационных машин отечественного производства. На практике их объединяют в лесозаготовительные комплексы, состоящие из нескольких отдельных машин разного назначения, которые выполняют соответствующие операции определенного технологического процесса.

Конструкции таких машин стараются подбирать под природно-производственные условия, соответствующие конкретному предприятию. Такой выбор определяется требованиями по обеспечению каждой отдельной машиной заданного набора значимых эксплуатационных свойств [1]. Как правило, это оценки устойчивости, проходимости, маневренности машин, возможности взаимодействия с предметом труда, имеющим определенные характеристики и т. д. Важно заметить, что улучшение показателей одних свойств часто приводит к явному ухудшению других. Поэтому на практике, в конкретных условиях эксплуатации, показатели ряда свойств часто являются избыточными, другие, наоборот, — недостаточными. В качестве примера можно привести распространенные ситуации застревания машин в лесных почвогрунтах (недостаточная опорная проходимость) или постоянную работу на неполном вылете манипулятора (завышенный вылет или низкая устойчивость машины при работе с определенным предметом труда).

Практика объединения машин в лесозаготовительные комплексы, как правило, ограничивается базовыми принципами [2]: технологической совместимостью машин, кратностью их производительности, близостью конструкций базовых шасси и т. д.

На предприятиях лесного машиностроения при создании новых машин, как правило, руководствуются теми же принципами или создают машины, имеющие технические характеристики близкие к зарубежным аналогам. Последний подход вовсе не учитывает специфику условий эксплуатации машин в нашей стране.

Безусловно, учет эксплуатационных свойств и базовых принципов объединения машин в технологические комплексы весьма важен. Однако в условиях отсутствия интегрального оценочного критерия и точных математических моделей получения данных для него сложно достичь результата по прогнозированию эффективности машин. Соответственно, отечественные лесные машины либо остаются аналогами зарубежных (т. е. без адаптации к условиям работы в стране), либо позиционируются как универсальные машины для работы в широком диапазоне условий. При этом реальная эффективность их эксплуатации зачастую ниже проектных оценок.

Таким образом, целью разработки методики прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин является создание инструмента, позволяющего отечественным предприятиям лесного машиностроения совершенствовать свои машины в направлении большей специализированности и соответствия друг другу в рамках единого комплекса, управлять их потребительскими качествами [3, 4] и предлагать модификации базовых машин под конкретные природно-производственные условия.

Лесозаготовители к тому же получают методику, позволяющую прогнозировать эффективность проведения лесозаготовок в заданных условиях, а также быть уверенными, что эксплуатационные характеристики выбранного комплекса машин являются рациональными.

Основная часть. Структура методики. Предлагаемая методика состоит из следующих структурных блоков, реализованных в авторских компьютерных математических моделях.

1. *Блок условий эксплуатации.* В него вносятся данные о типологических и физико-механических свойствах почвогрунтов, макро- и микрорельефе местности, таксационных характеристиках древостоев. Результатом работы блока являются матрицы показателей названных условий эксплуатации: породы и возраста деревьев, таксационного диаметра, класса бонитета, полноты, диаметров сучьев и их распределения по стволам, распределения стволов по лесосеке, показателей несущей способности грунтов и высотных отметок, размещенных на участках лесосек по заданному закону распределения.

2. *Блок общего моделирования технологического процесса.* Исходными данными для него являются результаты работы блока условий эксплуатации, технологические и лесохозяйственные требования к работе машин. Результат работы блока — выбор базовой технологии и типов машин для ее реализации. Базовые технологии разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин составлены под руководством авторов в 2021–2023 гг. по заданию отраслевой научно-технической программы Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь «Сохранение устойчивого развития лесов с учетом изменения климата».

3. *Блок моделирования технологических операций.* Основан на авторских математических моделях многооперационных лесозаготовительных машин. С его помощью устанавливаются: время проведения отдельных и совмещенных операций, затраченная на их реализацию энергия и выполненная полезная работа, динамические нагрузки в звеньях и узлах машин. Математические модели позволяют варьировать тип машины (харвестер, форвардер, рубильная

машина, комбинированные машины на их основе), а также параметры конструкции: шасси, технологическое оборудование и рабочие органы. К примеру, для манипулятора это кинематическая схема, грузоподъемность, поворотный момент и вылет манипулятора, массово-геометрические характеристики его отдельных звеньев, расположение и параметры исполнительных звеньев гидропривода, гидравлическая схема их питания (в том числе характеристики секций гидрораспределителя и гидронасосов) и др. Для харвестерных головок помимо параметров привода их исполнительных механизмов устанавливаются массово-геометрические параметры в целом, гидравлические и механические характеристики гидромоторов с вальцами (гусеницами) протяжки, геометрические параметры сучкорезных ножей, параметры контакта ствола дерева с несущей конструкцией, вальцами и сучкорезными ножами, параметры пильного механизма. Ввиду быстротечности процесса срезания сучьев с деревьев, существенной продолжительности моделирования такого процесса и высоких требований к аппаратной части компьютера данные, необходимые для работы подмодели харвестерной головки были получены предварительно методами конечно-элементного моделирования с последующей их проверкой в натурных экспериментах. Полученные результаты внесены в подмодель в виде эмпирических зависимостей.

Для базовых шасси варьируемыми параметрами, помимо массово-геометрических характеристик отдельных узлов и агрегатов и их пространственного расположения на несущей конструкции, явились колесная формула и упруго-демпфирующие характеристики движителя, характеристики взаимодействия движителя с лесными почвогрунтами, пространственное расположение мест установки технологического оборудования, упругие и демпфирующие свойства элементов несущей конструкции, пространственное положение оператора, параметры подressирования его рабочего места и др.

4. *Блок анализа эксплуатационных свойств* работает параллельно с блоком моделирования технологических операций и при недостаточности определенных эксплуатационных свойств корректирует работу блоков общего моделирования технологического процесса и моделирования технологических операций. К примеру, ограничивает вылет манипулятора при недостаточной устойчивости машины и изменяет в соответствии с этим ширину полупасек и количество технологических коридоров.

5. *Блок оценки ресурса конструкции.* Здесь используются данные о динамических нагрузках в отдельных звеньях и узлах машин, получаемые из блока моделирования технологических

операций. В нем предусмотрена реализация двух подходов к оценке ресурса. Оба основаны на предварительной схематизации процесса нагружения [5]. Первый подход предоставляет большую точность оценки, но является более трудоемким и может использоваться только при наличии трехмерной модели оцениваемой конструкции. При нем выполняется моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием исходной последовательности нагрузок. Методами, изложенными в публикации [6], оценивается ресурс конструкции в виде количества циклов заданной схемы нагружения до потери прочности или до критического износа, требующего ремонта. Найденное количество циклов нагружения интерпретируется в величину продолжительности безотказной работы и в дальнейшем используется при оценке эффективности комплекса лесозаготовительных машин в виде коэффициента готовности.

Второй подход основан на прогнозе ресурса анализируемой конструкции в сравнении с оценкой степени повреждаемости подобной опытной конструкций [7]. Такой подход более приемлем при необходимости проведения расчетов с большой выборкой начальных условий эксплуатации и сравнения разнообразных технологий, а также при многочисленных вариантах конструкций машин. Как правило, такая оценка выполняется на начальном этапе анализа.

6. *Блок данных о квалификации оператора.* Эффективность эксплуатации лесозаготовительных машин значительно зависит от подготовки и опыта оператора, его психоэмоционального состояния, утомляемости и т. д. [8, 9]. На протяжении 2021–2023 гг. на кафедре ЛМДиТЛП проводился сбор и анализ данных о 157 операторах многооперационных машин. Полученные данные позволили установить влияние возраста, стажа, условий работы, ее непрерывной продолжительности и времени суток на способность отдельных групп операторов реализовывать ряд приемов и способов выполнения операций, а также долговременно поддерживать определенный технический уровень их исполнения.

7. В блоке *оценки эффективности и прогнозирования* на основе данных, полученных из предыдущих блоков, с использованием изложенного ниже критерия выполняется оценка эффективности комплекса лесозаготовительных машин в заданных природно-производственных условиях эксплуатации. Также возможен анализ для группы условий или в изменяющихся условиях. При этом работа предыдущих блоков повторяется необходимое количество раз с разными начальными условиями, после чего выполняется оценка эффективности для всей группы с учетом вероятности эксплуатации машин в них.

Критерий оценки эффективности комплекса лесозаготовительных машин. При разработке методики выдвинута гипотеза о том, что вся совокупность эксплуатационных свойств лесозаготовительных машин и их оценочных показателей на практике определяет ограниченное число эксплуатационных потребительских качеств:

- эксплуатационную надежность;
- производительность;
- экономичность;
- безопасность;
- экологичность.

Анализ изложенных потребительских качеств позволил установить, что все они могут быть оценены величинами полезно выполненной работы (Дж или м³), затраченной энергии (Дж или кг топлива) и времени (с или смен).

Практическая оценка эксплуатационной надежности ограничивается определением времени безотказной работы машин за длительный срок и времени на восстановление работоспособного состояния. Производительность находится как объем полезной работы, выполненный в единицу времени, экономичность – как энергетические затраты на обеспечение заданной производительности.

При этом должен обеспечиваться дополнительный ряд условий: безопасности работы как способности выполнять определенный круг технологических операций без причинения вреда здоровью оператора и экологичности [10] как допустимого уровня вредного воздействия на лесные экосистемы, не связанного с непосредственным изъятием заготавливаемой древесно-кустарниковой растительности. К подобным экологическим ограничениям следует относить допустимую глубину колеи, образуемую за несколько проходов машин, степень минерализации почв, повреждающее воздействие движителей на напочвенный покров и корневые системы, воздействие на стволы и кроны оставляемых на доращивание деревьев и др.

В основу интегральной оценки рассмотренных потребительских качеств положен критерий энергетического потенциала производительности (ЭПП), предложенный в ранних работах авторов [11, 12] (с выводом и физическим смыслом критерия можно ознакомиться в работах [13, 14]). Однако в рамках данной методики он обладает существенными особенностями. Так, базовый критерий удельного ЭПП (УЭПП) был предназначен для оценки эффективности выполнения отдельных операций технологического цикла лесозаготовок и представлял собой следующую зависимость:

$$\text{УЭПП} = \frac{A_{\text{полезн}}}{(E_{\text{полн}})T},$$

где $A_{\text{полезн}}$ – полезная работа, выполненная на соответствующей операции технологического

цикла, Дж; $E_{\text{полн}}$ – энергия, затраченная на выполнение полезной работы, Дж; T – время выполнения соответствующей операции технологического цикла, с.

Дальнейшие исследования позволили установить, что полезно выполненная лесозаготовительной машиной работа и затраченная на это энергия должны определяться не только для самых энергоемких и продолжительных операций, но и для всей их совокупности в одном технологическом цикле с учетом последовательности выполнения при заданной технологии работы. При таком подходе стало возможным использовать критерий УЭПП для анализа эффективности технологических циклов работы многооперационных машин в целом:

$$\text{УЭПП}_{\text{ц}} = \frac{\sum A_{\text{полезн}}^{\text{ц}}}{\left(\sum E_{\text{полн}}^{\text{ц}}\right)T_{\text{ц}}},$$

где $\sum A_{\text{полезн}}^{\text{ц}}$ – сумма полезных работ, выполненных по каждой последовательной операции технологического цикла, Дж; $\sum E_{\text{полн}}^{\text{ц}}$ – сумма энергий, затраченных на выполнение работ в технологическом цикле, Дж; $T_{\text{ц}}$ – продолжительность технологического цикла многооперационной машины, с. При одновременном выполнении нескольких технологических операций (совмещении операций), учитывается общее время совмещения.

Исходные данные для проведения такого анализа получают либо посредством компьютерного имитационного математического моделирования работы многооперационной машины [15], либо экспериментальным путем [16, 17]. Для этого наряду с ранее созданными авторами математическими моделями отдельных операций использовались модели, позволившие рассмотреть работу машин целиком и параллельно с определением энергетических характеристик операций получать данные о динамическом нагружении отдельных узлов, в том числе рабочего органа, манипулятора, базового шасси и их силовых приводов. Это дало возможность не только оценить «базовую» эффективность технологического цикла многооперационной машины, но и дать расширенную оценку эффективности с учетом характера нагружения конструкции и вероятности пребывания ее в работоспособном состоянии:

$$\text{УЭПП}_{\text{ц}} = \frac{\sum A_{\text{полезн}}^{\text{ц}}}{\left(\sum E_{\text{полн}}^{\text{ц}}\right) \frac{T_{\text{ц}}}{K_{\text{гот}}}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{гот}}$ – коэффициент готовности машины.

Таким образом, энергопотребление многооперационной машины, производимая ей полезная работа, затраты времени на выполнение каждой операции и возникающие при этом нагрузочные

режимы связаны между собой единым оценочным критерием. Однако выражение (1) допускает оценку лишь для постоянных природно-производственных условий. В практике реального лесозаготовительного производства условия эксплуатации постоянно изменяются [18], а эффективность работы каждой последующей машины лесозаготовительного комплекса зависит от работы предыдущей. К примеру, повышение эффективности работы харвестера, часто достигается за счет исключения операции подсортировки сортиментов или путем сокращения операций по перемещению сваленного дерева. Это приводит к существенному падению эффективности следующего за ним в технологической цепочке форвардера и, как следствие, всего комплекса лесозаготовительных машин. Поэтому при прогнозировании эффективности реального лесозаготовительного производства с применением конкретных многооперационных машин, работающих по конкретной технологии, а также при решении обратной задачи, подборе параметров машин под конкретное производство важно оценивать эффективность совместной работы всех машин лесозаготовительного комплекса во всем диапазоне потенциальных эксплуатационных условий.

Для этого критерий УЭПП преобразован в комплексный интегральный показатель производственной эффективности:

$$\text{ЭП} = \sum_{d=1}^m \sum_{f=1}^r \frac{\sum_{i=1}^n A_i B(d_{1,3}) C(f)}{\left(\sum_{i=1}^n E_i \right) \left(\frac{T_X}{K_{\text{гот}X}} + \frac{T_{\Phi}}{K_{\text{гот}\Phi}} \right)}, \quad (2)$$

где d – порядковый номер совокупности таксационных показателей древостоя; f – порядковый номер совокупности условий движения; $B(d_{1,3})$ – парциальный коэффициент, учитывающий вероятность эксплуатации машины в древостое с заданной совокупностью таксационных показателей; $C(f)$ – парциальный коэффициент, учитывающий вероятность эксплуатации машины в заданной совокупности условий движения; T_X , T_{Φ} – время выполнения операций харвестера и форвардера соответственно; $K_{\text{гот}X}$, $K_{\text{гот}\Phi}$ – коэффициент готовности харвестера и форвардера

при эксплуатации в заданной совокупности природно-производственных условий соответственно.

Представленный критерий предусматривает работу лесозаготовительного комплекса «харвестер + форвардер», но не ограничивается лишь данными машинами. Он может быть легко дополнен рубильной машиной [19] либо комплексом машин для очистки лесосек от порубочных остатков.

Заключение. В настоящей статье изложены наиболее важные аспекты методики прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин. В основе методики лежит гипотеза о том, что все эксплуатационные свойства лесозаготовительных машин и их оценочные показатели на практике определяют ограниченное число эксплуатационных потребительских качеств: эксплуатационную надежность, производительность, экономичность, безопасность и экологичность. Все они могут быть оценены величинами полезно выполненной работы, затраченной энергии и времени. Эти величины собраны в единый оценочный критерий энергетического потенциала производительности. Данные для расчета критерия могут быть получены как экспериментальным путем, так и теоретически на основе математического моделирования технологий работы, конструкций машин, энергопотребления и ресурса.

В статье изложен порядок использования методики при получении данных теоретическим путем. Она разбита на ряд блоков, отвечающих за моделирование условий эксплуатации, общее моделирование технологического процесса, моделирование технологических операций, анализ эксплуатационных свойств, оценку ресурса машин, анализ подготовленности операторов и в целом за прогнозирование эффективности на основе работы предыдущих блоков.

Даны ссылки на предыдущие работы авторов, в которых приводятся математические модели, лежащие в основе функционирования отдельных блоков методики, раскрывается вывод оценочного критерия, рассматриваются вопросы оценки ресурса конструкций многооперационных лесных машин. Дополнительно приведены ссылки на научные работы сотрудников кафедры ЛМДиТЛП БГТУ, отечественных и зарубежных коллег в смежных направлениях.

Список литературы

1. Жуков А. В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Л., 1987. 315 л.
2. Матвейко А. П., Федоренчик А. С. Технология и машины лесосечных работ. Минск: Технопринт, 2002. 480 с.
3. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования. Минск: БГТУ, 2015. 139 с.
4. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Комплексная техническая оценка потребительских качеств лесных машин // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 67–70.

5. Шмелев А. В. Совершенствование методов схематизации случайных процессов нагружения и расчета усталостной долговечности несущих конструкций грузовых автомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Минск, 2010. 22 с.
6. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation // *Journal of Machinery Manufacture and Reability*. 2017. No. 5. P. 463–471.
7. Никитин И. С., Бурого Н. Г., Никитин А. Д. Повреждаемость и усталостное разрушение элементов конструкций в различных режимах циклического нагружения // *Прикладная математика и механика*. 2022. Т. 86, № 2. С. 257–271.
8. Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales*. Joensuu, 2009. 63 p.
9. Петренко Н. В. Работа оператора зерноуборочного комбайна – основа повышения его производительности // *Техника и оборудование для села*. 2010. № 4 (154). С. 45–61.
10. Протас П. А., Мисуно Ю. И. Структурная схема и критерии оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // *Труды БГТУ*. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 248–253.
11. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Эффективность работы многооперационных лесозаготовительных машин с учетом ограничивающих факторов // *Труды БГТУ*. 2012. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 8–11.
12. Голякевич С. А. Применение систем адаптивного управления для повышения реализации энергетического потенциала харвестерами // *Труды БГТУ*. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). С. 238–244.
13. Голякевич С. А. Повышение надежности несущих конструкций многооперационных лесных машин выбором режимов работы на основе энергетического потенциала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2013. 27 с.
14. Гинзбург Ю. В., Швед А. И., Парфенов А. П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.
15. Голякевич С. А. Имитационное моделирование технологического оборудования форвардера как мехатронной системы // *Труды БГТУ*. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 174–180.
16. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Экспериментальные исследования нагруженности несущих конструкций шарнирно-сочлененных лесозаготовительных машин // *Труды БГТУ*. 2012. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 15–17.
17. Пищов С. Н., Мохов С. П., Голякевич С. А. Результаты экспериментальных исследований устойчивости и проходимости автомобиля-самосвала МАЗ 5516W4 // *Оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апр. 2016 г. Могилев*, 2016. С. 164–165.
18. Федоренчик А. С., Корзун И. И. Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов Беларуси // *Труды БГТУ*. Сер. VII, Экономика и управление. 2001. Вып. IX. С. 148–153.
19. Мохов С. П., Германович А. О. Анализ конструктивных особенностей рубильных машин // *Труды БГТУ*. 2011. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 40–44.

References

1. Zhukov A. V. *Teoreticheskiye osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh lesnykh mashin*. *Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Theoretical bases of a choice of technical parameters and improvement of operational properties of special forest machines. Dissertation DSc (Engineering)]. Leningrad, 1987. 315 p. (In Russian).
2. Matveiko A. P., Fedorenchik A. S. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines for logging operations]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2002. 480 p. (In Russian).
3. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. *Osnovy proyektirovaniya lesnykh mashin i sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya* [Basics of forest machinery design and computer-aided design]. Minsk, BSTU Publ., 2015. 139 p. (In Russian).
4. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Comprehensive technical assessment of consumer qualities of forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 67–70 (In Russian).
5. Shmeliov A. V. *Sovershenstvovaniye metodov skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya i rascheta ustalostnoy dolgovechnosti nesushchikh konstruktсий gruzovykh avtomobiley*. *Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving methods for schematizing random loading processes and calculating the fatigue life of load-bearing structures of trucks. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 2010. 22 p. (In Russian).

6. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, no. 5, pp. 463–471.
7. Nikitin I. S., Burago N. G., Nikitin A. D. Damage and fatigue failure of structural elements in various cyclic loading modes. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied mathematics and mechanics], 2022, vol. 86, no. 2, pp. 257–271 (In Russian).
8. Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales*. Joensuu, 2009. 63 p.
9. Petrenko N. V. The work of a combine harvester operator is the basis for increasing its productivity. *Machinery and equipment for rural areas*, 2010, no. 4 (154), pp. 45–61 (In Russian).
10. Protas P. A., Misuno Yu. I. Structural scheme and the criteria for assessing the operational and environmental forest machines compatible with soils. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 248–253 (In Russian).
11. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Efficiency of operation of multi-operational forestry machines taking into account limiting factors. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 8–11 (In Russian).
12. Golyakevich S. A. Application of adaptive control systems to increase the realization of energy potential of harvesters. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2017, no. 2 (198), pp. 238–244 (In Russian).
13. Golyakevich S. A. *Povysheniye nadezhnosti nesushchikh konstruksiy mnogooperatsionnykh lesnykh mashin vyborom rezhimov raboty na osnove energeticheskogo potentsiala. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing the reliability of load-bearing structures of multi-operation forest machines by selecting operating modes based on the energy potential. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 2013. 27 p. (In Russian).
14. Ginzburg Yu. V., Shved A. I., Parfenov A. P. *Promyshlennyye traktory* [Industrial tractors]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 296 p. (In Russian).
15. Golyakevich S. A. Simulation modeling of technological equipment of a forwarder as mechatronic system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2 (222), pp. 174–180 (In Russian).
16. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. Experimental studies of the load on load-bearing structures of articulated forestry machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 15–17 (In Russian).
17. Pishchov S. N., Mokhov S. P., Golyakevich S. A. Results of experimental studies of stability and cross-country ability of a MAZ 5516W4 dump truck. *Oborudovaniye i resursosberegayushchiye tekhnologii* [Materials, equipment and resource-saving technologies]. Mogilev, 2016, pp. 164–165 (In Russian).
18. Fedorenchik A. S., Korzun I. I. Typing the natural-production conditions of harvesting areas in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VII, Economics and Management, 2001, issue IX, pp. 148–153 (In Russian).
19. Mokhov S. P., Germanovich A. O. Analysis of the design features of chipping machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 40–44 (In Russian).

Информация об авторах

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

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

Коробкин Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Тракторы». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: trak_atf@bntu.by

Information about the authors

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), 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: gsa@belstu.by

Goronovsky Andrey Romanovich – PhD (Engineering), 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: arg@belstu.by

Korobkin Vladimir Andreevich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Tractors. Belarusian National Technical University (65, Nesavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trak_atf@bntu.by

Поступила 23.10.2023

УДК 630*36:621.9

С. А. Голякевич, А. Р. Гороновский

Белорусский государственный технологический университет

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРОВ
МНОГООПЕРАЦИОННЫХ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

В данной публикации проведен краткий анализ исследований в области моделирования динамики манипуляторов лесозаготовительных машин. В результате установлено, что существующие математические модели не в полной мере отвечают требованиям по формированию целостной методики прогнозирования эффективности машин в заданных технологических процессах и условиях эксплуатации.

Предложена авторская математическая модель комбинированного шарнирно-рычажного манипулятора с телескопическим звеном. Модель состоит из схемы и математических описаний кинематики и динамики звеньев манипулятора, задающих устройств (гидроцилиндров), гидравлического привода. В ней учтена логика работы отдельных элементов силовых гидравлических приводов. Модель является настраиваемой для получения данных о работе манипулятора при выполнении всего комплекса лесотехнологических операций. Она предоставляет данные о времени совершения операции, об энергетических затратах на привод каждого отдельного звена манипулятора при их обособленной и совместной работе, а также сведения о силовых факторах, действующих в отдельных звеньях металлоконструкции манипулятора и исполнительных механизмах силового привода. Способ реализации модели в виде явной записи уравнений Лагранжа 2-го рода позволил сделать ее расширяемой с возможностью интеграции в общую модель многооперационной лесозаготовительной машины. Данные, полученные с помощью этой модели, используются при прогнозировании эффективности комплексов многооперационных лесозаготовительных машин.

Ключевые слова: манипулятор, динамика, методика, эффективность, технология, ресурс, энергопотребление, моделирование, харвестер, форвардер.

Для цитирования: Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 132–143.
DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-18.

S. A. Golyakevich, A. R. Goronovsky

Belarusian State Technological University

**MATHEMATICAL DYNAMIC MODEL OF MANIPULATORS
OF MULTI-OPERATIONAL FORESTRY MACHINES**

The article provides a brief analysis of research in the field of modeling the dynamics of manipulators of forestry machines. It has been established that existing models do not fully meet the requirements for the formation of a holistic methodology for predicting the efficiency of machines in given technological processes and operating conditions.

The author's mathematical model of a combined articulated-lever manipulator with a telescopic link is proposed. The model consists of a diagram and mathematical descriptions of the kinematics and dynamics of the manipulator links, driving devices (hydraulic cylinders), and hydraulic drive. The model takes into account the logic of operation of individual elements of power hydraulic drives. The model is customizable to obtain data on the operation of the manipulator when performing the entire complex of forestry operations. It provides data on the time of completion of the operation, energy costs for the drive of each individual link of the manipulator during their separate and joint operation, as well as data on the power factors acting in individual links of the metal structure of the manipulator and the actuators of the power drive. The method of implementing the model in the form of an explicit representation of the Lagrange equations of the 2nd kind made it possible to make the model extensible with the possibility of its integration into the general model of a multi-operational logging machine. Data obtained using the model are used to predict the efficiency of complexes of multi-operational forestry machines.

Keywords: manipulator, dynamics, methodology, efficiency, technology, resource, energy consumption, modeling, harvester, forwarder.

For citation: Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Mathematical dynamic model of manipulators of multi-operational forestry machines. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 132–143 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-18.

Введение. Прогнозирование эффективности работы комплексов многооперационных лесозаготовительных машин тесно связано с получением широкого круга данных об их производительности, надежности, экономичности, безопасности и экологичности (далее – эксплуатационные потребительские качества). Ввиду отсутствия на ранних этапах проектирования опытных образцов машин и невозможности проведения натурных экспериментов с ними важным способом получения данных для прогнозирования эффективности машин и определения их рациональных параметров следует считать математическое моделирование.

В настоящей статье проведен обзор существующих математических моделей манипуляторов для лесозаготовительных машин и машин из смежных отраслей; критический анализ пакетов компьютерного имитационного моделирования динамических систем; предложена собственная математическая модель манипулятора лесозаготовительной машины.

Основная часть. Анализ существующих моделей и программных пакетов для моделирования. Для реализации методики прогнозирования эффективности комплексов многооперационных машин необходима разработка компьютерной имитационной математической модели их манипуляторов, которая должна:

- описывать кинематику и динамику металлоконструкций многозвенных манипуляторов, наиболее распространенных в лесозаготовительной отрасли: «классических» шарнирно-рычажных, параллельных и параллельно-телескопических;

- описывать логику работы и динамику отдельных элементов силовых гидравлических приводов обозначенных манипуляторов: гидронасосов, гидромоторов и гидроцилиндров, секций гидрораспределителей, клапанов и дросселей;

- иметь возможность оперативного изменения кинематической схемы манипулятора, массово-геометрических характеристик его звеньев и их начальных положений, параметров силового привода и логики управления его звеньями;

- быть настраиваемой для получения данных о работе манипулятора при выполнении всего комплекса лесотехнологических операций;

- предоставлять данные о времени совершения операции, об энергетических затратах на привод каждого отдельного звена манипулятора при их обособленной и совместной работе;

- давать данные о силовых факторах, действующих в отдельных звеньях металлоконструкции манипулятора и исполнительных механизмах силового привода;

- описывать массово-геометрические и динамические характеристики предмета труда (дерева, хлыста и сортимента), в том числе взаимодействие отдельных единиц и групп предметов труда с поверхностью движения, а для дерева на операции его валки – с воздушной средой;

- модель должна быть интегрируема в общую модель лесозаготовительной машины, учитывать размещение манипулятора на базовом шасси, их общую динамику и энергетическую связность силовых приводов;

- иметь возможность выводить уравнения движения, программный код модели или уравнения, связывающие положение рабочего органа манипулятора с положением исполнительных звеньев его силового привода, для их дальнейшего использования в системах управления реальными лесозаготовительными машинами;

- обладать способностью управления манипулятором в режиме «реального времени» (симулятор управления).

Анализ исследований в области математического моделирования манипуляторов лесозаготовительных машин позволил установить, что с помощью известных математических моделей возможно получить данные лишь об отдельных характеристиках объекта моделирования. К примеру, для условной лесозаготовительной машины существуют отдельные модели динамики движения звеньев, динамики силового привода и т. д. Как правило, отдельно моделируются технологические процессы и оцениваются показатели энергоемкости и производительности операций, но без детального моделирования самого манипулятора. Главный недостаток таких моделей – практическая сложность оценки взаимосвязи реализуемой технологии, используемых машин и применяемых способов выполнения операций с группой показателей эксплуатационных потребительских качеств.

В области оценки динамики лесопромышленных манипуляторов широко известны работы З. К. Емтыля и И. М. Бартенева. Так, в их совместной монографии [1] изложены результаты исследований динамики лесопромышленных манипуляторов, предназначенных для выполнения погрузочно-разгрузочных операций. Освещаются вопросы общей кинематики таких манипуляторов, влияния сжимаемости

рабочей жидкости и элементов гидропривода на динамику движения, возможности совмещения работы звеньев и влияние совмещения на динамику нагружения манипулятора, надежности шарнирных узлов манипуляторов, приводятся данные экспериментальных исследований.

Также авторы рассматривают возможность оптимизации параметров манипулятора. При этом в качестве целевого критерия принимается минимальный коэффициент динамичности нагрузок, а в случае оценки совмещения операций дополнительно и уменьшение времени их выполнения. Именно этими показателями авторы характеризуют эффективность манипулятора. Рассматривая давления и расходы гидравлической жидкости в контексте снижения динамики нагружения, авторы напрямую не исследуют энергетическую эффективность манипуляторов, в том числе при совмещении операций. Не исследуются также вопросы энергопотребления манипуляторов с различными кинематическими схемами, не оцениваются вопросы динамического взаимодействия базовых шасси машин и их манипуляторов, а также вопросы управления приводом. Указанное, несмотря на полноту проведенных авторами исследований, не позволяет решать весь комплекс поставленных задач с применением предлагаемой ими модели. Однако выводы авторов об особенностях динамики нагружения манипуляторов заслужили пристального внимания и безусловного учета в текущей работе.

Исследованиям систем управления манипуляторами посвящены работы зарубежных ученых [2–5]. В этих и других работах авторы для моделирования динамики используют программные пакеты компьютерного моделирования. В целом с развитием вычислительных мощностей математические модели стали более детализированными, точными, однако более требовательными к аппаратной части компьютеров. Появились отдельные программные пакеты моделирования динамики конструкций, силового привода, систем управления. К наиболее известным и широко используемым относятся: Ansys WorkBench/Rigid Dynamics; MSC Adams + MSC Easy5; Matlab/Simulink/Simscape. Однако данные программные пакеты (в том числе в работах [2–5]) ориентированы, как правило, на инженерное использование, т. е. на моделирование и уточнение характеристик отдельного объекта, большинство параметров которого заранее определены. Отмеченное обуславливает следующие недостатки таких пакетов для проведения научных исследований в области моделирования работы манипуляторов многооперационных машин:

- необходимость в компьютерной твердотельной модели манипулятора или в ее стержневом аналоге;

- невозможность оперативного изменения кинематики манипулятора ввиду необходимости коррекции геометрии исходных тел;

- высокие требования к аппаратной части компьютера, особенно для динамической модели манипулятора с приводом;

- сложность, а в ряде случаев невозможность моделирования природно-производственных условий работы машин в лесу;

- длительный процесс вычисления каждой итерации исходных данных. Часто требуется повторная компиляция исходного кода модели для увеличения скорости вычислений;

- ограниченный доступ пользователя к используемым математическим методам моделирования, так как программа представляет собой «черный ящик»;

- невозможность получения уравнений динамики для их последующего использования;

- высокая стоимость программного пакета, часто сопоставимая со стоимостью объекта моделирования.

Таким образом, ни один из рассмотренных программных пакетов не позволяет комплексно решить поставленные задачи, в связи с чем принято решение о разработке собственной математической модели.

Математическое описание модели. Математическая модель манипулятора описывает кинематическое положение и колебательные процессы, происходящие при повороте колоны, подъеме-опускании стрелы или рукояти и выдвижении-зادвижении телескопического звена под действием перемещения штоков соответствующих им гидроцилиндров. Модель учитывает моменты инерции, величину и относительное расположение соответствующих сосредоточенных масс указанных звеньев, а также приведенные и сосредоточенные в их центрах тяжести, массы и моменты инерции штоков и гильз гидроцилиндров, опорно-поворотного механизма манипулятора, тяг шарнирного четырехзвенника рукояти, рейферного захвата, ротатора и погружаемой пачки круглых лесоматериалов.

Движение звеньев манипулятора многооперационной лесозаготовительной машины в пространстве описывается обобщенными координатами его отдельных звеньев:

φ_0 – вращательное движение в плоскости OXZ манипулятора массой M_0 (кг) и с центральным моментом инерции J_c (кг·м²) относительно оси его установки на шасси многооперационной лесозаготовительной машины, рад;

φ_1 – вращательное движение в плоскости OXY стрелы с сосредоточенной массой m_1 (кг)

и центральным моментом инерции J_{1c} ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) относительно колонны массой m_0 (кг) с центральным моментом инерции J_{0c} ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$), рад;

φ_2 – вращательное движение в плоскости OXY рукояти и телескопического звена с сосредоточенными массами m_{21} (кг), m_{22} (кг) и центральными моментами инерции J_{21c} ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) и J_{21c} ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) соответственно относительно стрелы, рад;

φ_3 – вращательное движение в плоскости OXY грейферного захвата и пачки сортиментов с общей сосредоточенной массой m_{30} (кг) и центральным моментом инерции J_{3c} ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) относительно вертикальной оси, рад;

x_1, x_2, x_3 – поступательное движение гидроцилиндров стрелы, рукояти и телескопического звена соответственно, м.

В модели учтены упругие и демпфирующие свойства отдельных звеньев манипулятора и его привода. Коэффициенты жесткости и демпфирования звеньев манипулятора имеют следующие обозначения:

$C_{СТР}$ – приведенный коэффициент жесткости металлоконструкции стрелы в направлении продольной оси гидроцилиндра ее подъема-опускания, Н/м;

$C_{РУК}$ – приведенный коэффициент жесткости металлоконструкции рукояти в направлении продольной оси гидроцилиндра подъема-опускания рукояти, Н/м;

$C_{ТЕЛ}$ – приведенный коэффициент жесткости гидроцилиндра выдвижения телескопического звена, Н/м;

$K_{СТР}$ – приведенный коэффициент демпфирования металлоконструкции стрелы и гидроцилиндра ее подъема-опускания в направлении продольной оси его перемещения, Н/м;

$K_{РУК}$ – приведенный коэффициент демпфирования металлоконструкции рукояти, телескопического звена и гидроцилиндров их подъема-опускания в направлении продольных осей их перемещения, Н/м;

$K_{ТЕЛ}$ – приведенный коэффициент демпфирования гидроцилиндра выдвижения телескопического звена, Н/м.

Геометрическое положение звеньев манипулятора описано соответствующими величинами:

l_{AB} – расстояние между осями крепления стрелы к колонне и рукояти к стреле, м;

l_{AG} – расстояние между осью крепления стрелы к колонне и положением сосредоточенной массы m_1 , м;

l_{AA1} – расстояние между осями крепления стрелы к колонне и шарнира штока гидроцилиндра стрелы к стреле, м;

l_{AA2} – расстояние между осями крепления стрелы к колонне и шарнира корпуса гидроцилиндра стрелы к колонне, м;

l_{BC} – расстояние между осями крепления рукояти к стреле и грейферного захвата к телескопическому звену, м;

l_{B1B2} – расстояние между осью шарнира корпуса гидроцилиндра рукояти и отрезком, соединяющим оси крепления стрелы к колонне и рукояти к стреле, м;

l_{B2B3} – расстояние между осями шарниров корпуса гидроцилиндра рукояти и его штока, м;

l_{BB4} – расстояние между осями крепления к стреле рукояти и тяги № 1 четырехзвенника, м;

l_{B3B4} – расстояние между осями крепления тяги № 1 четырехзвенника к шарниру штока гидроцилиндра рукояти и к рукояти, м;

l_{B3B5} – расстояние между осями крепления тяги № 2 четырехзвенника к шарниру штока гидроцилиндра рукояти и к стреле, м;

l_{BB5} – расстояние между осями крепления к стреле рукояти и тяги № 2 четырехзвенника, м;

l_{BF} – расстояние между осью крепления рукояти к стреле и положением центра тяжести рукояти, м;

l_{BE} – расстояние между осью крепления рукояти к стреле и положением центра тяжести телескопического звена, м;

l_{CD} – расстояние между осью крепления грейферного захвата к телескопическому звену и положением сосредоточенной массы m_{30} , м.

Кинематическое положение сосредоточенных масс и отдельных точек звеньев манипулятора в соответствии с рисунком описано следующими величинами:

$\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \psi, \theta, \xi$ – углы, описывающие кинематические положения звеньев манипулятора и их центров тяжести согласно рисунку, град;

l_{AC} – кинематическое положение точки подвеса грейферного захвата к телескопическому звену относительно точки A , м;

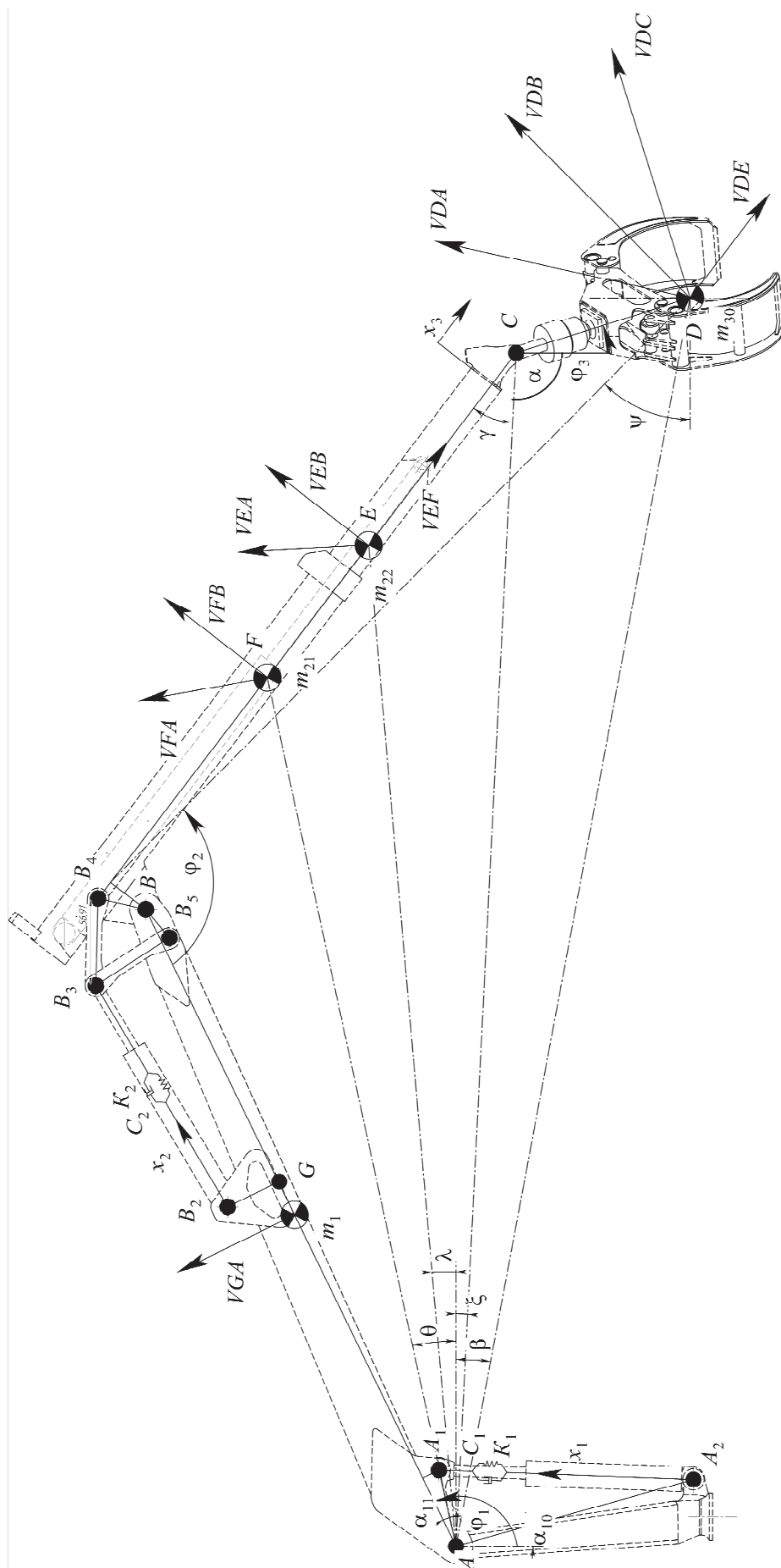
l_{AD} – кинематическое положение центра тяжести грейферного захвата с пачкой сортиментов относительно точки A , м;

l_{BD} – кинематическое положение центра тяжести грейферного захвата с пачкой сортиментов относительно точки B , м;

l_{AE} – кинематическое положение центра тяжести телескопического звена относительно точки A , м.

$$\alpha = 2\pi - \varphi_1 - \varphi_2 - \gamma; \gamma = \arccos\left(\frac{l_{BC}^2 + l_{AC}^2 - l_{AB}^2}{2l_{BC}l_{AC}}\right);$$

$$\beta = \arctg \frac{l_{AB} \sin\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) - l_{BC}x_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) - l_{CD} \cos(\varphi_3)}{l_{AB} \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + l_{BC}x_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \sin(\varphi_3)};$$



Расчетная схема к математической модели шарнирно-рычажного манипулятора с телескопическим звеном

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{l_{BC} x_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \cos(\varphi_3)}{l_{BC} x_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \sin(\varphi_3)} \right);$$

$$\lambda = \operatorname{arctg} \left(\frac{l_{AB} \sin\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) - l_{BE} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)}{l_{AB} \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + l_{BE} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)} \right);$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{l_{AB} \sin\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) - l_{BF} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)}{l_{AB} \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + l_{BF} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)} \right);$$

$$\xi = \operatorname{arctg} \left(\frac{l_{AB} \sin\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) - l_{BC} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)}{l_{AB} \cos\left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + l_{BC} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)} \right);$$

$$l_{AC} = \sqrt{(l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{BC} \cdot \cos \varphi_2)};$$

$$l_{AD} = \sqrt{(l_{AC}^2 + l_{CD}^2 - 2l_{AC}l_{CD} \cdot \cos(\alpha + \varphi_3))};$$

$$l_{BD} = \sqrt{(l_{BC}^2 + l_{CD}^2 - 2l_{BC}l_{CD} \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3))};$$

$$l_{AE} = \sqrt{(l_{BE}^2 + l_{AB}^2 - 2l_{BE}l_{AB} \cdot \cos \varphi_2)};$$

$$l_{BE} = l_{BF} + l_{FE \min} + x_3;$$

$$l_{BC} = l_{BC \min} + x_3;$$

$$l_{AF} = \sqrt{(l_{AB}^2 + l_{BF}^2 - 2l_{AB}l_{BF} \cdot \cos \varphi_2)};$$

$$\beta_{504} = 2\pi - (\varphi_2 + \beta_{40C});$$

$$\beta_{534} = \arccos \left(\frac{l_{B_3B_5}^2 + l_{B_3B_4}^2 - l_{B_4B_5}^2}{2l_{B_3B_5}l_{B_3B_4}} \right);$$

$$\beta_{354} = \arccos \left(\frac{l_{B_4B_5}^2 + l_{B_3B_5}^2 - l_{B_3B_4}^2}{2l_{B_4B_5}l_{B_3B_5}} \right);$$

$$\beta_{345} = \arccos \left(\frac{l_{B_4B_5}^2 + l_{B_3B_5}^2 - l_{B_3B_4}^2}{2l_{B_4B_5}l_{B_3B_5}} \right);$$

$$\beta_{540} = \arcsin \left(\frac{l_{B_0B_5} \sin(\beta_{504})}{l_{B_4B_5}} \right); \quad \beta_{340} = \beta_{354} + \beta_{504};$$

$$l_{B_1B_4} = \sqrt{(l_{BB_1}^2 + l_{BB_4}^2 - 2l_{BB_1}l_{BB_4} \cos(\beta_{504}))};$$

$$l_{B_4B_5} = \sqrt{(l_{BB_5}^2 + l_{BB_4}^2 - 2l_{BB_5}l_{BB_4} \cos(\beta_{504}))};$$

$$l_{B_0B_3} = \sqrt{(l_{BB_4}^2 + l_{B_3B_4}^2 - 2l_{BB_4}l_{B_3B_4} \cos(\beta_{340}))};$$

$$l_{B_2B_5} = \sqrt{(l_{B_1B_2}^2 + l_{B_1B_5}^2)};$$

$$\beta_{350} = \arccos \left(\frac{l_{B_3B_5}^2 + l_{B_0B_5}^2 - l_{B_0B_3}^2}{2l_{B_3B_5}l_{B_0B_5}} \right); \quad \beta_{351} = \pi - \beta_{350};$$

$$\beta_{251} = \arcsin \left(\frac{l_{B_1B_2}}{l_{B_2B_5}} \right); \quad \beta_{253} = \beta_{350} - \beta_{251};$$

$$\Delta_{\Gamma \Pi P} = l_{B_2B_3} - l_{OPYK};$$

$$l_{B_2B_3} = \sqrt{(l_{B_2B_5}^2 + l_{B_3B_5}^2 - 2l_{B_2B_5}l_{B_3B_5} \cos(\beta_{253}))};$$

$$\beta_{325} = \arccos \left(\frac{l_{B_2B_3}^2 + l_{B_2B_5}^2 - l_{B_3B_5}^2}{2l_{B_2B_3}l_{B_2B_5}} \right);$$

$$\beta_{521} = \arcsin \left(\frac{l_{B_1B_5}}{l_{B_2B_5}} \right);$$

$$v_{30} = \dot{x}_3; \quad v_{DC} = \dot{\varphi}_3 l_{CD}; \quad v_{DB} = \dot{\varphi}_2 l_{BD}; \quad v_{DA} = \dot{\varphi}_1 l_{AD};$$

$$v_{GA} = l_{AG} \dot{\varphi}_1; \quad v_{FA} = l_{AF} \dot{\varphi}_1; \quad v_{FB} = l_{BF} \dot{\varphi}_2;$$

$$v_{Fy} = v_{FA} \cos \theta + v_{FB} \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right);$$

$$v_{Fx} = -v_{FA} \sin \theta + v_{FB} \sin \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right);$$

$$v_F = \sqrt{v_{Fy}^2 + v_{Fx}^2}; \quad v_{EA} = l_{AE} \dot{\varphi}_1; \quad v_{EB} = l_{BE} \dot{\varphi}_2;$$

$$v_{Ey} = v_{EA} \cos \lambda + v_{EB} \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right) - x_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi);$$

$$v_{Ex} = -v_{EA} \sin \lambda + v_{EB} \sin \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right) + x_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi);$$

$$v_E = \sqrt{v_{Ey}^2 + v_{Ex}^2};$$

$$v_{DA} = l_{AD} \dot{\varphi}_1; \quad v_{DB} = l_{BD} \dot{\varphi}_2; \quad v_{DC} = l_{CD} \dot{\varphi}_3;$$

$$v_{Dy} = -x_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + v_{DA} \cos \beta +$$

$$+ v_{DC} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_3 \right) + v_{DB} \cos \psi;$$

$$v_{Dx} = x_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + v_{DA} \cos \beta +$$

$$+ v_{DC} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_3 \right) + v_{DB} \cos \psi.$$

Кинетическая, потенциальная энергия манипулятора и функция рассеивания энергии в упругих элементах манипулятора имеют вид:

$$\begin{aligned}
T = & \frac{m_{21}}{2} \left(\left(\left(\sqrt{l_{AB}^2 + l_{BF}^2 - 2l_{AB}l_{BF}\cos\varphi_2} \right) \dot{\varphi}_1 \cos \left(\arctg \frac{l_{AB} \sin \left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right) - l_{BF} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)}{l_{AB} \cos \left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right) + l_{BF} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)} \right) \right)^2 + \right. \\
& \left. + l_{BF} \dot{\varphi}_2 \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right) \right) + \\
& + \left(\left(- \left(\sqrt{l_{AB}^2 + l_{BF}^2 - 2l_{AB}l_{BF}\cos\varphi_2} \right) \dot{\varphi}_1 \sin \left(\arctg \frac{l_{AB} \sin \left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right) - l_{BF} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)}{l_{AB} \cos \left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right) + l_{BF} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi)} \right) \right)^2 + \right. \\
& \left. + l_{BF} \dot{\varphi}_2 \sin \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right) \right) \Bigg)^2 + \\
& + \frac{m_{22}}{2} \left(\left(l_{AE} \varphi_1 \cos \lambda + l_{BE} \varphi_2 \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right) - \dot{x}_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) \right)^2 + \right. \\
& \left. + \left(-l_{AE} \varphi_1 \sin \lambda + l_{BE} \varphi_2 \sin \left(\frac{3\pi}{2} - \varphi_2 - \varphi_1 \right) + \dot{x}_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) \right)^2 \right) + \\
& + \frac{m_1 (l_{AG} \dot{\varphi}_1)^2}{2} + \frac{J_{1c} \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{J_{21c} \dot{\varphi}_2^2}{2} + \frac{J_{22c} \dot{\varphi}_2^2}{2} + \frac{J_{3c} \dot{\varphi}_3^2}{2} + \\
& + \frac{m_{30}}{2} \left(\left(l_{AD} \varphi_1 \cos \beta + l_{CD} \varphi_3 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_3 \right) + l_{BD} \varphi_2 \cos \left(\arctg \frac{l_{BC} x_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \cos \varphi_3}{l_{BC} x_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \sin \varphi_3} \right) \right)^2 + \right. \\
& \left. - \dot{x}_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) \right) + \\
& + \left(l_{AD} \varphi_1 \sin \beta + l_{CD} \varphi_3 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_3 \right) + l_{BD} \varphi_2 \sin \left(\arctg \frac{l_{BC} x_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \cos \varphi_3}{l_{BC} x_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) + l_{CD} \sin \varphi_3} \right) \right)^2 + \\
& \left. + \dot{x}_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \pi) \right) \Bigg)^2 ; \\
\Pi = & m_1 g (l_{AG} - l_{AG} \cos \varphi_1) + m_2 g ((l_{AB} + l_{BF}) - (l_{AB} - l_{BF} \cos \varphi_2) \cos \varphi_1) + \\
& + m_3 g ((l_{AB} + l_{BE \max}) - (l_{AB} - l_{BE} \cos \varphi_2) \cos \varphi_1) + m_4 g ((l_{AB} + l_{BE \max} + l_{CD}) - (l_{AB} - l_{BE} \cos \varphi_2 \cos \varphi_1) - l_{CD} \cos \varphi_3) + \\
& + \frac{C_{CTP}}{2} \left(\sqrt{l_{AA_1}^2 + l_{AA_2}^2 - 2l_{AA_1}l_{AA_2}\cos(\varphi_1 - \alpha_{10} - \alpha_{11})} - l_{0\Gamma\Gamma C} - x_1 \right)^2 + \\
& + \frac{C_{П\Upsilon K}}{2} \left(\sqrt{l_{B_2B_5}^2 + l_{B_3B_5}^2 - 2l_{B_2B_5}l_{B_3B_5}\cos(\beta_{350} - \beta_{251})} + l_{0П\Upsilon K} - x_2 \right)^2 + \frac{C_{TEЛ} (x_3 - x_{30})^2}{2} ; \\
R = & \frac{K_{CTP}}{2} \left(\frac{l_{AA_1}l_{AA_2}\sin(\varphi_1 - \alpha_{11} - \alpha_{10})}{\sqrt{l_{AA_1}^2 - 2\cos(\varphi_1 - \alpha_{11} - \alpha_{10})l_{AA_1}l_{AA_2} + l_{AA_2}^2}} \dot{\varphi}_1 + \dot{x}_1 \right)^2 + \frac{K_{TEЛ} (\dot{x}_3 - \dot{x}_{30})^2}{2} + \\
& + \frac{K_{П\Upsilon K}}{2} \left(\frac{d}{dt} \sqrt{l_{B_2B_5}^2 + l_{B_3B_5}^2 - 2l_{B_2B_5}l_{B_3B_5}\cos \left(\arccos \left(\frac{l_{B_3B_5}^2 + l_{B_0B_5}^2 - l_{B_0B_3}^2}{2l_{B_3B_5}l_{B_0B_5}} \right) \right) - \arcsin \left(\frac{l_{B_1B_2}}{l_{B_2B_5}} \right)} \right) + l_{0П\Upsilon K} - \dot{x}_2 \Bigg)^2 ;
\end{aligned}$$

Порядок автоматизированного составления системы уравнений динамики (Лагранжа 2-го рода [6]) на базе полученных выражений кинетической, потенциальной энергии и диссипативной функции Релея в программном пакете MathCAD подробно изложен в пособии [7].

Описание работы гидравлической системы манипулятора. Оно составлено на основе математических описаний отдельных гидравлических компонентов, объединенных с исполнительными устройствами (гидроцилиндрами и гидромоторами) согласно исходной гидравлической схеме [8].

Источник гидравлической энергии в виде аксиально-поршневого насоса математически описан величинами подводимого крутящего момента и выходного объемного расхода гидравлической жидкости с учетом механических и объемных потерь [9, 10].

Объемный расход $Q(t)$ (м^3) насоса вычислялся по зависимости

$$Q(t) = Q_{\text{ид}}(t) + Q_{\text{пот}}(t);$$

$$Q_{\text{ид}}(t) = q_n \dot{\phi},$$

где $Q_{\text{ид}}(t)$ – объемный расход гидравлической жидкости без учета потерь, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{пот}}(t)$ – объемные потери гидравлической жидкости в насосе, $\text{м}^3/\text{с}$; q_n – выходная величина мгновенной подачи насоса, $\text{м}^3/\text{об.}$; $\dot{\phi}$ – мгновенная угловая скорость входного вала гидронасоса, $\text{рад}/\text{с}$.

Крутящий момент M_e ($\text{Н}\cdot\text{м}$), подводимый к насосу, определяется по зависимостям:

$$M = M_e + M_{\text{трН}};$$

$$M_e = q_n \Delta p,$$

где M_e – требуемый крутящий момент на входном валу, $\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_{\text{трН}}$ – момент внутреннего трения в насосе, $\text{Н}\cdot\text{м}$; Δp – мгновенный перепад давления между входом и выходом из насоса, Па .

$$q_n = \begin{cases} q_{\text{max}}, & qs \geq q_{\text{max}}, \\ \sqrt{qs^2 + q_{\text{min}}^2}, & qs \geq 0, \\ -\sqrt{qs^2 + q_{\text{min}}^2}, & qs < 0, \end{cases}$$

где q_{max} – максимальная подача гидравлической жидкости, $\text{м}^3/\text{об.}$ ($q_{\text{max}} = 74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{об.}$); qs – мгновенное изменение подачи насоса, пропорциональное входному сигналу управления s_n , $\text{м}^3/\text{об.}$; q_{min} – предельная минимальная подача насоса, $\text{м}^3/\text{об.}$ ($q_{\text{min}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{об.}$).

Величина объемных потерь гидравлической жидкости в насосе рассчитывалась по зависимости

$$Q_{\text{пот}}(t) = K_{\text{НР}} \cdot \dot{\phi},$$

где $K_{\text{НР}}$ – коэффициент Хагена – Пуазейля для ламинарных течений.

Момент внутреннего трения в насосе определялся по выражению

$$M_{\text{трН}} = \left(M_0 + K_{\text{тр}} \left| \frac{q_n}{q_{\text{max}}} \right| \cdot |\Delta p| \right) \text{th} \left(\frac{4\dot{\phi}}{\dot{\phi}_{\text{min}}} \right),$$

где M_0 – крутящий момент потребляемый насосом без нагрузки, $\text{Н}\cdot\text{м}$ ($M_0 = 0,05 \text{ Н}\cdot\text{м}$); $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трения в элементах насоса, пропорциональный перепаду давления Δp , $\text{Н}\cdot\text{м}/\text{Па}$ ($K_{\text{тр}} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{Па}$); $\dot{\phi}_{\text{min}}$ – минимальная предельная угловая скорость привода насоса, $\text{рад}/\text{с}$ ($\dot{\phi}_{\text{min}} = 52 \text{ рад}/\text{с}$);

Коэффициент Хагена – Пуазейля для ламинарных течений определялся следующим выражением:

$$K_{\text{НР}} = \frac{\rho_{\text{ном}} \nu_{\text{ном}} \dot{\phi}_{\text{ном}} q_{\text{max}}}{\rho \nu \Delta p_{\text{ном}}} (1 - \eta_v),$$

где $\rho_{\text{ном}}$ – номинальная плотность гидравлической жидкости, для которой достигается номинальная эффективность насоса, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($\rho_{\text{ном}} = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$); $\nu_{\text{ном}}$ – номинальная кинематическая вязкость гидравлической жидкости, для которой достигаются номинальные значения эффективности насоса, сСт ($\nu_{\text{ном}} = 18 \text{ сСт}$); ρ – фактическая плотность жидкости в гидросистеме, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($\rho = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$); ν – кинематическая вязкость жидкости в гидросистеме привода, сСт ($\nu = 18 \text{ сСт}$); $\dot{\phi}_{\text{ном}}$ – номинальная угловая скорость вала, $\text{рад}/\text{с}$ ($\dot{\phi}_{\text{ном}} = 252 \text{ рад}/\text{с}$); $\Delta p_{\text{ном}}$ – номинальный перепад давления насоса, при котором достигается номинальный объемный КПД, Па ($\Delta p_{\text{ном}} = 26 \cdot 10^6 \text{ Па}$); η_v – номинальный объемный КПД насоса, который достигается для указанных выше номинальных условий ($\eta_v = 0,92$).

Максимальное давление в гидравлической системе ограничивалось нормально закрытым перепускным клапаном с величиной суммарной площади утечек $S_{\text{пот}}$, м^2 . Клапан начинает открываться в момент, когда перепад давления на нем превышает установленную величину $\Delta p_{\text{настр}}$, равную $26 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Функция изменения площади открытия клапана $S(\Delta p)$ принималась пропорциональной перепаду давления на его входе и выходе:

$$S(\Delta p) = S_{\text{пот}} + k(\Delta p_{\text{кл}} - \Delta p_{\text{настр}}),$$

где $S_{\text{пот}}$ – суммарная площадь утечек на клапане, м^2 ($1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$); $\Delta p_{\text{кл}}$ – мгновенный перепад давления между входом и выходом клапана, Па ; $\Delta p_{\text{настр}}$ – давление настройки клапана ниже которого он остается закрытым, Па ($\Delta p_{\text{настр}} = 3 \cdot 10^6 \text{ Па}$).

Коэффициент пропорциональности k определялся по зависимости:

$$k = \frac{S_{\max} - S_{\text{пот}}}{\Delta p_{\text{рег}}},$$

где $S_{\max}$ – максимальная площадь открытия клапана, м² ($S_{\max} = 5 \cdot 10^{-3}$ м²); $\Delta p_{\text{рег}}$ – диапазон регулирования клапана, Па ($\Delta p_{\text{рег}} = 3 \cdot 10^5$ Па).

Клапан становится полностью открытым в случае, когда мгновенный перепад давления $\Delta p_{\text{кл}}$ превосходит величину $\Delta p_{\max}$ (Па):

$$\Delta p_{\max} = \Delta p_{\text{настр}} + \Delta p_{\text{рег}}.$$

Для поддержания заданного перепада давления и минимизации его влияния на скорость потока гидравлической жидкости на каждой секции гидравлического распределителя моделировалась работа гидравлического компенсатора давления. Его математическое описание аналогично приведенному выше с той лишь разницей, что компенсатор является постоянно открытым, а управляющий перепад задается не разницей величин давления на входе и выходе компенсатора, а разницей на входе и выходе секции распределителя. Площадь открытия компенсатора S ($\Delta p_{\text{комп}}$) (Па) рассчитывалась по формуле

$$S(\Delta p_{\text{комп}}) = S_{\text{пот2}} - k_2(\Delta p_{\text{комп}} - \Delta p_{\text{настр2}}),$$

где $S_{\text{пот2}}$ – суммарная площадь утечек на клапане, м² ($S_{\text{пот2}} = 1 \cdot 10^{-12}$ м²); $\Delta p_{\text{комп}}$ – мгновенный перепад давления между входом и выходом компенсатора, Па; $\Delta p_{\text{настр2}}$ – давление настройки клапана, ниже которого он остается максимально открытым, Па ($\Delta p_{\text{настр2}} = 30 \cdot 10^5$ Па).

Максимальная площадь открытия клапана $S_{\max}$ для расчета коэффициента k_2 принята равной $1 \cdot 10^{-4}$ м².

Управление секцией гидрораспределителя осуществляется по управляющему сигналу, задающему ход золотника [11–13].

Мгновенные расходы $Q_p(t)$ (м³/с) через каждую секцию распределителя в каждом направлении определялись зависимостями:

$$Q_p(t) = C_Q A(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{\Delta p}{(\Delta p^2 + \Delta p_{\min}^2)^{1/4}}};$$

$$h(t) = h_0 + h_{\text{тек}}(t);$$

$$A(t) = \begin{cases} A_{\max} \frac{h(t)}{h_{\max}} + A_{\text{пот}}, & h(t) > 0, \\ A_{\text{пот}}, & h(t) \leq 0, \end{cases}$$

где C_Q – коэффициент расхода потока ($C_Q = 1$); $A(t)$ – мгновенная площадь проходного сечения

дресселя, м²; $A_{\max}$ – максимальная площадь проходного сечения дресселя, м² ($A_{\max} = 8 \cdot 10^{-6}$ м²); $h(t)$ – текущее (положительное или отрицательное) смещение элемента управления, м; h_0 – величина исходного смещения элемента управления; $h_{\text{тек}}(t)$ – смещение элемента управления относительно исходного положения, м; $h_{\max}$ – максимальное смещение элемента управления, м ($h_{\max} = 8 \cdot 10^{-3}$ м); $A_{\text{пот}}$ – суммарная площадь утечки при закрытом дресселе, м²; $\Delta p_{\min}$ – минимальный перепад давления через дрессель, при котором возможно образование турбулентного потока, рассчитанного по методу ламинарного перехода:

$$\Delta p_{\min} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\text{Re} \cdot v}{C_Q \cdot D_H} \right)^2;$$

$$D_H(t) = \sqrt{\frac{4A(t)}{\pi}};$$

где Re – критическое число Рейнольдса; $D_H(t)$ – текущий условный диаметр гидравлического отверстия, м.

Для математического моделирования работы привода отдельных звеньев манипулятора составлены дифференциальные уравнения расхода $Q_{\text{гц}}(t)$ и давления $P_{\text{гц}}(t)$ гидравлической жидкости в гидроцилиндрах при соответствующих перемещения их штоков $x_i(t)$. Преобразование энергии гидравлического потока в механическое поступательное перемещение штока гидроцилиндра описывалось следующими математическими зависимостями:

$$Q_{\text{гц}}(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\rho(t)}{\rho_{\text{атм}}} \right) (V_{\min} + A_{\text{гц}}(x_{0i} + x_i(t))) +$$

$$+ \dot{x}_i(t) \left(\frac{\rho(t)}{\rho_{\text{атм}}} \right) \varepsilon A_{\text{гц}},$$

где $Q_{\text{гц}}(t)$ – расход гидравлической жидкости в соответствующую полость гидроцилиндра, м³/с; $\rho(t)$ – значение плотности жидкости при текущем давлении в соответствующей полости гидроцилиндра, кг/м³; $V_{\min}$ – объем гидравлической жидкости, заключенный под поршнем гидроцилиндра в полностью сложенном состоянии, м³; $A_{\text{гц}}$ – эффективные площади поршней со стороны штоковых и поршневых полостей соответствующих гидроцилиндров, м²; x_{0i} – начальное положение поршня, м; $x_i(t)$ – смещение поршня относительно начального положения x_{0i} ; $\dot{x}_i(t)$ – скорость движения штока i -го гидроцилиндра, м/с; ε – направление движения поршня ($\varepsilon = \pm 1$).

Управление подачей гидравлического насоса для обеспечения потребностей гидроцилиндров осуществлялось на принципах систем

управления, чувствительных к нагрузке (Load Sensing) [14].

Сжимаемость жидкости в модели учтена на основе отношения текущей плотности жидкости к плотности жидкости при атмосферном давлении. Текущее значение плотности жидкости в зависимости от действующего в гидроцилиндре давления определялось известной зависимостью:

$$\rho(t) = \frac{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \rho_g^{\text{атм}} + \rho_l^{\text{атм}}}{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \left(\frac{p_0}{P_{\text{гц}}(t)}\right)^{\frac{1}{\gamma}} + e^{\frac{P_{\text{гц}}(t) - p_0}{\beta_1}}},$$

$$\text{где } P_{\text{гц}}(t) = \frac{F_{\text{гц}}(t)}{\varepsilon A_{\text{гц}}}.$$

Усилия $F_{\text{гц}}(\text{Н})$, передающиеся на поршни гидроцилиндров стрелы, рукояти и телескопического звена описывались следующими выражениями:

$$F_1(t) = C_{\text{СТР}} \begin{pmatrix} \sqrt{l_{A_1}^2 + l_{A_2}^2 - 2l_{A_1}l_{A_2} \times \cos(\varphi_1 - \alpha_{10} - \alpha_{11})} \\ -l_{0\text{ГЦС}} - x_1 \end{pmatrix};$$

$$F_2(t) = C_{\text{РУК}} \begin{pmatrix} \sqrt{l_{B_2B_5}^2 + l_{B_3B_5}^2 - 2l_{B_2B_5}l_{B_3B_5} \times \cos(\beta_{350} - \beta_{251})} \\ +l_{0\text{ГЦР}} - x_2 \end{pmatrix};$$

$$F_{\text{гц.стр}}(t) = \begin{cases} F_1(t) + K_{\text{демп1}}(x_1 - g_k), & \text{если } x_1 \geq g_k, \\ F_1(t) + F_{\text{дрос1}}, & \text{если } g_n < x_1 < g_k, \\ F_1(t) + C_{\text{демп1}}(x_1 - g_n), & \text{если } x_1 \leq g_n; \end{cases}$$

$$F_{\text{гц.рук}}(t) = \begin{cases} F_2(t) + K_{\text{демп2}}(x_2 - g_k), & \text{если } x_2 \geq g_k, \\ F_2(t) + F_{\text{дрос2}}, & \text{если } g_n < x_2 < g_k, \\ F_2(t) + C_{\text{демп2}}(x_2 - g_n), & \text{если } x_2 \leq g_n; \end{cases}$$

$$F_{\text{гц.тел}}(t) = \begin{cases} C_{\text{ТЕЛ}}(x_{30} - x_3) + \\ + K_{\text{демп3}}(x_3 - g_k), & \text{если } x_3 \geq g_k, \\ C_{\text{ТЕЛ}}(x_{30} - x_3) + \\ + F_{\text{дрос3}}, & \text{если } g_n < x_3 < g_k, \\ C_{\text{ТЕЛ}}(x_{30} - x_3) + \\ + C_{\text{демп3}}(x_3 - g_n), & \text{если } x_3 \leq g_n, \end{cases}$$

где $F_i(t)$ – осевые силы, действующие на шток гидроцилиндра со стороны соответствующего звена манипулятора, Н; $C_{\text{демп}i}$ (Н/м), $K_{\text{демп}i}$ (Н/м·с) – упругие и демпфирующие свойства элементов соответствующих гидроцилиндров в начальных g_n (м) и конечных g_k (м) положениях; $F_{\text{дрос}i}$ – силы сопротивления движению i -го поршня, возникающие в следствии дросселирования гидравлической жидкости из возвратной полости гидроцилиндра, Н.

Заключение. В результате проведенного анализа существующих моделей манипуляторов лесозаготовительных машин установлено, что каждая из них не в полной мере удовлетворяет требованиям по сбору данных для реализации методики прогнозирования эффективности комплексов многооперационных лесозаготовительных машин [15]. В этой связи разработана авторская математическая модель комбинированного-шарнирно-рычажного манипулятора с телескопическим звеном, позволяющая получать данные об энергопотреблении, скорости перемещения и соответствующих динамических нагрузках в конструкции манипулятора на различных технологических операциях при изменяющихся во времени кинематических положениях отдельных его звеньев.

Модель описывает кинематику и динамику металлоконструкций многозвенных манипуляторов, наиболее распространенных в лесозаготовительной отрасли, логику работы и динамику отдельных элементов силовых гидравлических приводов, дает возможность оперативного изменения кинематической схемы манипулятора, массово-геометрических характеристик его звеньев и их начальных положений, параметров силового привода и логики управления его звеньями. Модель является настраиваемой для получения данных о работе манипулятора при выполнении всего комплекса лесотехнологических операций. Особенностью модели является возможность интеграции в общую модель лесозаготовительной машины и возможность управления манипулятором в режиме «реального времени».

Данные, полученные с помощью математической модели используются при прогнозировании эффективности комплексов многооперационных лесозаготовительных машин, реализующих технологические процессы заготовки сортиментов в различных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: монография / И. М. Бартенев [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. И. М. Бартенева. М.: Флинта: Наука, 2011. 408 с.
2. Mettin U., Miranda La Hera P. X. Modelling and Control Design for a Hydraulic Forestry Crane. Umeå, Sweden: Umeå University, 2005. 37 p.

3. Heinze A. Modelling, simulation and control of a hydraulic crane. Växjö: Institutionen for Teknik och desing, 2007. 137 p.
4. Chu Y., Espy V., Zhang H., Bunes O. Modelling and Simulation of an Offshore Hydraulic Crane // 28th European Conference on Modelling and Simulation, May 2014. DOI: 10.7148/2014-0087.
5. Szabolcs F. Towards Semi-Automation of Forestry Cranes. Automated Trajectory Planning and Active Vibration Damping. Umeå, Sweden: Umeå University, 2017. 101 p.
6. Жуков А. В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Л., 1987. 315 л.
7. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования: в 2 ч. Ч. 2. Минск: БГТУ, 2015. 139 с.
8. Форвардер Амкодор 2661-01. Руководство по эксплуатации 2661.00.000-A РЭ // Амкодор. URL: https://amkodor.by/services/ekspluatatsionnaya-dokumentatsiya/2661-01-A_РЭ.pdf (дата обращения: 15.09.2023).
9. Drive and Control Systems for Forestry Machines. From the Gear Pump to Electronic Harvester Management // Boschrexroth. URL: http://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/sub_websites/brus_brh_m/en/Documentation_and_Resources/9_brochures_and_catalogs/a_downloads/re98057.pdf (date of access: 03.10.2023).
10. Lögren B. Kinematic Control of Redundant Knuckle Booms with Automatic Path Following Functions // DiVA portal. URL: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:277303> (date of access: 03.10.2023).
11. Wang J., Dale Greene W. An Interactive Simulation System for Modeling Stands, Harvests, and Machines // Journale of Forest Engineering. 1999. Vol. 10, no. 1. P. 81–99.
12. Hesse K. Components and systems for tractor, stacker and combine // Bosch Rexroth Mobile Training. February 2003. P. 18–20.
13. Drive and Control Systems for Combine Harvesters and Forage Harvesters. Bosch Rexroth AG. 2001. RE 98071 // Airline Hydraulics. URL: https://airlinemedia.airlinehyd.com/Literature/Manufacturer_Catalogs/Bosch%20Rexroth/DriveControlSystems_Combine_ForageHarvestors-re98071_2001-11.pdf (date of access: 19.09.2023).
14. Load Sensing Systems Principle of Operation // Eaton Corporation. No. 03-206. 1992. 28 p. URL: <https://dokumen.tips/documents/eaton-load-sensing-systems-principle-of-operationpdf.html> (date of access: 19.09.2023).
15. Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Мохов С. П. Методика оценки технических характеристик форвардеров на стадии проектирования // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 15–19.

References

1. Bartenev I. M., Emtyl' Z. K., Tatarenko A. P., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Bukhtoyarov L. D. *Gidromanipulyatory i lesnoye tekhnologicheskoye oborudovaniye* [Hydraulic manipulators and forestry technological equipment]. Moscow, Flinta Publ., Nauka Publ., 2011. 408 p. (In Russian).
2. Mettin U., Miranda La Hera P. X. Modelling and Control Design for a Hydraulic Forestry Crane. Umeå, Sweden, Umeå University, 2005. 37 p.
3. Heinze A. Modelling, simulation and control of a hydraulic crane. Växjö, Institutionen for Teknik och desing, 2007. 137 p.
4. Chu Y., Espy V., Zhang H., Bunes O. Modelling and Simulation of an Offshore Hydraulic Crane // 28th European Conference on Modelling and Simulation, May 2014. DOI: 10.7148/2014-0087.
5. Szabolcs F. Towards Semi-Automation of Forestry Cranes. Automated Trajectory Planning and Active Vibration Damping. Umeå, Sweden, Umeå University, 2017. 101 p.
6. Zhukov A. V. *Teoreticheskiye osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh lesnykh mashin. Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Theoretical bases of a choice of technical parameters and improvement of operational properties of special forest machines. Dissertation DSc (Engineering)]. Leningrad, 1987. 315 p. (In Russian).
7. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. *Osnovy proyektirovaniya lesnykh mashin i sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya* [Fundamentals of forestry machine design and computer-aided design systems]. Minsk, BSTU Publ., 2015. 139 p. (In Russian).
8. Forvarder Amkodor 2661-01. Operating manual 2661.00.000-A RE. Available at: https://amkodor.by/services/ekspluatatsionnaya-dokumentatsiya/2661-01-A_РЭ.pdf (accessed 15.09.2023) (In Russian).
9. Drive and Control Systems for Forestry Machines. From the Gear Pump to Electronic Harvester Management. Available at: http://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/

sub_websites/brus_brh_m/en/Documentation_and_Resources/9_brochures_and_catalogs/a_downloads/re98057.pdf (accessed 03.10.2023).

10. Lögren B. Kinematic Control of Redundant Knuckle Booms with Automatic Path Following Functions. Available at: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:277303> (accessed 03.10.2023).

11. Wang J., Dale Greene W. An Interactive Simulation System for Modeling Stands, Harvests, and Machines. *Journal of Forest Engineering*, 1999, vol. 10, no. 1, pp. 81–99.

12. Hesse K. Components and systems for tractor, stacker and combine. *Bosch Rexroth Mobile Training*. February 2003, pp. 18–20.

13. Drive and Control Systems for Combine Harvesters and Forage Harvesters. Bosch Rexroth AG. – 2001. RE 98071. Available at: https://airlinemedia.airlinehyd.com/Literature/Manufacturer_Catalogs/Bosch%20Rexroth/DriveControlSystems_Combine_ForageHarvestors-re98071_2001-11.pdf (accessed 19.09.2023).

14. Load Sensing Systems. Principle of Operation. *Eaton Corporation*, no. 03-206, 1992. 28 p. Available at: <https://dokumen.tips/documents/eaton-load-sensing-systems-principle-of-operationpdf.html> (accessed 19.09.2023).

15. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R., Mokhov S. P. Methodology for assessing technical characteristics of forwarders at the design stage *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2 (184): Forest and Woodworking Industry, pp. 15–19 (In Russian).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), 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: gsa@belstu.by

Goronovsky Andrey Romanovich – PhD (Engineering), 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: arg@belstu.by

Поступила 18.10.2023

УДК 630*377.4:625.711.84

М. Т. Насковец¹, Ю. А. Ким², П. Н. Жлобич¹, Т. М. Тявловская², О. К. Щербакова²¹Белорусский государственный технологический университет²Белорусский национальный технический университет**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНОЙ НАГРУЗКИ С ГРУНТОВЫМИ ОСНОВАНИЯМИ ЛЕСНЫХ ДОРОГ БЕЗ ПОКРЫТИЙ**

Поиски решения проблемы взаимодействия транспортных средств с поверхностью дорожного полотна при движении по лесным дорогам без покрытий (сельскохозяйственным дорогам или промышленным транспортным коммуникациям) весьма актуальны ввиду недостаточной изученности данного явления в теоретическом плане. С этой целью рассмотрены вопросы функционального назначения автомобильного движителя как системы колес с пневматическими шинами.

Статья содержит анализ конструктивных особенностей подвижного состава лесотранспортных средств с точки зрения сочетания осей подвижного состава и наличия в них колес, что несомненно следует учитывать при передаче подвижной нагрузки через пятно контакта с грунтовой поверхностью. Данный аспект взаимодействия оказывает существенное влияние на работу дорожной конструкции в процессе перераспределения нагрузки по ее глубине и ширине грунтового массива.

Значительное внимание в статье уделено процессу формирования колеи, происходящему в толще грунтового основания при движении по его поверхности подвижной колесной нагрузки. Теоретические исследования указывают на зависимость образования колеи в процессе перемещения колес ходовых систем от влажностного режима грунта, а также их уплотняющего воздействия на грунтовое основание, которое напрямую связано с формой применяемых шин и характером распределения давления в пятне контакта.

Ключевые слова: осевые нагрузки, колесный движитель, взаимодействие колеса с дорожным полотном, дороги без покрытий, колееобразование.

Для цитирования: Насковец М. Т., Ким Ю. А., Жлобич П. Н., Тявловская Т. М., Щербакова О. К. Теоретические предпосылки взаимодействия колесной нагрузки с грунтовыми основаниями лесных дорог без покрытий // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 144–149.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-19.

M. T. Naskovets¹, Yu. A. Kim², P. N. Zhlobich¹, T. M. Tyavlovskaya², O. K. Shcherbakova²¹Belarusian State Technological University²Belarusian National Technical University**THEORETICAL PREREQUISITES OF INTERACTION OF WHEEL LOAD WITH SOIL BASES OF FOREST ROADS WITHOUT COVERINGS**

The search for a solution to the problem of interaction of vehicles with the surface of the roadbed when driving on unpaved forest roads (agricultural roads or industrial transport communications) is quite relevant due to its insufficient theoretical knowledge. For this purpose, the issues of the functional purpose of an automobile engine, as a system of wheels with pneumatic tires, are considered.

The article contains an analysis of the design features of the rolling stock of forest vehicles, from the point of view of the combination of the axes of the rolling stock and the presence of wheels in them, which undoubtedly should be taken into account when transferring the rolling load through the contact spot with the ground surface. This aspect of interaction has a significant impact on the work of the road structure in the process of redistribution along its depth and width of the soil massif.

Considerable attention is paid in the article to the process of formation of ruts occurring in the thickness of the soil base when moving a movable wheel load along its surface. Theoretical studies indicate the dependence of the formation of ruts during the movement of wheels of running systems on the moisture regime of the soil, as well as their compacting effect on the soil base, which is directly related to the shape of the tires used and the nature of the pressure distribution in the contact patch.

Keywords: axial loads, wheel propulsion, wheel-to-road interaction, unpaved roads, track formation.

For citation: Naskovets M. T., Kim Yu. A., Zhlobich P. N., Tyavlovskaya T. M., Shcherbakova O. K. Theoretical prerequisites of interaction of wheel load with soil bases of forest roads without coverings. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 144–149 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-19.

Введение. В последние годы в республике наблюдается рост заготовки древесины, что приводит к увеличению объемов лесных грузо-перевозок и протяженности маршрутов движения лесотранспортных средств по дорожным сетям лесных территорий. А это требует повышения величины осевых нагрузок транспортных средств в процессе перевозки лесных грузов. В свою очередь, повышенная грузоподъемность лесовозных автопоездов и первичного транспорта (форвардеров, прицепных тележек и др.) влечет за собой увеличение их мощности, применение более крупногабаритных движителей и других конструктивных изменений [1, 2]. Возрастают также нагрузки на опорную поверхность. Следовательно, необходимо более детально рассмотреть теоретические аспекты передачи колесной нагрузки в процессе ее воздействия на поверхность транспортного пути.

Основная часть. При рассмотрении взаимодействия колеса с поверхностью дорожного полотна следует отметить, что оно происходит посредством *движителя*. На лесовозных автомобилях, тракторах и прицепных (полуприцепных) транспортных средствах применяется преимущественно *колесный движитель*, представляющий собой систему колес с эластичными пневматическими шинами [3, 4].

Применение пневматических шин отличается рядом особенностей, оказывающих влияние на поведение транспортного средства. Так, автомобильные колеса выполняют две основные функции:

- передают нагрузку и поддерживают вес автомобиля в процессе движения подвижного состава, обмениваясь вертикальными силами с поверхностью дороги;
- непосредственно воспринимают и передают на транспортное средство воздействие неровностей дорожного полотна, которые влияют также на траекторию движения транспортного средства.

Выполнение первой функции возможно с помощью жестких колес в соответствии с действующими и временно устанавливаемыми сезонными ограничениями, однако с увеличением скорости способность воспринимать боковые и продольные силы становится все более важным параметром, поэтому на их смену пришли колеса с эластичными шинами.

Основополагающая функция пневматических шин состоит в распределении вертикальной нагрузки по опорной поверхности, называемой пятном контакта колеса с дорожным полотном [5], которое с точки зрения снижения величины удельного давления должно быть достаточно большим, чтобы одновременно амортизировать имеющиеся неровности дороги (рис. 1).

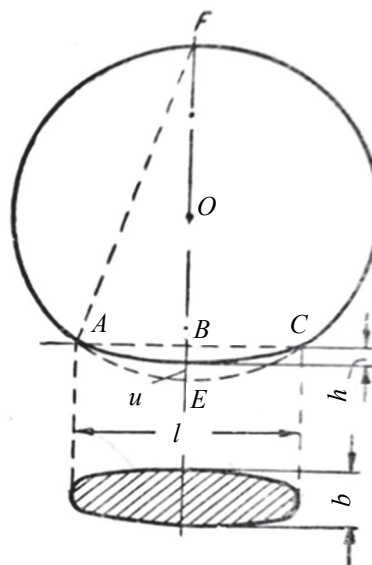


Рис. 1. Образование пятна контакта при взаимодействии колеса с дорожным полотном

В данном случае крайне важно, чтобы эластичность шины в разных направлениях была распределена особым образом, в частности на радиальных шинах вертикальная деформация выше из-за большей эластичности боковых участков шины, а окружная деформация меньше за счет направления нитей корда.

Важную роль в поведении шины при контакте с дорогой играет ее протектор, так как он изготавливается из вулканизированной резины. Это обстоятельство создает поверхность контакта с дорогой и определяет трение на границе раздела шины и грунта.

Особое значение при передаче нагрузки имеет особенность лесовозного подвижного состава – различное сочетание осей и односкатных либо двускатных колес на них (рис. 2) [6].

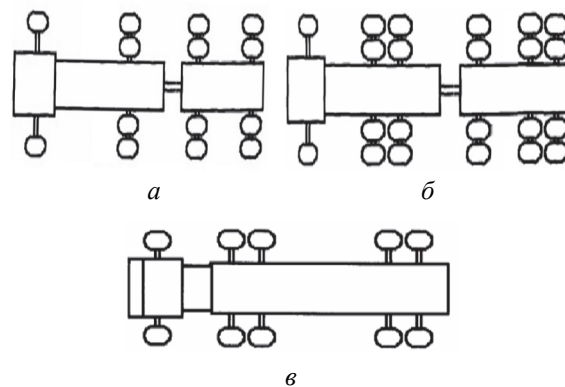


Рис. 2. Примеры сочетания осей и колес лесовозных автопоездов:
а и б – соответственно четырехосный и шестиосный автопоезд с двухскатными колесами;
в – пятиосный автопоезд с односкатными колесами

Колеса осей, разнесенных на значительное расстояние, создают импульсы нагрузки с определенным интервалом времени действия. Такое воздействие нагрузки является знакопеременным и разрушительно влияет на состояние дорог, особенно на грунтовое дорожное полотно.

Луковицы напряжений (рис. 3) от каждого из спаренных колес, распространяющиеся вглубь грунтового массива, пересекаются и в этой зоне происходит суммирование напряжений [7].

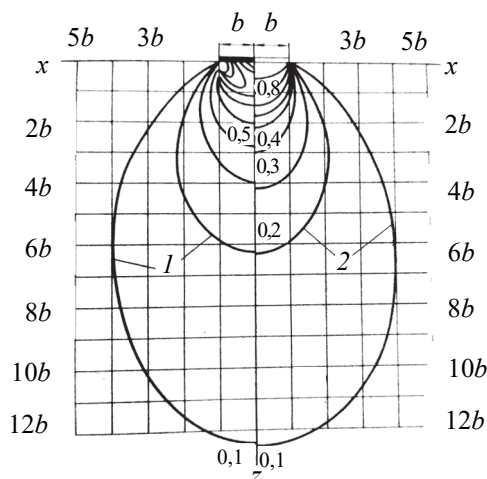


Рис. 3. Кривые равных вертикальных нормальных напряжений от нагрузки, приложенной к жесткой (1) и гибкой (2) бесконечным полосам

Сдвигание колес (рис. 4) является одним из способов снижения нагрузки на полосу [8]. Однако эта мера имеет негативную сторону – поперечное перемещение грунта с образованием буртиков не только за пределами колеи, но и в межколесном пространстве (рис. 5).

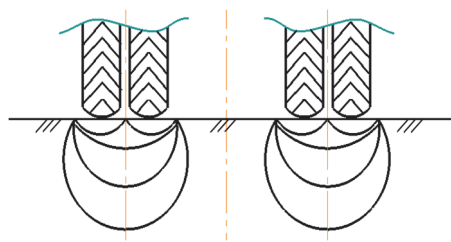


Рис. 4. Распределение напряжений по глубине дорожной конструкции при воздействии спаренных колес

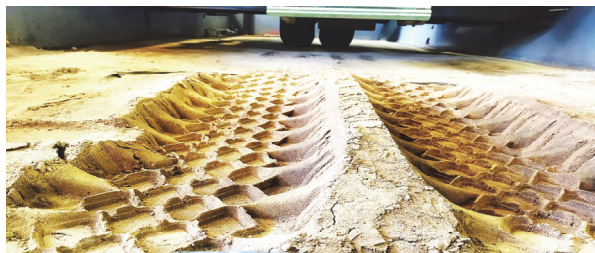


Рис. 5. Выпираание грунта при воздействии нагрузки от спаренных колес

Как следует из рис. 4, при движении колесной пары подвижного состава грунт уплотняется колесами и выпучивается, образуя по бокам колеи и между колесами рыхлый валик. Величина валиков зависит от нагрузки на колесо и механических свойств грунта, в частности от угла внутреннего трения грунта.

Одним из эффективных и наиболее доступных способов увеличения площади пятна контакта колесного движителя с опорной поверхностью также является способ регулирования величины давления воздуха в шинах колес в пределах значений, допустимых заводом-изготовителем шин. Однако такой способ предполагает использование специальных средств автоматической регулировки давления воздуха в шинах.

Меры, о которых шла речь, относятся к уменьшению вредного воздействия ходовых систем транспортных средств на опорную поверхность. В свою очередь разрабатываются способы увеличения надежности и сроков эксплуатации опорных поверхностей дорожного полотна.

Исследования, проводимые с шиной Ф-82 (71×47-25) при нагрузке 5 кН, показали, что напряжение от воздействия движителя распространяется на глубину до полуметра. Таким образом, оно воздействует не только на верхний слой, но и на подстилающий его нижний. В верхнем слое происходит образование колеи (рис. 6), вызванное перемещением частиц грунта как по глубине, так и в стороны по ширине беговой дорожки шины.

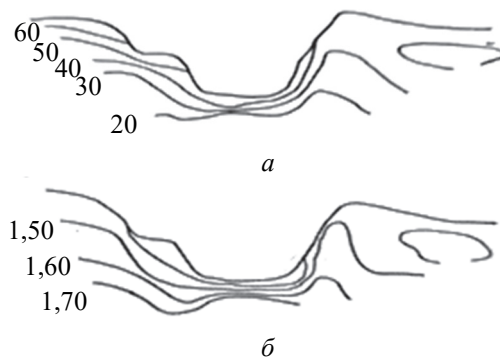


Рис. 6. Уплотнение грунта в колее:
а – перераспределение влажности грунта (в процентах);
б – изменение плотности (объемного веса) грунта

Процесс уплотнения грунта сопровождается перераспределением влажности в колее [9–12]. На дне и несколько ниже дна (рис. 6, а) влажность грунта значительно меньше, чем на поверхности дороги. Соответственно и наибольшее уплотнение (рис. 6, б), характеризуемое объемным весом грунта, наблюдается на некоторой глубине от дна колеи, так как непосредственно на дне колеи частицы грунта испытывают еще и разрыхляющее действие касательных сил, затухающих на незначительной глубине.

Величина бокового смещения грунта зависит при прочих равных условиях от ширины колеса [13, 14]. В нижнем подстилающем слое напряжения распространяются на значительно большие объемы грунта, в результате чего происходит его выпирание к краям дороги и как следствие вызывает проседание дорожного полотна [15].

Как было отмечено ранее, при движении на автомобильное колесо действует сложная система сил и моментов, обусловленная не только влиянием внешней среды, но и факторами, воздействующими со стороны механизмов автомобиля. В силу эластичных свойств шин при взаимодействии с опорной поверхностью происходит ее деформация в различных направлениях. В то же время опорная поверхность деформируется, и в зависимости от ее прочности на ней могут образовываться различного вида колеи (рис. 7).

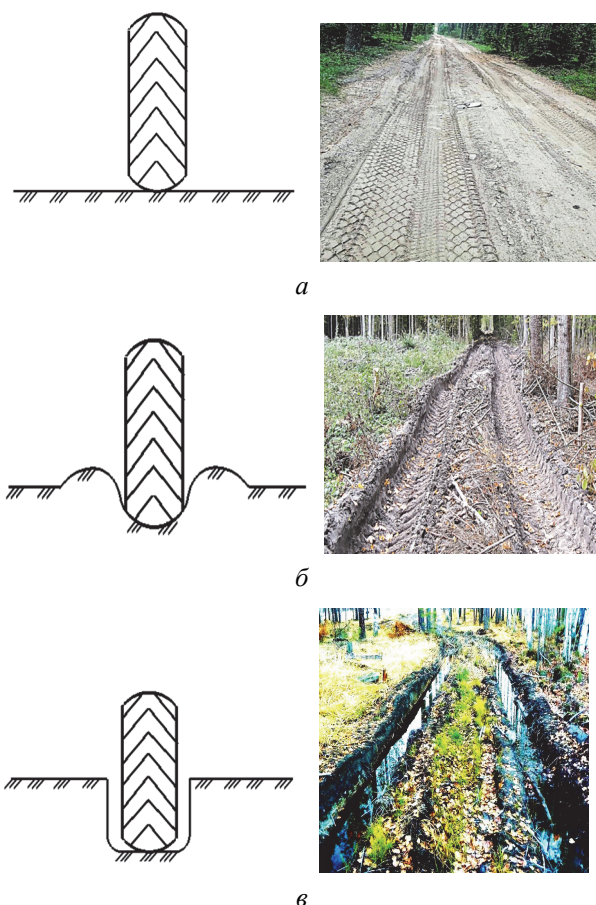


Рис. 7. Варианты образования колеи в зависимости от прочности грунта опорной поверхности:
 а – грунт уплотнен при оптимальной влажности;
 б – переувлажненный грунт;
 в – грунт с низкой несущей способностью

При взаимодействии шины и грунта выделяют следующие модели движения колеса (рис. 8):

- деформируемое колесо по недеформируемой поверхности, когда деформация грунтов много раз меньше деформации колеса (модель применима при качении колеса по асфальтовым и бетонным дорогам);
- недеформируемое колесо по деформируемой поверхности, когда деформация грунта значительно превышает деформацию шины (характерно при движении по рыхлому снегу или сыпучему песку, по болотистой местности);
- деформируемое колесо по деформируемой поверхности. Учитывать одновременную деформацию колеса и дороги необходимо в том случае, если величина этих деформаций соизмерима.

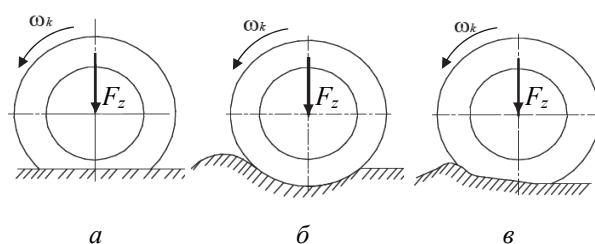


Рис. 8. Модели движения колеса по опорной поверхности дороги:
 а – деформируемое колесо по недеформируемой дороге; б – недеформируемое колесо по деформируемой дороге; в – деформируемое колесо по деформируемой дороге

Приведенные модели достаточно полно отображают взаимодействие колес автотранспортных средств с поверхностью их контакта.

Закключение. На основании вышесказанного можно констатировать, что существующие условия движения по автомобильным дорогам общего пользования и лесохозяйственным дорогам с песчано-гравийными, гравийными, щебеночными покрытиями и особенно по подъездным путям к лесохозяйственным магистралям не позволяют в полной мере осуществлять грузовые перевозки.

Проведенные научные исследования позволяют определить порядок действия сил при воздействии колесной нагрузки на дорожное полотно и составить более детальные схемы для проведения дальнейших расчетов.

Новые подходы к учету взаимодействия «колеса с дорогой» являются основой для разработки конструктивных решений по модификации подвижного состава и конструкций лесных дорог, способных эффективно решать в производственных условиях транспортные задачи на лесных территориях.

Список литературы

1. Скойбеда А. Т. Автоматизация ходовых систем колесных машин. Минск: Наука и техника, 1979. 277 с.
2. Бочаров Н. Ф. Транспортные средства на эластичных движителях. М.: Машиностроение, 1974. 208 с.

3. Маркина А. А., Давыдова В. В. Теория движения колесных машин. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 216 с.
4. Сазонов И. С., Ким В. А., Ки Йонг Чой. Теория автомобиля. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 164 с.
5. Кишинский М. И. Эксплуатация и ремонт лесовозных дорог. М.: Гослесбумиздат, 1954. 326 с.
6. Насковец М. Т. Транспортное освоение лесов Беларуси и компоненты лесотранспорта. Минск: БГТУ, 2010. 178 с.
7. Бабаков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М.: Высш. шк., 1986. 239 с.
8. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев [и др.]. Минск: Лесная пром-сть, 1990. 416 с.
9. Леонович И. И., Вyrко Н. П. Механика земляного полотна. Минск: Наука и техника, 1975. 232 с.
10. Леонович И. И. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / под общ. ред. И. И. Леоновича. Минск: БГТУ, 2015. 285 с.
11. Леонович И. И. Автомобильные лесовозные дороги. Минск: Высш. шк., 1965. 396 с.
12. Бабаскин Ю. Г. Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна. Минск: ИНФРА-М, 2013. 462 с.
13. Бабков В. Ф. Напряжения в грунтовых основаниях дорожных одежд // Труды ДорНИИ. 1941. Вып. 3. С. 99–196.
14. Орда А. Н. Исследование механики колеобразования и уплотнения почвы колесными движителями и обоснование требований к многоосным ходовым системам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1978. 16 с.
15. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Деформация грунтов дорожных насыпей. М.: Автотрансиздат, 1957. 71 с.

References

1. 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).
2. Bocharov N. F. *Transportnyye sredstva na elastichnykh dvizhitelyakh* [Vehicles with elastic propellers]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 208 p. (In Russian).
3. Markina A. A., Davydova V. V. *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [Theory of the movement of wheeled vehicles]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2021. 216 p. (In Russian).
4. Sazonov I. S., Kim V. A., Ki Jong Choj. *Teoriya avtomobilya* [Car theory]. Mogilev, Belorusko-Rosyskiy universitet Publ., 2017. 164 p. (In Russian).
5. Kishinskiy M. I. *Ekspluatatsiya i remont lesovoznykh dorog* [Operation and repair of logging roads]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1954. 326 p. (In Russian).
6. 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).
7. Babakov V. F., Bezruk V. M. *Osnovy gruntovedeniya i mekhaniki gruntov* [Fundamentals of soil science and soil mechanics]. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1986. 239 p. (In Russian).
8. 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).
9. Leonovich I. I., Vyrko N. P. *Mekhanika zemlyanogo polotna* [Mechanics of the roadbed]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 232 p. (In Russian).
10. Leonovich I. I. *Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog* [Water-thermal regime of the roadbed]. Minsk, BSTU Publ., 2015. 285 p. (In Russian).
11. Leonovich I. I. *Avtomobil'nyye lesovoznyye dorogi* [Automobile logging roads]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1965. 396 p. (In Russian).
12. 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).
13. Babkov V. F. Stresses in soil foundations of pavements. *Trudy DorNII* [Proceedings of Road Research Institute], 1941, issue 3, pp. 99–196 (In Russian).
14. Orda A. N. *Issledovaniye mekhaniki koleyeobrazovaniya i uplotneniya pochvy kolesnymi dvizhitel'nyami i obosnovaniye trebovaniy k mnogoosnym khodovym sistemam. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the mechanics of rutting and soil compaction by wheel movers and justification of safety for multi-axle running systems. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 1978. 16 p. (In Russian).
15. Harhuta N. Ya., Vasil'ev Yu. M. *Deformatsiya gruntov dorozhnykh nasypey* [Soil deformation of road embankments]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1957. 71 p. (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 (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

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

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

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

Шербакова Ольга Константиновна – старший преподаватель кафедры инженерной графики машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: igmp_atf@bntu.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 of 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., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: pashkzhlobich@gmail.by

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

Shcherbakova Ol'ga Konstantinovna – Senior Lecturer, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Поступила 18.10.2023

УДК 631.316

Т. В. Кожарина¹, С. В. Карпов¹, А. Р. Гороновский²¹Тамбовский государственный технический университет, Российская Федерация²Белорусский государственный технологический университет**РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

В данной статье представлено исследование, которое было проведено с целью изучения возможностей и проблем, связанных с применением 3D-сканирования в обратном проектировании и при контроле качества продукции. Исследование основано на применении методов вычислительной гидродинамики для комплексного анализа зон повышенной истираемости почвообрабатывающих инструментов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время существует все больше методов, которые способствуют восстановлению деталей с использованием принципов реверс-инжиниринга. Одним из таких методов является вычислительная гидродинамика (CFD), которая используется для моделирования и численного решения уравнений, описывающих движение жидкостей и газов. В данном случае CFD применяется для анализа воздействия почвы на рабочие органы почвообрабатывающих машин. При помощи методов CFD было проведено детальное исследование течения почвы вокруг рабочих органов, а также оценено воздействие давления и силы, которые возникают в процессе работы. Приведены ссылки на предыдущие исследования авторов, включающие анализ возможностей и проблемы технологии 3D-сканирования для обратного проектирования продукции с целью проведения конечно-элементных анализов деталей почвообрабатывающих машин.

Ключевые слова: абразивный износ, износ деталей, эрозия, 3D-сканирование, редактирование сеточной геометрии, твердотельная геометрия, конечно-элементный анализ, контроль качества, обработка почвы, моделирование почвообработки.

Для цитирования: Кожарина Т. В., Карпов С. В., Гороновский А. Р. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин для проведения конечно-элементного анализа // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 150–156. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-20.

T. V. Kozharina¹, S. V. Karpov¹, A. R. Goronovsky²¹Tambov State Technical University, Russian Federation²Belarusian State Technological University**REVERSE ENGINEERING OF TILLAGE MACHINE PARTS
FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS**

This article presents a study that was conducted to explore the possibilities and problems associated with the use of 3D scanning in reverse engineering and product quality control. The study is based on the application of computational fluid dynamics methods for the complex analysis of zones of increased abrasion of tillage tools. The results obtained allow us to conclude that at present there are more and more methods that allow to rebuild a part using the principles of reverse engineering. One of such methods is computational fluid dynamics (CFD), which is used for modeling and numerical solution of equations describing the motion of liquids and gases. In this case, CFD is used to analyze the impact of soil on the working bodies of tillage machines. With the help of CFD methods, a detailed study of the soil flow around the working organs was carried out, and the impact of pressure and forces that arise during work was also evaluated. References to previous studies of the authors are given, including an analysis of the possibilities and problems of 3D scanning technology for reverse engineering of products in order to conduct finite element analyses of parts of soil-processing machines.

Keywords: abrasive wear, wear of parts, erosion, 3D scanning, editing of grid geometry, solid geometry, finite element analysis, quality control, tillage, modeling of tillage.

For citation: Kozharina T. V., Karpov S. V., Goronovsky A. R. Reverse engineering of tillage machines parts for finite element analysis. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry, Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 150–156 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-20.

Введение. Обоснование параметров лесохозяйственных и сельскохозяйственных инструмен-

тов является важным и актуальным вопросом для рационального использования любого современ-

ного хозяйства. Это связано с тем, что такие инструменты используются для обработки почвы, посева, ухода за растениями и животными, сбора урожая и других работ на фермах, полях и лесах.

Неправильное использование или небрежное отношение к инструментам может привести к их поломке или неисправности, что затрудняет работу и снижает производительность хозяйств [1–3]. Кроме того, неисправные инструменты могут стать причиной травм и несчастных случаев на производстве.

Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин является актуальной темой в связи с необходимостью улучшения качества и производительности почвообрабатывающей техники, а также снижения затрат на ее производство и эксплуатацию. В условиях постоянного развития технологий и повышения требований к продукции реверс-инжиниринг деталей становится все более важным инструментом для разработки новых и улучшения существующих моделей почвообрабатывающей техники.

В данной работе восстановление геометрии инструмента основывается на 3D-сканировании. Для того чтобы начать процесс сканирования, необходимо провести предварительную настройку 3D-сканера. Важным этапом является подбор оптимальной мощности света и частоты лазера, которые будут соответствовать условиям освещения в помещении и характеристикам поверхности, которую нужно отсканировать. Благодаря высокой точности и возможности создания цифровой трехмерной модели объекта 3D-сканеры нашли широкое применение в инженерной сфере. Они помогают решать вопросы проектирования, контроля качества производства и инспектирования объектов. Полученную модель можно использовать для анализа и расчетов в CAD/CAE-системах. Существует множество различных моделей 3D-сканеров, каждый из которых обладает своими уникальными возможностями и свойствами, позволяющими оцифровывать объекты любой формы и размера – от колеса автомобиля до лица человека.

Структура методики. В работе [4] представлена технология 3D-сканирования, применяемая в обратном проектировании. Использование 3D-сканирования в процессе реверс-инжиниринга включает в себя три основных этапа: сканирование, точечную обработку и разработку геометрической модели для конкретного приложения.

Для достижения более точного сканирования поверхности образцов рекомендуется использовать специальный матирующий спрей. Этот спрей позволяет улучшить качество сканирования, делая поверхность более однородной и устраняя возможные блики и отражения.

Оптимальным способом проведения сканирования является стационарное расположение сканера с последующим перемещением или вращением образцов. Данный подход позволяет достичь более высокой точности результатов, так как образцы могут быть сканированы с разных углов и позиций.

Однако при таком сканировании могут возникать графические артефакты, такие как блики от поворотного стола. Для устранения этих артефактов необходимо провести последующую ручную обработку данных. Это позволит получить более чистые и точные результаты сканирования.

Следующим этапом после сканирования является конвертация облака точек в полигональную модель с использованием треугольников. Количество треугольников, которые будут составлять модель, зависит от размеров сканируемой детали и точности используемого оборудования. Большие модели со сложной формой могут требовать большего количества треугольников для достижения достаточной детализации.

Однако при конвертации облака точек возможно появление отверстий в полигональной сетке. Для их устранения могут применяться различные алгоритмы заполнения, основанные на идентичной кривизне, касательности в окрестности отверстия или на основе плоской полигональной сетки.

В случае если применение этих алгоритмов не дает удовлетворительных результатов, таких как искажение поверхности или появление выпуклостей, рекомендуется повторное сканирование. Это позволит получить более точную модель поверхности образца. В исследовании [5] проработаны возможные ошибки размеров в процессе сканирования, а также показаны наилучшие технологические параметры для использования 3D-сканера.

Таким образом, использование специального матирующего спрея, стационарного сканирования с перемещением или вращением образцов, а также последующая ручная обработка данных и конвертация в полигональную модель с помощью треугольников являются важными шагами для достижения высокой точности и качества сканирования.

Полученная полигональная геометрия, по сути, является трехмерной геометрической моделью, которую можно назвать растровой. Она не поддается традиционным методам редактирования B-Rep-геометрии, которые обычно используются в системах автоматизированного проектирования. В связи с этим возникает необходимость применения методов обратного инжиниринга для восстановления геометрии объекта. Данные методы основаны на аппроксимации

полигональных поверхностей и сечений. Обратный инжиниринг – это процесс анализа и восстановления информации о продукте или объекте, основанный на их физической структуре, функциях и характеристиках. В случае полигональной геометрии этот процесс включает в себя анализ полигональных поверхностей и сечений, чтобы получить более точное представление о форме и структуре объекта.

Развитие вычислительных мощностей компьютерной техники и систем автоматизированного проектирования позволило достоверно воспроизводить трехмерную геометрию почвообрабатывающих рабочих органов. Это открыло возможности для преодоления недостатков аналитических и эмпирических методов исследования почвенных взаимодействий за счет применения методов численного моделирования [6]. Среди численных методов можно выделить две большие группы – континуальные и дискретные. Метод конечных элементов FEM (Finite Element Method) является континуальным методом и заключается в разбиении на конечное количество элементов области, в которой ищется решение дифференциальных уравнений. Наиболее известные программы для расчетов с помощью метода конечных элементов – ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, COSMOS/M, LS-DYNA, SOLIDWORKS Simulation. Вычислительная гидродинамика CFD (Computational Fluid Dynamics) также относится к континуальным методам. Она является подразделом механики сплошных сред, включающим в себя комплекс математических, физических и численных методов, используемых для исследования потоковых процессов. Данный метод реализован в таких программах, как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, FlowVision, Flow Simulation, OpenFOAM.

В исследовании [7] приводятся данные об использовании дискретных элементов FEM для изучения взаимодействия с почвой двугранного клина и лемешно-отвальной поверхности плуга. Моделирование осуществлялось с применением программы LS-DYNA. Используемые в исследовании численные модели, описывающие взаимодействие рабочих органов с почвенной средой, могут достаточно успешно применяться для моделирования процессов почвообработки. Такой подход позволяет производить оценку напряжений и деформаций, возникающих в почвенном пласте, а также характер их распределения.

Ранее проведенные исследования [8] указывают на перспективность применения методов вычислительной гидродинамики (CFD) при анализе взаимодействия рабочих органов с почвой. Экспериментально подтверждено, что модель ньютоновской вязкой жидкости может использоваться в качестве аналога грунта. Однако

стоит отметить, что скорости и давления, моделируемые воздействием почвы на рабочие органы почвообрабатывающих машин, сильно зависят от вязкости моделируемой среды.

Численное решение уравнений динамики позволяет определить поле скоростей среды, распределение давлений и траектории движения частиц почвы. В данном исследовании используется среда SolidWorks Flow Simulation, которая также предоставляет возможность численного моделирования взаимодействия почвы с рабочими органами.

Дополнительно стоит отметить, что использование методов CFD позволяет не только анализировать воздействие рабочих органов на почву, но и оптимизировать их конструкцию. Например, путем изменения формы рабочего органа или его параметров можно достичь более эффективного воздействия на почву, что в свою очередь может повысить производительность почвообрабатывающих машин.

Экспериментальная часть. Для выполнения данной работы использовали лапку сошника Amazone в качестве прототипа. Это устройство представлено на рис. 1.



Рис. 1. Лапка сошника Amazone

Для того чтобы избежать бликов и отражений во время сканирования, деталь была предварительно очищена. Затем на поверхность нанесли специальный матирующий спрей, как показано на рис. 2. После нанесения спрея приступили к сканированию.

Для выполнения дальнейших работ использовали 3D-сканер Einscan Pro 2X Plus, который монтировался на неподвижный штатив. Лапка сошника располагалась на специальном поворотном столе. Для достижения оптимальной точности воспроизведения геометрии детали в производстве было использовано 15 поворотов стола. Каждый цикл поворота стола регистрировал положение около миллиона точек поверхности и на основе этой информации была создана полигональная поверхность, содержащая большое количество треугольников. Работа на данном этапе была реализована в программе EXScanPro.



Рис. 2. Лапка сошника Amazone перед сканированием

Дальнейшая работа с полигональной геометрией проводилась в системе SolidWorks. Из-за возможных погрешностей при сканировании полученная модель может немного отличаться от исходного инструмента.

На первом этапе необходимо полученную геометрию выровнять относительно трех базовых плоскостей, так как после сканирования модель не имеет никаких привязок и зависимостей в пространстве. Выравнивание показано на рис. 3.

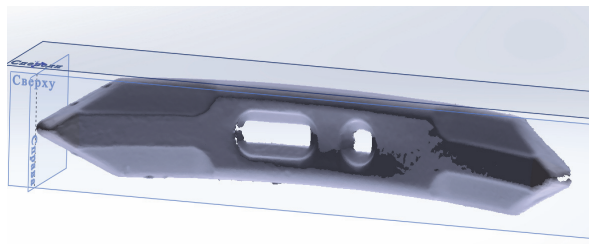


Рис. 3. Выравнивание модели

Далее на задней плоскости необходимо создать эскиз, в данном случае геометрией эскиза является проекция объекта. Для дальнейшей работы создается твердотельная модель. В силу погрешности сканирования возможны незначительные отклонения от размеров натуральной модели. Чтобы получить более точные размеры, необходимо вернуться к эскизам на последних этапах моделирования, промежуточный этап процесса показан на рис. 4.

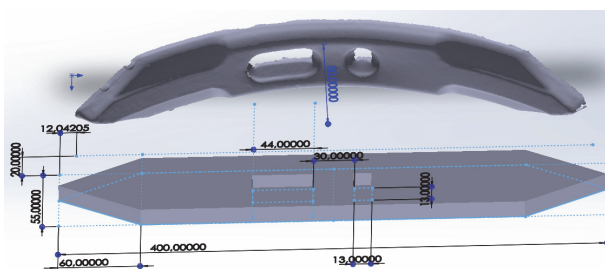


Рис. 4. Процесс создания модели

После создания модели сгибаем ее с помощью инструмента «Гибкие» и проверяем все поверхности и размеры, как показано на рис. 5. Если обнаружены значительные отличия, то следует вернуться к эскизам на более ранние этапы и внести изменения в размеры [5].

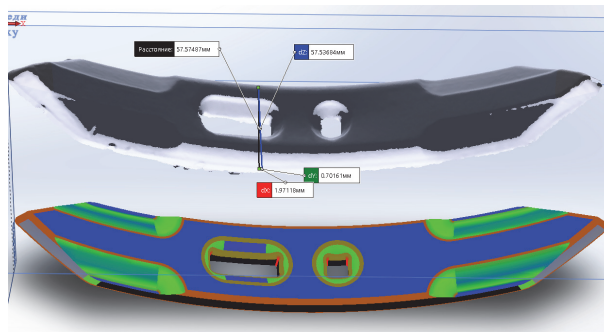


Рис. 5. Анализ поверхностей

На рис. 6 показан окончательный результат. Сверху изображена лапка сошника после сканирования, а снизу после реверс-инжиниринга.



Рис. 6. Лапка сошника до и после реверс-инжиниринга

Для решения внешней задачи обтекания неподвижного твердого тела детали движущейся несжимаемой средой (почвой) использовался модуль SolidWorks Flow Simulation [1, 9]. Исследуемый образец располагался в центре прямоугольного канала, в котором с постоянной скоростью 10 км/ч двигалась среда, характеризующая коэффициент динамической вязкости $\mu_s = 150 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и плотностью $\rho_s = 1500 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 7 представлены линии потока слоев почвы, которые непосредственно взаимодействуют с поверхностью лапки сошника.

На основе распределения скоростей движущейся среды с использованием модели эрозии [10] было найдено значение суммарной массовой интенсивности эрозии R_e .

На рис. 8 представлено распределение скорости эрозии R_e на поверхности лапки сошника при значениях массового расхода элементарных потоков почвы $m_p = 4 \text{ кг/с}$ и их количества $N_p = 1000$.

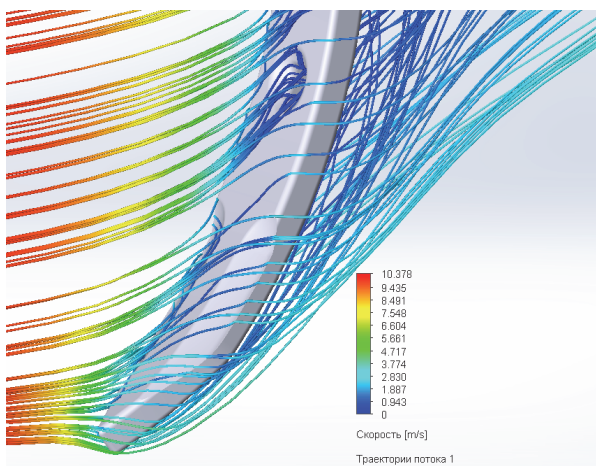


Рис. 7. Линии потока слоев почвы, контактирующих с лопкой

Важным результатом при анализе зон повышенной истираемости является поле давлений непосредственно на поверхности детали (рис. 8).

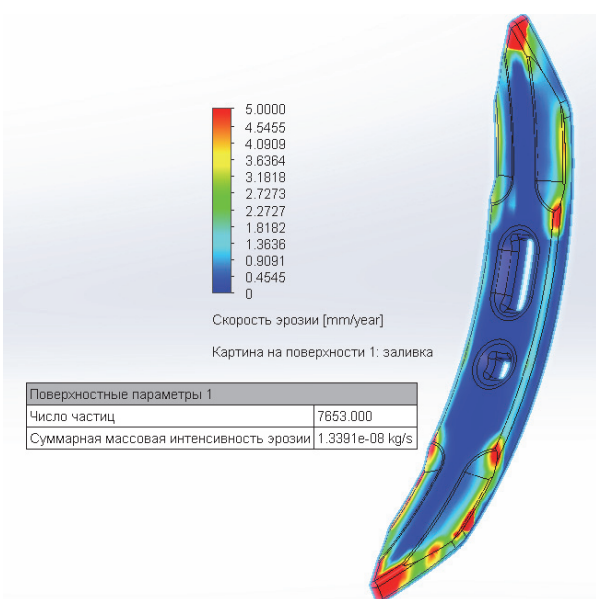


Рис. 8. Распределение скорости эрозии на поверхности лопки сошника

Для рассмотренного примера максимальное давление, около 720 кПа, имело место на передней рабочей поверхности инструмента (рис. 9), среднее значение давления на поверхности – 120 кПа. При этом распределение давления не было равномерным.

Заключение. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин является важным этапом для проведения конечно-элементного анализа. Этот процесс позволяет получить точную модель деталей, которые будут использоваться в анализе, что в свою очередь поможет определить их прочность и надежность.

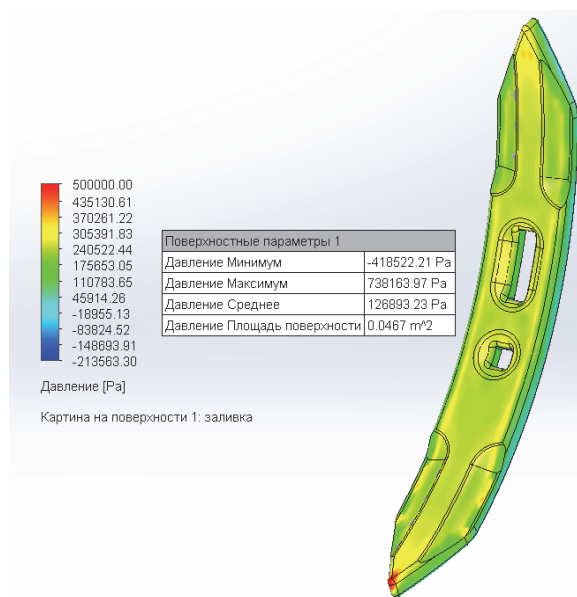


Рис. 9. Распределение давления на поверхности лопки сошника

В данной статье рассмотрены возможность и результаты использования технологии 3D-сканирования для обратного проектирования и контроля качества продукции. Полученные результаты исследований схожи по специфике с результатами, представленными в работе [3] по использованию 3D-сканирования для обратного проектирования и контроля качества. Технология в целом предоставляет возможности для проведения повторного проектирования путем сканирования объекта и преобразования его в САПР с использованием различных методов реконструкции поверхности.

Исходя из данного примера работы, можно сделать вывод о том, что в настоящее время существуют методы, позволяющие восстановить деталь с использованием реверс-инжиниринга. Однако помимо этого также можно применять методы вычислительной гидродинамики (CFD) для более детального анализа воздействия почвы на рабочие органы.

Анализ полученных в результате виртуального эксперимента силовых характеристик и их сравнение с данными других исследований [11–13] позволили подтвердить их достаточно высокую достоверность. Следовательно, можно сделать вывод об адекватности данного исследования. Таким образом, с применением методов вычислительной гидродинамики, описывающих почву как сплошную деформируемую среду, можно эффективно проводить силовой анализ рабочих органов почвообрабатывающих машин. При этом выполнить оценку комплекса качественных параметров обработки почвы (например, формы поперечного профиля, степени разрыхления или уплотнения почвы, характера

перемешивания почвенных слоев и др.) с применением данного метода крайне сложно.

CFD является методом моделирования и численного решения уравнений, описывающих движение жидкостей и газов. В данном случае, CFD применяется для анализа воздействия почвы на рабочие органы почвообрабатывающих машин.

Используя методы CFD, можно провести детальное исследование течения почвы вокруг рабочих органов, оценить воздействие давления и силы. Это позволяет оптимизировать конструкцию рабочих органов, чтобы они максимально эффективно выполняли свои функции, минимизируя негативное воздействие на почву.

Список литературы

1. Карпов С. В., Кожарина Т. В. Анализ абразивного износа бионических структур // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы XIII Междунар. науч.-инноват. молодеж. конф., Тамбов, 11–12 нояб. 2021 г. Тамбов, 2021. С. 192–194.
2. Кожарина Т. В., Карпов С. В. Разработка алгоритма 3д-сканирования изношенных деталей для проведения конечно-элементного анализа // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 12–14 окт. 2021 г. Тамбов, 2021. Вып. 7. С. 211–216.
3. Карпов С. В., Кожарина Т. В. Анализ взаимодействия почвы с обрабатывающими инструментами для создания конструкций повышенной абразивной стойкости // Цифровизация агропромышленного комплекса: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 25–27 окт. 2022 г. Тамбов, 2022. С. 115–118.
4. Helle R. H., Lemu H. G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 5255–5262.
5. Javaid M., Haleem A., Kumar L. Dimensional errors during scanning of product using 3D scanner // Advances in Engineering Design. Singapore: Springer Singapore, 2019. P. 727–736. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_67.
6. Assaf Z., Rubinstein D., Shmulevich I. Determination of the parameters of the model of discrete elements necessary for soil cultivation // Soil research and tillage. 2007. No. 92 (1). P. 227–242.
7. Ovsyanko V., Petrovsky A. The computer modeling of interaction between share-mouldboard surface of plough and soil // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. 2014. Vol. 59, no. 1. P. 100–103.
8. Comparative assessment of discrete element methods and computational fluid dynamics for energy estimation of the cultivator working bodies / S. Mudarisov [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2020. No. 18. P. 198–206.
9. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics / J. Sun [et al.] // Advances in Engineering Software. 2018. Vol. 119. P. 30–37.
10. Effect of sand particles on the Erosion-corrosion for a different locations of carbon steel pipe elbow / M. Amara [et al.] // Procedia Structural Integrity. 2018. Vol. 13. P. 2137–2142.
11. Обзор методов моделирования взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и почвенных сред / М. Н. Лысыч [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 9. С. 86–93.
12. Finite element simulation of moldboard-soil interaction / H. Bentaher [et al.] // Soil and Tillage Research. 2013. Vol. 134. P. 11–16.
13. Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine / M. Topakci [et al.] // Journal of Food, Agriculture and Environment. 2010. Vol. 8, no. 2. P. 531–536.

References

1. Karpov S. V., Kozharina T. V. Analysis of abrasive wear of bionic structures. *Sovremennyye tverdo-faznyye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyy menedzhment: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-innovatsionnoy molodezhnoy konferentsii* [Modern solid-phase technologies: Theory, Practice and Innovation Management: materials of the XIII Scientific and Innovative International Youth Conference]. Tambov, 2021, pp. 192–194 (In Russian).
2. Kozharina T. V., Karpov S. V. 3d-scanning algorithm Development of worn parts for finite element analysis. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the VII International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2021, issue 7, pp. 211–216 (In Russian).
3. Karpov S. V., Kozharina T. V. Analysis of the interaction of soil with processing tools for creating structures of increased abrasive resistance. *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy*

III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Digitalization of the agro-industrial complex: materials of the III International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2022, pp. 115–118 (In Russian).

4. Helle R. H., Lemu H. G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Materials today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 5255–5262.

5. Javaid M., Haleem A., Kumar L. Dimensional errors during scanning a product using 3D scanner. *Advances in engineering design*. Singapore, Springer Singapore, 2019, pp. 727–736. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_67.

6. Assaf Z., Rubinstein D., Shmulevich I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and tillage research*, 2007, no. 92 (1), pp. 227–242. DOI: 10.1016/j.still.2006.03.06.

7. Ovsyanko V., Petrovsky A. Computer modeling of the interaction of the ploughshare surface with soil. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 100–103.

8. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Aminov R., Rakhimov Z., Bagautdinov R., Rakhimov I., Gainullin I., Comparative assessment of discrete element methods and computational fluid dynamics for energy estimation of the cultivator working bodies. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2020, no. 18, pp. 198–206.

9. Sun J., Wang Y., Ma Y., Tong J. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*, 2018, vol. 119, pp. 30–37.

10. Amara M., Muthanna B., Abbes M. T., Meliani M. H. Effect of sand particles on the Erosion-corrosion for a different locations of carbon steel pipe elbow. *Procedia Structural Integrity*, 2018, vol. 13, pp. 2137–2142.

11. Lysych M. N., Shabanov M. L., Nagaytsev V. M., Chernyshov V. V. Review of methods for modeling the interaction of working bodies of tillage machines and soil media. *Sovremennye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2021, no. 9, pp. 86–93 (In Russian).

12. Bentaheer H., Ibrahim A., Hamza E., Hbaieb M., Kantchev G., Maalej A., Arnold W. Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research*, 2013, vol. 134, pp. 11–16.

13. Topakci M., Mehmet C., Kursat H., Rennie M., Akinci A., Karayel I. Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 531–536.

Информация об авторах

Кожарина Татьяна Владимировна – магистрант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Российская Федерация). E-mail: tata.vladimirovna@gmail.com

Карпов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Российская Федерация). E-mail: karpov.sv@mail.tstu.ru

Гороновский Андрей Романович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13а, Республика Беларусь). E-mail: arg@belstu.by

Information about the authors

Kozharina Tatiana Vladimirovna – master's degree student, the Department “Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering”. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: tata.vladimirovna@gmail.com

Karpov Sergey Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department “Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering”. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: karpov.sv@mail.tstu.ru

Goronovsky Andrey Romanovich – PhD (Engineering), 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: arg@belstu.by

Поступила 23.10.2023

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

WOODWORKING INDUSTRY

УДК 674.812

Я. П. Жарская, И. Г. Федосенко

Белорусский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ НЕОДНОРОДНОЙ ВЛАЖНОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ САНИТАРНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

Целью исследования является разработка режимов прессования, применение которых позволило бы получить санитарный наполнитель из отходов деревообработки неоднородной влажности. Технология производства древесного наполнителя схожа с технологией производства топливных гранул. Однако вопрос производства данного продукта мало изучен из-за его узкой направленности.

В ходе эксперимента в качестве исходного сырья использовались отходы от механической обработки пиломатериалов с различной влажностью (от 10 до 22%), что существенно затрудняло получение качественного санитарного наполнителя. Получение наполнителя сводилось к применению технологии производства топливных гранул из древесины. Эксперимент проводился на ООО «СВУДС экспорт».

Обязательная сертификация санитарного наполнителя для животных не предусмотрена законодательством Республики Беларусь. Однако учитывая тот факт, что продукт должен быть конкурентоспособным на рынке, необходимо было придерживаться определенных качественных показателей, по которым можно было бы оценить, правильно ли подобраны режимы работы технологического оборудования. Для подтверждения высокого качества полученного наполнителя его характеристики сравнили с пороговыми значениями согласно ISO 17225-2:2021, который применим к топливным гранулам.

Результаты эксперимента показали, что при соблюдении определенных режимов прессования можно получить санитарный наполнитель из отходов деревообработки, которые имеют неоднородную влажность. Важным преимуществом при производстве наполнителя в сравнении с топливными гранулами является тот факт, что такой продукт не подлежит обязательной сертификации. Это значительно упрощает процесс производства ввиду того, что возможно применение древесных отходов, к которым не предъявляются строгие требования по влажности и качеству.

Ключевые слова: наполнитель, гранулы, сертификация, впитываемость, гидротермическая обработка, влажность.

Для цитирования: Жарская Я. П., Федосенко И. Г. Использование древесного сырья неоднородной влажности в производстве санитарного наполнителя // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 157–164.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-21.

Ya. P. Zharskaya, I. G. Fedosenko

Belarusian State Technological University

USE OF WOOD RAW MATERIALS OF HETEROGENEOUS HUMIDITY IN THE PRODUCTION OF SANITARY FILLER

The purpose of the study is to develop pressing modes, the use of which would make it possible to obtain sanitary filler from wood processing waste of non-uniform moisture content. The technology for producing wood filler is similar to the technology for producing fuel pellets. However, the issue of production of this product has been little studied due to its narrow focus.

During the experiment, waste from the mechanical processing of lumber with different moisture contents: from 10 to 22% was used as feedstock, which significantly complicated the production of high-quality sanitary filler. The production of filler was reduced to the use of technology for the production of fuel pellets from wood. The experiment was carried out at “SWOODS Export LLC”.

Mandatory certification of sanitary litter for animals is not provided for by the legislation of the Republic of Belarus. However, given the fact that the product must be competitive in the market, it was necessary to adhere to certain quality indicators by which it would be possible to assess whether the operating modes of the process equipment were correctly selected. To confirm the high quality of the resulting filler, its characteristics were compared with the threshold values according to ISO 17225-2:2021, which is applicable to fuel pellets.

The results of the experiment showed that, subject to certain pressing conditions, it is possible to obtain sanitary filler from wood waste that has non-uniform moisture content. An important advantage in the production of filler in comparison with fuel pellets is the fact that such a product is not subject to mandatory certification. This greatly simplifies the production process due to the fact that it is possible to use wood waste, which is not subject to strict requirements for moisture and quality.

Keywords: filler, granules, certification, absorbency, hydrothermal treatment, humidity.

For citation: Zharskaya Ya. P., Fedosenko I. G. Use of wood raw materials of heterogeneous humidity in the production of sanitary filler. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 157–164 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-21.

Введение. В настоящее время отечественные деревообрабатывающие предприятия параллельно с наращиванием производственных мощностей сталкиваются с проблемой накопления, размещения и утилизации древесных отходов. Постоянно развивающиеся технологии способствуют внедрению все более эффективных способов переработки древесных отходов. Большинство технологических процессов в деревообрабатывающей отрасли связаны с механической обработкой древесины. Данный процесс подразумевает снятие слоя материала с готового продукта, что неизбежно приводит к образованию отходов, количество которых может достигать 50–60% от общего объема сырья [1].

Сегодня популярным направлением использования отходов деревообработки является их применение не только в энергетических целях в качестве конечного продукта для сжигания, но и в процессе глубокой переработки в таких областях, как целлюлозно-бумажное, плитное производство, производство топливных гранул, брикетов и санитарного наполнителя.

Перспективы развития производства санитарного наполнителя являются многообещающими. Современные исследования в области материалов и технологий позволяют создавать все более функциональные и безопасные продукты [2].

Производство древесного санитарного наполнителя является перспективным по ряду причин:

1) возросший спрос: в последние десятилетия с улучшением качества жизни люди стали держать домашних животных и их количество постоянно растет. Это создает повышенный спрос на качественный наполнитель, так как он является неотъемлемой частью ухода за животными;

2) удобство и гигиена: санитарный наполнитель делает уход за домашними животными более гигиеничным. Наполнитель поглощает

запахи и жидкость, предотвращая их распространение. Это помогает сохранить чистоту в помещении и препятствует распространению опасных бактерий;

3) развитие инноваций: производители наполнителя для домашних животных постоянно работают над улучшением качества продукции. В последние годы появились биоразлагаемые и экологически чистые варианты наполнителя, что позволяет удовлетворить многочисленные запросы потребителей;

4) потенциал для экспорта: производители санитарного наполнителя могут успешно экспортировать продукцию за пределы своей страны. С увеличением числа домашних животных и повышением уровня жизни во многих странах спрос на данный продукт также возрос.

В целом производство древесного санитарного наполнителя предоставляет возможность для развития, инноваций и удовлетворения растущего спроса, делая его перспективным продуктом для инвестиций [3].

Одной из основных тенденций в этой области является переход от традиционных наполнителей на основе глины к более усовершенствованным и простым в утилизации. К таким продуктам можно отнести древесные или органические санитарные наполнители.

Еще одной перспективой развития является использование новых технологий для создания более функциональных вариантов продукта. Например, сейчас проводятся исследования по использованию новых технологий для создания наполнителей с улучшенной впитываемостью и устранением запаха. Также разрабатываются специальные добавки, которые могут препятствовать образованию бактерий и грибков [4].

Удобство использования, безопасность для домашних животных и стоимость остаются важными факторами при разработке и выборе

санитарного наполнителя. Поэтому применение в качестве исходного материала древесных измельченных отходов – одно из главных преимуществ этого продукта перед аналогичными вариантами ввиду низкой стоимости сырья для производства.

Также одной из перспектив развития производства санитарного наполнителя для домашних животных является улучшение функциональных характеристик, которые обеспечивают лучшую гигиену и впитываемость влаги, а также упрощают уход за ними. Например, уже существуют наполнители, которые образуют комки при впитывании жидкости, что облегчает их удаление и поддерживает чистоту в помещении [5].

Большим преимуществом производства санитарного наполнителя, а не топливных гранул из древесины является тот факт, что такой продукт не нуждается в обязательной сертификации. Согласно законодательству Республики Беларусь производитель может реализовывать свою продукцию без оформления разрешительной документации. Другими словами, к санитарному древесному наполнителю не предъявляются строгие требования по качеству. Единственный фактор, на который согласно статистике обращает внимание покупатель – цвет продукта [6].

Производство санитарного наполнителя из древесных опилок на базе предприятий, которые выпускают топливные гранулы, является эффективным способом использования отходов деревообрабатывающей промышленности и создания экологически чистого и удобного продукта для бытового применения. Кроме того, данный фактор увеличивает функциональные возможности таких производств, открывая новые рынки сбыта без дополнительного переоборудования или модернизации функционирующих производственных площадок.

В процессе производства наполнителя используются древесные отходы, полученные в результате обработки лесо- и пиломатериалов. Опилки проходят несколько стадий механической обработки. Вот основные этапы технологического процесса: сбор и подготовка древесного материала, термическая обработка, прессование, охлаждение и упаковка. Отличительной особенностью технологии получения санитарного наполнителя является тот факт, что этот продукт должен быть максимально натуральным и без какого-либо запаха, поэтому использование вспомогательных добавок, таких как крахмал кукурузный, древесная мука или лигносульфонаты, нежелательно. Данное ограничение может существенно повлиять на качество готового продукта [7].

За основу технологического процесса получения древесного санитарного наполнителя была взята технология производства топливных

гранул из древесины, но с учетом отсутствия возможности применения каких-либо вспомогательных добавок, которые могли бы улучшить качественные характеристики продукта. Процесс получения топливных гранул из измельченной древесины является достаточно изученной темой, поэтому для производства санитарного наполнителя применимы многие результаты исследований ученых, которые занимались разработкой данной технологии.

О. Д. Мюллер [8] рассматривал в своих работах факторы, которые влияют на качество гранул: давление прессования, вспомогательные добавки, температура прессования. По его мнению, оптимальное давление прессования должно быть в пределах 25–30 МПа. Наряду с этим обязательным этапом производства гранул должно быть охлаждение готового продукта для стабилизации его качественных показателей.

Такого же мнения по поводу обязательного охлаждения готового продукта придерживался А. Н. Попов [9]. Он утверждал, что выдержка готового продукта при низких температурах позволит достичь лучшего качества, а именно увеличит механическую прочность гранул. Также в своих работах он указал, что важным фактором является постоянство влажности у всего объема используемого материала для достижения необходимого качества гранул и определил начальные свойства исходного сырья, такие как влажность не ниже 10–12%, однородность фракционного и породного состава. Из наиболее важных факторов в процессе производства он выделял необходимую температуру прессования 85–95°C и давление прессования в пределах 25–35 МПа.

Л. А. Скоринова [10] в своих исследованиях описывает положительное влияние предварительной подготовки и сортировки древесного сырья, а также положительное влияние контроля влажности древесного материала. Уменьшение влажности исходного материала до 10–12% с предварительной сортировкой по размерам частиц может значительно повлиять на энергопотребление оборудования, что в свою очередь может оказать положительный эффект на технологию производства в целом.

Проработка научных источников [7–10] показала, что постоянство и стабильность влажности всего объема древесного материала является одним из наиболее важных факторов при производстве древесных гранул, которые могут применяться в качестве санитарного наполнителя. В случае использования разного по влажности сырья необходимо подобрать режим работы оборудования, который компенсировал бы этот аспект и позволил бы получить гранулы с высокими качественными характеристиками согласно ISO 17225–2:2021 [11].

Основная часть. Главной задачей эксперимента является разработка режимов прессования неоднородного по влажности древесного сырья. Второстепенной задачей является получение продукта, который по качественным характеристикам соответствует требованиям ISO 17225–2:2021.

При проведении эксперимента используются древесные отходы от механической обработки пиломатериалов хвойных пород, в данном случае сосны. Основными источниками отходов на производственной площадке ООО «СВУДС экспорт» является лесопиление, деревообрабатывающее производство, цех сушки и сортировки сухих пиломатериалов. Важным отличием отходов из трех источников является их влажность и фракционный состав. Лесопиление осуществляет раскрой круглого лесоматериала, после которого образуется смесь щепы и опилок естественной влажности от 50 до 60%. Для дальнейшего использования таких отходов в производстве обязательным условием является гидротермическая обработка, которая позволит снизить начальную влажность сырья до оптимальной. Деревообрабатывающее производство изготавливает мебель и заготовки, осуществляя раскрой пиломатериалов и строгание. Влажность поступающего в производство пиломатериала варьируется от 10 до 16%. Цех сушки и сортировки сухой доски работает с пиломатериалами, которые прошли термическую обработку. Единственной механической операцией, которая осуществляется на данном производстве, является торцовка. Влажность образующихся отходов составляет 10–22%.

В ходе эксперимента использовались отходы после деревообрабатывающего производства и цеха сушки и сортировки сухой доски. Главное отличие такого материала заключается в том, что перед гранулированием он не подвергается термической обработке, чтобы сохранить цвет. Для такого продукта, как санитарный наполнитель, цвет является важным оценочным критерием. На рис. 1 представлены древесные отходы, которые используются в качестве сырья для получения наполнителя.

Предварительная подготовка исходного сырья подразумевает доизмельчение разнородного по влажности и фракционному составу древесного материала до состояния, подходящего для осуществления процесса гранулирования. Данный процесс выполняется на молотковой дробилке CPM Champion с размером ячейки сит 5–7 мм.

Учитывая тот факт, что влажность древесного материала варьируется от 10 до 22%, необходимо подобрать оптимальный режим работы оборудования, который обеспечит дополнительный прогрев древесной смеси в пресс-грануляторе и уменьшение ее влажности до оптимальных 10–12%.



Рис. 1. Древесные отходы после строгания и торцовки пиломатериалов для производства санитарного наполнителя

Процесс гранулирования осуществляется на прессе CPM 7932-5, который оборудован двумя роликами и кольцевой матрицей (рис. 2). Производительность данного оборудования составляет 4,5 т готовой продукции в час.

Основой процесса гранулирования древесины является плавление лигнина – одного из основных компонентов, входящих в состав древесины, и его отвердевание [12].

Первоначальный прогрев древесной массы перед прессованием обеспечивают установленным парогенератором Steam 500. Подача пара осуществляется в смесительную камеру перед гранулятором. Воздействие пара позволяет разогреть материал до температуры 50–60°C. Дополнительный прогрев материала осуществляется в рабочей зоне пресса за счет трения и давления между материалом, матрицей и прессующими роликами [13].

Обеспечить дополнительный прогрев древесного материала в грануляторе можно путем увеличения продолжительности нахождения древесной массы в рабочей зоне пресса. Другими словами, снижая подачу материала в зону прессования можно добиться его более длительного контакта с каналом матрицы. Количество подаваемого материала определяется в процентах исходя из максимально допустимой загрузки пресса согласно техническим условиям.

Рабочая часть канала представляет собой цилиндр, длина которого подбирается исходя из породы древесины, размера древесных частиц и конечного продукта.

В данном эксперименте в грануляторе установлена матрица с общей длиной канала 125 мм. Рабочая часть канала составляет 80 мм. Непосредственно в этой части осуществляется контакт прессуемого материала с разогретой

поверхностью канала, рабочая температура которого составляет 85–100°C. Матрица с таким каналом используется для прессования мягких хвойных пород древесины, например сосны [14].



а



б

Рис. 2. Прессовое оборудование СРМ:
а – пресс-гранулятор СРМ 7932-5; б – кольцевая матрица и комплект роликов

В ходе эксперимента подбор технологических параметров прессования осуществлялся на основе внедренной технологии производства топливных гранул на производственной площадке ООО «СВУДС экспорт». В табл. 1 представлены режимы прессования топливных гранул (режим № 1) и санитарного наполнителя (режимы № 2–4).

Таблица 1

Технологические режимы процесса прессования

Параметры	Режим			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Загрузка пресса, %	95	90	85	80
Давление прессования, МПа	30–35	30–35	30–35	30–35
Температура рабочей зоны пресса, °C	95	90	95	93
Влажность опилок, %	10–22	10–22	10–22	10–22

Важным этапом эксперимента стало охлаждение гранул в холодильных установках в течение 45 мин при постоянном перемешивании для равномерного остывания. Холодильная установка фирмы Champion оснащена системой «подвижные полы», которая по мере перемещения толкателей обеспечивает прохождение потока атмосферного воздуха через объем гранул, находящихся в установке, тем самым осуществляется равномерное охлаждение всего объема продукта. Постоянный обдув атмосферным воздухом позволяет добиться снижения температуры готовой продукции до 20–22°C [15].

Для определения оптимального режима прессования проведен контроль качества полученных образцов санитарного древесного наполнителя. В табл. 2 представлены результаты проверки, по которым можно сделать вывод, что наиболее оптимальным является режим прессования № 3. Также данные таблицы свидетельствуют о снижении влажности полученных образцов до 6,5–8,5%, что подтверждает целесообразность уменьшения подачи материала в рабочую зону гранулятора.

Таблица 2

Сравнение качественных показателей

Параметры	Топливные гранулы	Санитарный наполнитель для животных			
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	
Диаметр, мм	6	6	6	6	
Влажность, %	8,2	7,5	7,1	6,7	
Зольность, %	0,42	0,23	0,20	0,21	
Механическая прочность, %	98,2	97,6	98,1	98,4	
Мелкая фракция, %	0,2	0,3	0,1	0,2	
Насыпная плотность, кг/м³	654	599	612	619	

Результаты контроля качества показывают, что в сравнении с характеристиками, изложенными в ISO 17225–2:2021, образец № 3

максимально приближен к пороговым значениям показателей, поэтому уменьшать загрузку пресса для производства более качественного продукта (результаты образца № 4) нецелесообразно.

На рис. 3 показаны топливные гранулы (образец № 1) и санитарный наполнитель для животных (образец № 3). При визуальной оценке образцов можно сделать вывод, что термическая обработка древесных опилок изменяет цвет гранул. Данный фактор влияет на потребительскую привлекательность среди аналогичных продуктов, о чем было сказано выше.



Рис. 3. Визуальное сравнение топливных гранул и санитарного наполнителя для животных

В табл. 3 представлено сравнение численных значений качественных показателей топливных гранул из древесины и санитарного наполнителя с требованиями по качеству в соответствии с ISO 17225–2:2021. Оценка качества проводилась по разработанным производственным методикам на основе ENplus v3 ISO 17225–2:2021 в производственной лаборатории ООО «СВУДС экспорт».

Таблица 3

Сравнение качественных показателей

Параметры	ENplus	Топливные гранулы	Санитарный наполнитель
Диаметр, мм	6 ± 1	6	6
Влажность, %	≤10	8,2	7,1
Зольность, %	≤0,7	654	612
Механическая прочность, %	≥98	98,2	98,1
Мелкая фракция, %	≤0,5	0,2	0,1
Насыпная плотность, кг/м³	600–750	654	612

По полученным результатам видно, что внесенные корректировки в процесс прессования древесных опилок с неоднородной влажностью, а именно снижение загрузки пресса на 10%,

способствуют большему прогреву прессуемого материала и снижению влажности готового продукта. Таким образом, подтверждается выдвинутая гипотеза о влиянии продолжительности контакта прессуемого материала с каналом матрицы на снижение влажности готового продукта за счет более длительного прогрева материала.

Заключение. В ходе эксперимента подобраны технологические параметры прессования неоднородного по влажности древесного сырья. Результатом работы стала партия наполнителя, который по качественным характеристикам соответствует требованиям ISO 17225–2:2021. Также после получения образцов сохранился светлый цвет продукта, что является важным критерием оценки для потребителя. Объем полученной партии составил 5,3 т. Внедрение технологии подтверждено Актом о практическом использовании результатов исследования.

Технологический процесс получения санитарного наполнителя схож с технологией производства топливных древесных гранул. Поэтому при анализе литературных и электронных источников внимание уделялось информации, связанной с топливными гранулами. После проработки данного вопроса был определен ряд технологических параметров, которые в течение эксперимента проверялись практически. За основу были взяты технологические параметры производства топливных гранул из древесины.

Эксперимент по получению санитарного наполнителя проходил в несколько этапов. Первоочередно был проведен контроль влажности исходного сырья. Данный параметр составлял 10–22%. Далее были внесены корректировки в технологический процесс гранулирования, а именно снижена загрузка пресса с 95 до 85%. Уменьшение количества подаваемого материала в пресс способствовало увеличению продолжительности пребывания древесного сырья в каналах матрицы. Учитывая рабочую температуру прессования 90–95°C было осуществлено дополнительное прогревание древесного материала и снижение его влажности до 6,5–8,5%.

По окончании прессования гранулы подвергались охлаждению в холодильной установке до 22°C. Несмотря на тот факт, что санитарный наполнитель не нуждается в обязательной сертификации, полученные образцы дополнительно прошли контроль качества на соответствие требованиям ISO 17225–2:2021.

Как результат, получение санитарного наполнителя на базе производства топливных гранул представляет собой эффективный и экологичный способ переработки древесных отходов в востребованный и качественный продукт.

Список литературы

1. Древесина и древесные материалы: сб. ст. / Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР. Красноярск, 1974. 238 с.
2. История появления и развития санитарного наполнителя // Cat Step. URL: <https://www.catstep.ru/advice/o-napolnitelyakh/istoriya-poyavleniya-i-razvitiya-koshachego-napolnitelya/> (дата обращения: 13.08.2023).
3. Наполнители // ЗООИнформ. URL: <https://zooinform.ru/business/articles/napolniteli-sdelano-v-rossii/> (дата обращения: 07.08.2023).
4. Древесный санитарный наполнитель // Древесные технологии – Wood Technologies. URL: <https://wood-teh.ru/drevesnyij-napolnitel-dlya-domashnih-zhivotnih> (дата обращения: 02.08.2023).
5. Процесс производства санитарного наполнителя // Super Premium Cat Litters. URL: <https://freshcat.ru/blog/proizvodstvo-koshachego-napolnitelya> (дата обращения: 09.09.2023).
6. Сертификация санитарного наполнителя // БизнесСертификат. URL: <https://bizsert.ru/napolnitel-dlya-koshachego-tualeta/> (дата обращения: 01.08.2023).
7. Коробов В. В., Рушнов Н. П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.
8. Мюллер О. Д. Математическая модель процесса формирования древесных гранул // Лесной журнал. 2015. № 2. С. 37–44.
9. Попов А. Н. Исследование процесса производства древесных гранул с целью повышения их энергетического использования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 151 л.
10. Скорикова Л. А. Обоснование состава топливных гранул и технологии подготовки древесных опилок для их производства: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2012. 152 л.
11. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets: ISO 17225–2:2021. Geneva: ISO copyright office, 2021. 16 p.
12. Thek G., Obernberger I. The pellet Handbook. The Production and Thermal Utilisation of Pellets. London, Washington DC: Routledge, 2010. 593 p.
13. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Ильющенко Д. А. Экспериментальные исследования прессования опилок древесины сосны на гидравлическом прессе // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 87–92.
14. Технология производства биотоплива // Информационное аналитическое агентство «ИНФОБИО». URL: <https://www.infobio.ru/tehnologhiia-proizvodstva-biotopliva/> (дата обращения: 20.09.2023).
15. Кондратьева О. Е. Экология. М.: Юрайт, 2016. 283 с.

References

1. *Drevesina i drevesnyye materialy: sbornik statey* [Wood and wood materials: digest of articles]. Krasnoyarsk, 1974. 238 p. (In Russian).
2. History of the appearance and development of sanitary filler. Available at: <https://www.catstep.ru/advice/o-napolnitelyakh/istoriya-poyavleniya-i-razvitiya-koshachego-napolnitelya/> (accessed 13.08.2023) (In Russian).
3. Wood Filler. Available at: <https://zooinform.ru/business/articles/napolniteli-sdelano-v-rossii/> (accessed 07.08.2023) (In Russian).
4. Wood sanitary filler. Available at: <https://wood-teh.ru/drevesnyij-napolnitel-dlya-domashnih-zhivotnih> (accessed 02.08.2023) (In Russian).
5. The production process of sanitary filler. Available at: <https://freshcat.ru/blog/proizvodstvo-koshachego-napolnitelya> (accessed 09.09.2023) (In Russian).
6. Certification of sanitary filler. Available at: <https://bizsert.ru/napolnitel-dlya-koshachego-tualeta/> (accessed 01.08.2023) (In Russian).
7. Korobov V. V., Rushnov N. P. *Pererabotka nizkokachestvennogo syrya (problemy bezotkhodnoy tekhnologii)* [Processing of low-quality raw materials (problems of waste-free technology)]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 288 p. (In Russian).
8. Muller O. D. Mathematical model of the wood pellet formation process. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2015, no. 2, pp. 37–44 (In Russian).
9. Popov A. N. *Issledovaniye protsessa proizvodstva drevesnykh granul s tsel'yu povysheniya ikh energeticheskogo ispol'zovaniya. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the production process of wood pellets in order to increase their energy use. Dissertation PhD (Engineering)]. Moscow, 2016. 151 p. (In Russian).
10. Skorikova L. A. *Obosnovaniye sostava toplivnykh granul i tekhnologii podgotovki drevesnykh opilok dlya ikh proizvodstva. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Substantiation of the composition of

fuel granules and technology for the preparation of sawdust for their production. Dissertation PhD (Engineering)]. Yoshkar-Ola, 2012. 152 p. (In Russian).

11. ISO 17225-2:2021. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets. Geneva, ISO copyright office, 2021. 16 p.

12. Thek G., Obernberger I. The pellet Handbook. The Production and Thermal Utilization of Pellets. London, Washington DC, Routledge, 2010. 593 p.

13. Chibirev O. V., Kunitskaya O. A., Ilyushenko D. A. Experimental studies of pressing pine sawdust on a hydraulic press. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2016, no. 217, pp. 87–92 (In Russian).

14. Biofuel production technology. Available at: <https://www.infobio.ru/tiekhnologhiia-proizvodstva-biotopliva/> (accessed 20.09.2023) (In Russian).

15. Kondratieva O. E. *Ekologiya* [Ecology]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 283 p. (In Russian).

Информация об авторах

Жарская Яна Петровна – магистр технических наук, аспирант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь); начальник производства топливных древесных гранул. ООО «СВУДС экспорт» (222515, г. Борисов, ул. Демина, 11А, Республика Беларусь). E-mail: y.zarskaya@tn.ru

Федосенко Иван Гаврилович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Information about the authors

Zharskaya Yana Petrovna – Master of Engineering, PhD student the Department of Woodworking Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); Head of production of fuel wood pellets. LLC “SWOODS export” (11A, Demina str., 222515, Borisov, Republic of Belarus). E-mail: y.zarskaya@tn.ru

Fedosenko Ivan Gavrilovich – PhD (Engineering), Assistante Professor, the Department of Woodworking Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Поступила 20.10.2023

УДК 038.742.046.73

С. А. Дупанов, О. К. Леонович

Белорусский государственный технологический университет

**ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
ИЗ НАТУРАЛЬНОГО МОРЕНОГО ДУБА И СОСНЫ**

Археологические объекты, поднятые из пойм рек и воды, крайне переувлажнены. Структура древесины в процессе тысячелетнего хранения в среде без доступа свободного кислорода сохранилась в первоначальном виде, но со всеми повреждениями, предшествующими попаданию их в эту закрытую среду. Добытая древесина после попадания в открытую среду подвергается быстрому разрушению. Исследования по сушке и сохранению археологических объектов (лодка сосновая XII в. и лодка XVI в. из древесины мореного дуба, находящиеся в историческом музее Института истории Республики Беларусь) проводились методом моделирования на образцах натурального мореного дуба и сосны возрастом 800 и 500 лет соответственно, добытых предприятием ГОДО «Транс-Центр» в пойме реки Сож.

В результате исследования деформативных явлений, возникающих на образцах мореной древесины после извлечения ее из водной среды, предложена методика сушки в изолированном состоянии путем удаления влаги под воздействием гравитационных сил с последующим перемещением зоны большего увлажнения в нижнее положение. Образцы, достигшие 20% влажности, консервировались водорастворимым антисептиком на основе солей меди и железа. После дополнительной сушки до 6% образец мореной древесины укреплялся гидрофобизирующим масляным лаком. Предлагаемая методика сушки, консервирования и гидрофобизации мореной древесины обеспечит снижение деформаций, устойчивость к увлажнению и поражению грибами.

Ключевые слова: мореный дуб и сосна, переувлажненная древесина, археологическая древесина, деградация, сушка, консервирование.

Для цитирования: 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.

S. A. Dupanov, O. K. Leonovich

Belarusian State Technological University

**PROBLEMS OF PRESERVATION OF ARCHAEOLOGICAL OBJECTS
FROM NATURAL BOG OAK AND PINE**

Archaeological objects raised from floodplains of rivers and water are extremely waterlogged. During thousands of years of storage in an environment without access to free oxygen, the structure of wood was preserved in its original form, but with all the damage that preceded its entry into this closed environment. Extracted wood, once released into the open environment, undergoes rapid destruction. Research on the drying and preservation of archaeological objects (a 12th-century pine boat and a 16th-century boat made of bog oak wood, located in the historical museum of the Institute of History of the Republic of Belarus) was carried out using the modeling method on samples of natural bog oak and pine 800 and 500 years old, extracted by the GODO enterprise “Trans-Center” in the floodplain of the Sozh River.

As a result of the study of deformation phenomena that occur on samples of stained wood after its removal from the aquatic environment, a drying technique in an isolated state was proposed by removing moisture under the influence of gravitational forces, followed by moving the zone of greater moisture to a lower position. Samples that reached 20% humidity were preserved with a water-soluble antiseptic based on copper and iron salts. After additional drying to 6%, the stained wood sample was strengthened with a water-repellent oil varnish. The proposed method of drying, preserving and hydrophobizing stained wood will ensure a reduction in deformation, resistance to moisture and fungal attack.

Keywords: bog oak and pine, waterlogged wood, archaeological wood, degradation, drying, preservation.

For citation: Dupanov S. A., Leonovich O. K. Problems of preservation of archaeological objects from natural bog oak and pine. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 165–172 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-22.

Введение. Сохранением древесины ценных пород занимаются многие ученые. Особая роль

отводится сушке древесины, добытой из водной среды, где она находилась тысячелетиями.

Отдельные авторы считают необходимым обращать внимание на химический состав добытой древесины и его влияние на скорость продвижения жидкости к поверхности [1–3]. Проблемы, возникающие в процессе сушки мореной древесины, обсуждались в работах авторов, однако методического решения найдено не было [4, 5]. Известна пропитка сырых пиломатериалов в гидрофильных жидкостях, которая меняет цвет древесины и снижает физико-механические свойства. Камерная сушка бревен и сушка в парах органических жидкостей также не может иметь широкого применения из-за высокой сложности и пожароопасности.

При исследованиях археологической древесины, модифицированной фенольными смолами с этиленгликолем, которые проводились в музее «Берестье», установлено, что такая древесина меняет цвет, структуру и выделяет вредные вещества в атмосферу [6, 7]. Модификация не рекомендуется для защиты натурального мореного дуба.

Для подсушивания круглых лесоматериалов до влажности 30–70% использовалась паровакуумная сушка [8].

Направления защиты археологической древесины натурального мореного дуба различных периодов роста были впервые рассмотрены в работах [9–13].

Информации о сушке мореной древесины и археологических находок из нее, особенно с момента ее добычи, в литературе не обнаружено.

Ранее проведенные исследования в основном для сохранения качественных характеристик пиловочного сырья и продукции из него некорректно использовать для сохранения мореной древесины возрастом от 500 до 800 лет.

Исследования по сохранению археологических объектов (лодка сосновая XII в. и лодка XVI в. из древесины мореного дуба, находящиеся в историческом музее Института истории Республики Беларусь) проводились методом моделирования на образцах натурального мореного дуба и сосны возрастом 800 и 500 лет, добытых в пойме реки Сож предприятием ГОДО «Транс-Центр».

Основная часть. Мореная древесина в процессе длительного залегания в безвоздушной влажной среде подвержена различным процессам, скорость и интенсивность которых зависят от конкретных размеров, а также от физико-механических характеристик самого исходного материала.

Исследованию подверглись образцы, возраст которых определялся методами дифференцированного анализа на основе видовых и возрастных характеристик мореной древесины и подтверждался методом радиоуглеродного анализа [14].

Древесина натурального мореного дуба, поднятая с водной среды или илистых отложений в поймах рек, имеет начальную влажность от 200

до 300% и выше. На поверхности такой древесины имеется ослабленный, а в отдельных случаях и деградированный слой различной толщины. Крайне высокая влажность внутри образца и быстрая скорость высыхания ослабленной древесины на поверхности, способствует появлению растягивающих напряжений, вызывающих мгновенное образование трещин поперечного и продольного направлений. Для исследования скорости продвижения влаги в натуральной мореной древесине производился отбор необходимого количества образцов непосредственно во время подъема из водной среды и в последующие периоды сушки. Возникающие деформации и трещины определялись визуально.

Основная задача сохранения археологической древесины – это не допустить быстрой скорости сушки при попадании ее в открытую воздушную среду. Рассмотрению данной проблемы уделено основное внимание в работе.

Первоначальная влажность мореной древесины зависит от изначальной плотности, которая может достигать 1530 кг/м^3 . Обычная древесина, которая в абсолютном сухом состоянии имеет плотность 640 кг/м^3 и при максимальном увлажнении до 80% – 822 кг/м^3 , не может иметь массу древесного вещества, так как оно включает пустоты (полости клеток и межклеточные пространства, заполненные воздухом). Но в древесине мореного дуба эти пустоты заполнены водой и другими включениями.

При таком повышении влажности существенно увеличивается деформативность древесины. Например, линейные размеры увеличиваются до 40%. Древесина дуба, попадая в водную среду, увеличивает свои линейные размеры в зависимости от состава сухого древесного вещества и структурных изменений. Увеличение размеров и деформаций в мореной древесине происходит по нелинейной зависимости.

Предел насыщения достигает 40–50% в зависимости от времени залегания древесины.

В процессе сушки мореной древесины линейные размеры уменьшаются, напряжения, накопленные в материале, увеличивают риск коробления и появления дефектов в виде трещин, расколов и т. д.

Мореная древесина, находящаяся в безвоздушной влажной среде, законсервирована и поэтому, несмотря на повышенную деформативность, внутренние напряжения и реактивные силы практически равны нулю. При осушении такой древесины удаление свободной влаги увеличивается в десятки раз в сравнении со свежеспиленной древесиной дуба. Катализатором процесса сушки мореной древесины являются:

- интенсивность УФ-излучения;
- температура воздуха;
- влажность окружающей среды.

Также мореная древесина во влажном состоянии является биологически неустойчивой, что приводит к быстрому появлению плесени и грибов, которые поражают древесные ткани и приводят их к разрушению.

Процесс сушки мореной древесины кардинально отличается от сушки обычной древесины, так как все процессы, способствующие деградации, а также процессы, нарушающие качественно-технические характеристики, ускорены в несколько раз. Объемные и линейные размеры начинают изменяться при влажности 40–45% из-за большого количества влаги в клеточных стенках. У древесины свежеспиленного дуба она изменяется начиная от 30%.

Эти факты усложняют процесс сушки, но при правильном подходе позволяют значительно увеличить качественные и потребительские характеристики мореной древесины. В начале процесса сушки мореной древесины наблюдается неравномерное распределение влаги. Периферийный слой под влиянием внешних факторов отдает свободную влагу очень быстро, поэтому влага внутри материала перемещается в сторону пониженной температуры, верхние слои пересыхают, а центральные остаются влажными, что вызывает растрескивание древесины.

Появление плесени и различных видов грибов свойственно натуральной мореной древесине из-за понижения скорости сушки и недостаточной циркуляции воздуха.

Равномерность удаления влаги по длине бревна достигается поэтапным изменением прокладок. Прокладки обеспечивают горизонтальное положение ствола с учетом его сбега.

Методика исследований. Отбор образцов для определения первоначальной влажности и плотности свежесдобытой древесины и древесины в процессе сушки производился по методике ЦНИИСК им. Кучеренко [15].

Влажность верхнего слоя бревна, которая должна поддерживаться на уровне 40–45% и выше, т. е. выше точки насыщения клеточных стенок, периодически проверялась приростным буром. Качество сушки, т. е. трещинообразование и возникающие деформации, определялось визуально.

Методика и регламент поэтапной сушки предложены с учетом результатов сушки крупногабаритных образцов изолированного мореного дуба. В процессе сушки периодически контролировалась влажность верхнего слоя (не ниже 40–45%), обеспечивающая бездеформативную сушку и в то же время удаление влаги.

Движение жидкости при сушке определяли по известному уравнению избыточного гидравлического давления (P , кПа):

$$P = P_a + \rho gh,$$

где P_a – атмосферное давление, кПа ($P_a = 106$ кПа); ρ – плотность воды при 20°C, кг/см³ ($\rho = 998,2$ кг/см³); g – ускорение свободного падения, м/с² ($g = 9,81$ м/с²); h – высота по диаметру бревна в верхней точке, см.

В нижней точке $h_0 = 0$. При этом внизу бревна возникает безнапорное движение жидкости, составляющие (P_6 , кПа):

$$P_6 = \rho gh.$$

Поэтапная сушка мореной древесины и археологических находок из нее выполняется одинаково, если их возрастные характеристики и места залегания совпадают.

Ниже приведем изображения ствола мореного дуба, процесса его раскрывки для заготовки образцов по определению влажности и реологических свойств, а также среза высоковлажных зон (рис. 1–3).

Сушка мореной древесины включает следующие этапы.

1. Понижение влажности с 200 до 100% путем:
 - изоляции ствола дерева пропиленовой пленкой;
 - очищения от остатков водных отложений для предотвращения влагонцентрирующих мест и биоразрушающих очагов;
 - создания условий пропаривания мореной древесины при относительной влажности воздуха, равной 97–98%, и температуре от 5 до 80°C;
 - обеспечения защиты от УФ-излучения.

Первый этап позволяет создать мягкое снижение содержания свободной влаги. Требуется постоянный контроль влажности для предотвращения образования паразитирующих дереворазрушающих очагов. Контроль влажности на первоначальном этапе осуществляется на образцах размером 10×10×8 мм. Образцы взвешивают с точностью до 0,01 г, затем высушивают в шкафу при температуре 103 ± 2°C.

Влажность (W , %) натуральной древесины определяют по формуле

$$W = \frac{M_w - M_0}{M_0} \cdot 100,$$

где M_w – влажность сырой древесины мореного дуба, %; M_0 – влажность древесины мореного дуба в абсолютно сухом состоянии, %.

В дальнейшем контроль за сушкой осуществлялся влагомером ЭВ-2К.

Продолжительность в зависимости от первоначальной влажности и габаритных размеров древесины – от 30 до 180 дней.

Изолирование ствола мореного дуба с целью уменьшения скорости сушки изображено на заднем плане (рис. 3). Увеличение скорости сушки влечет появление видимых дефектов, нарушение

целостности качественно-технических и потребительских свойств [5].

В процессе сушки необходимо обеспечить попеременную кратковременную циркуляцию воздуха.



Рис. 1. Ствол свежесподнятого мореного дуба



Рис. 2. Процесс раскряжевки мореного дуба



Рис. 3. Срез влажностью 142% с целым периферийным слоем

2. Понижение влажности со 100 до 50% за счет:

- создания условий постоянной вентиляции без температурного изменения;
- поддержания температуры в пределах 10–15°C;
- соблюдения влажности воздуха в пределах 80–98%;

– постоянной перекладки, переворота нахоек для сохранения геометрии и сброса напряжений в материале.

Несоблюдение режима сушки и ускорение этого процесса ведут к появлению всевозможных дефектов, изображенных на рис. 4.



Рис. 4. Последствия неправильного режима сушки

Второй этап является самым важным и длительным этапом в сушке мореной древесины. В данный период происходит накопление самых больших напряжений в материале ввиду его усушки и рост реактивных сил. Самый выгодный источник тепла для данного метода – тепло земли. На глубине приблизительно 5 м температура земли постоянна и равна 10°C. На такой глубине должна происходить сушка бревен с соблюдением температурно-влажностных параметров.

Для предотвращения коробления и сохранения геометрии необходимо обеспечить перекладку (переворот) древесины 2–4 раза за период, для больших сечений материала – более 4 раз. На этом этапе древесина меньше подвержена появлению паразитирующих очагов за счет постоянной вентиляции воздуха. Особого внимания требуют места соприкосновения с подкладочным материалом.

Продолжительность второго периода составляет от 180 до 360 дней.

3. Понижение влажности с 50 до 30% путем:

- создания условий постоянной вентиляции;
- обеспечения температуры в пределах 10–20°C;
- соблюдения влажности воздуха в пределах 60–70%;
- постоянной перекладки и переворота нахоек из мореной древесины для сохранения геометрии и сброса напряжений в материале;
- покрытия древесины биостойким составом на водной основе, содержащим железомедные соединения.

Вид деформаций и образование трещин при неизолированной сушке ствола мореного дуба изображен на рис. 5.



Рис. 5. Деформации спила мореного дуба

Третий этап требует покрытия мореной древесины биостойким составом, водная основа которого снизит напряжения внутри материала, позволив сохранить геометрию, а также обеспечит максимальную биозащиту в самом ответственном температурно-влажностном диапазоне.

Продолжительность третьего этапа от 120 до 360 дней.

4. Этап досушки древесины с 30% до рабочей влажности $6 \pm 2\%$ при эксплуатации в отапливаемых помещениях. Если древесина будет эксплуатироваться в неотапливаемых помещениях, то рабочая влажность составит $10 \pm 2\%$. Режим низкотемпературной сушки выбирается в зависимости от требуемой конечной влажности. На данном этапе необходимо принять меры по предотвращению коробления и изменению геометрии древесины. Для этого выбирают режим плавного снижения влажности. Важным параметром для выбора режима досушки являются требуемые конечные прочностные и качественные характеристики из-за большого содержания связанной влаги в древесине мореного дуба.

Продолжительность четвертого этапа от 30 до 60 дней.

Объемная усушка мореной древесины дуба достигает 15–20%, в то время как натуральной 12%.

Изменения линейных размеров и появление дефектов в процессе поэтапной сушки мореной древесины не наблюдаются на первом и втором этапах сушки, так как в этих периодах сушки удаляется свободная влага из полостей клеток мореной древесины.

На третьем этапе сушки влажность снижается от 50 до 30%.

В процессе сушки замечено уменьшение объемных размеров на 5–7%, означающее что, предел насыщения клеточных стенок у мореной древесины выше чем 30%.

На четвертом этапе изменения объемных показателей составили 20%, что также превышает показатели объемной усушки для натуральной древесины дуба.

В процессе сушки крупноразмерных бревен согласно предложенной методике поэтапной сушки разработаны мероприятия по предотвращению возникновения деформативных явлений.

Меры предупреждения возникновения дефектов при сушке мореной древесины приведены в таблице.

Предлагаемые этапы, установленные на основании опытных сушек, проведенных на объектах ГОДО «Транс-Центр» определили основные направления в этой области. В зависимости от исходной влажности сырья, его габаритных размеров и состояния на момент начала сушки необходимо корректировать отдельные параметры температуры сушки, относительной влажности воздуха и скорости его циркуляции.

Данная методология поэтапной сушки мореной древесины может быть применена и для бездеформативной сушки сосны, а также объектов археологических находок из мореной древесины аналогичных возрастных периодов и идентичных мест залегания.

Разработанная поэтапная сушка может послужить методологической основой для сохранения археологических объектов (лодка сосновая XII в. и лодка XVI в. из древесины мореного дуба).

В таблице приведены основные дефекты, возникающие в процессе сушки, обозначены причины их возникновения и предложены меры по их предупреждению.

Дефекты при сушке мореной древесины и меры предупреждения их возникновения

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения
Пластовые трещины	Высокая скорость сушки	Поэтапная сушка, увлажнение
Внутренние трещины	Большие внутренние напряжения	Корректировка температуры
Торцевые трещины	Быстрая сушка торцевых частей	Правильная укладка, выравнивание торцов
Коробление	Радиальная усушка	Правильная укладка, выравнивание и нагружение штабелей

Заключение. Впервые предложенная методика поэтапной сушки мореной древесины предусматривает на первом этапе изоляцию мореной древесины от окружающей среды и сушку от 200 до 100%. На последующих двух этапах сушка происходит при максимальной влажности и низких температурах. На четвертом этапе обеспечивается медленная досушка до влажности, зависящей от условий дальнейшей эксплуатации мореной древесины.

Установлено, что уменьшение размеров высушиваемой древесины наблюдается при влажности в пределах 40%, а это выше, чем у натуральной древесины, где изменения размерных характеристик отмечаются при влажности ниже 30%.

Предложенная методика поэтапной сушки при низких температурах и высокой относительной влажности среды может быть применена для древесины мореного дуба и сосны других

размерных характеристик и влажности с соблюдением контроля параметров сушильного агента и параметров древесины, не допуская на первых трех этапах снижения влажности высушиваемых материалов ниже точки предела насыщения волокон.

Поэтапная сушка, предложенная в работе, может быть использована также для бездеформативной сушки археологических находок из мореной древесины.

Применение двухэтапной защиты мореной древесины вначале консервирующими водорастворимыми средствами, а затем упрочняющими лаками позволяет защитить древесину от повреждения грибами и гидрофобизировать ее от увлажнения и дальнейшего разрушения.

Результаты полученных исследований могут быть использованы при разработке методики сушки и защиты археологических объектов такого же возрастного периода залегания.

Список литературы

1. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакция). М.: Лесная пром-сть, 1988. 512 с.
2. 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: материалы 85-й науч.-техн. конф. с междунар. участием, Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 8–15.
3. 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.
4. Леонович О. К., Дупанов С. А. Перспективные направления переработки натурального мореного дуба // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы докладов 84-й науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию юбилею БГТУ и Дню белорусской науки (с междунар. участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. Минск, 2020. С. 80–81.
5. 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: 10.10.2022 г.).
6. Леонович О. К., Божелко И. К. Консервация археологических и деревянных строений в Беларуси // Каласавіны: материалы XXXIV науч. конф., Минск, 2 окт. 2020 г. Минск, 2020. С. 8–10.
7. Леонович О. К., Мазало Н. А. Исследование долговечности археологической древесины, обработанной защитными составами // Музейные здабыткі: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 12–13 нояб. 2020 г. Брест, 2020. С. 30–35.
8. Курдюмов В. Материалы для курса строительных работ. Вып. 1. Дерево. СПб.: Типография Эрлиха Ю. Н., 1903. 143 с.
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. URL: <http://archtat.ru/events/mezhdunarodnaya-konferentsiya-restavratsiya-konservatsiya-i-muzeefikatsiya-arheologicheskogo-dereva-i-organicheskikh-materialov/> (дата обращения: 28.12.2022).
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: 28.12.2022).

11. Дупанов С. А., Леонович О. К. Классификационный подход к оценке качественных характеристик натурального мореного дуба // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы докл. 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.

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. XXII междунар. науч.-техн. интернет-конф., Брянск, 1–30 мая 2023 г. Брянск, 2023. URL: http://science-bsea.bgita.ru/2023/les_2023/leonovich_komp.htm (дата обращения: 28.05.2023).

14. Чичагова О. А., Зазовская Э. П. Радиоуглеродный метод // Естественно-научные методы исследования культурных слоев древних поселений. М., 2004. С. 34–46.

15. Методы физико-механических испытаний модифицированной древесины. М.: Стройиздат, 1973. 47 с.

References

1. Fengel D., Wegener G. *Drevesina (khimiya, ul'trastruktura, reaktsiya)* [Wood (chemistry, ultrastructure, reaction)]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 512 p. (In Russian).

2. 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: materialy 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Forest engineering, materials science and design: materials of the 85th scientific and technical conference with international participation]. Minsk, 2021, pp. 8–15 (In Russian).

3. 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).

4. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Promising directions for processing natural bog oak. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy dokladov 84-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letnemy yubileyu BGTU i Dnyu belarusskoy nauki (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forest engineering, materials science and design: materials of 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).

5. 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/konferentsii-v-bgtu-v-2022-godu/mezhdunarodnyij-molodezhnyij-lesopromyshlennyij-forum-%C2%ABles-nauka-innovaczii-2022%C2%BB-sentyabr-oktyabr-2022> (accessed 10.09.2023) (In Russian).

6. 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).

7. 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).

8. Kurdyumov V. *Materialy dlya kursa stroitel'nykh rabot* [Materials for the course of construction work]. Vol. 1. Tree. St. Petersburg, Tipografiya Erlich Yu.N. Publ., 1903. 143 p. (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-muzeifikatsiya-arheologicheskogo-dereva-i-organicheskikh-materialov/> (accessed 28.12.2022) (In Russian).

10. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Modification of bog oak wood with acrylic compounds. Available at: http://science-bsea.bgita.ru/2022/les_2022/leonovich_pol.htm (accessed 28.12.2022) (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: materialy dokladov 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Forest engineering, materials science and design: materials of reports of 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 (In Russian).

13. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Determination of the quality of natural bog oak depending on various physical, age and species characteristics. Available at: http://science-bsea.bgita.ru/2023/les_2023/leonovich_komp.htm (accessed 28.05.2023) (In Russian).

14. Chichagova O. A., Zazovskaya E. P. *Yestestvenno-nauchnyye metody issledovaniya kul'turnykh sloyov drevnikh poseleniy* [Natural scientific methods for studying the cultural layers of ancient settlements]. Moscow, 2004, pp. 34–46 (In Russian).

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

Информация об авторах

Дупанов Сергей Александрович – аспирант, инженер кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ser.dupanov@gmail.com

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

Information about the authors

Dupanov Sergey Alexandrovich – PhD student, Engineer, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: ser.dupanov@gmail.com

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

Поступила 17.10.2023

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ	5
Пушкин А. А., Коцан В. В., Машковский В. П., Сидельник Н. Я., Севрук П. В. База данных характеристик лесных пожаров	5
Толкач И. В., Шульга Е. А. Определение высот и диаметров крон деревьев по данным лидарной съемки	15
ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО	22
Гоман П. Н. Факторы, определяющие возникновение и распространение лесных пожаров в Республике Беларусь	22
Климчик Г. Я., Шалимо П. В., Бельчина О. Г. Оценка косвенного ущерба от лесных пожаров в сосняках	31
Рожков Л. Н., Клыш А. С., Ерошкина И. Ф. Создавать леса будущего с учетом уроков прошлого	39
ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ	53
Алам М., Войтов И. В., Носников В. В. Повышение приживаемости лесных культур с помощью гидрогеля, удобрений и регуляторов роста	53
Носников В. В., Севрук Т. Д. Влияние зольности торфа фрезерной заготовки и нейтра- лизующих компонентов на его электропроводность	59
Рейко С. В., Новиков А. И., Новикова Т. П., Петрищев Е. П. Взаимосвязи между гео- метрическими и гравиметрическими параметрами семян сосны обыкновенной (<i>Pinus syl- vestris</i> L.) сорта «Негорельская»	66
Чурило Е. В., Киб Е. К., Пименова Ж. Ю., Жуков И. А. Влияние своевременного про- ведения агротехнических уходов на рост и развитие несомкнувшихся лесных культур в под- зоне грабово-дубово-темнохвойных лесов	77
ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	82
Иващенко Л. О., Баранов О. Ю. Молекулярно-генетическая диагностика INA-бактерий в семенах сосны обыкновенной при инфекционном полегании	82
Козел А. В., Блинцов А. И., Хвасько А. В., Кухта В. Н. Формирование и использование учебно-методического комплекса по дисциплине «Лесная энтомология» для улучшения об- разовательного процесса по направлению «Защита леса»	87
Синчук Н. В., Тихомиров В. Н., Буга С. В. Трофические связи моли-пестрянки <i>Phyllonorycter populifoliella</i> (Treitschke, 1833) в условиях Беларуси: результаты анализа коллекции тополей (<i>Populus</i> L.) Гербария Белорусского государственного университета	92
Хвасько А. В., Ларинина Ю. А., Волченкова Г. А., Корзон В. Г. Некоторые физико- механические свойства древесины дуба, пораженной гнилями	99
ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	105
Кононович Д. А., Арико С. Е., Мохов С. П. Сравнительный анализ способов выполнения погрузочно-разгрузочных операций с учетом перераспределения опорных реакций машины для транспортировки лесосечных отходов	105
Евкович И. А., Протас П. А. Прогнозирование последствий стихийных бедствий в лесном фонде по критериям Сэвиджа и Вальда в программе MathCAD	112

Петровская А. А., Мохов С. П. Определение размерно-качественных показателей древостоя с применением дронов и методов наземного лазерного сканирования	120
Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Коробкин В. А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин	125
Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин	132
Насковец М. Т., Ким Ю. А., Жлобич П. Н., Тявловская Т. М., Щербакова О. К. Теоретические предпосылки взаимодействия колесной нагрузки с грунтовыми основаниями лесных дорог без покрытий	144
Кожарина Т. В., Карпов С. В., Гороновский А. Р. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин для проведения конечно-элементного анализа	150
ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	157
Жарская Я. П., Федосенко И. Г. Использование древесного сырья неоднородной влажности в производстве санитарного наполнителя	157
Дупанов С. А., Леонович О. К. Проблемы сохранения археологических объектов из натурального мореного дуба и сосны	165

CONTENTS

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY	5
Pushkin A. A., Kotsan V. V., Mashkovsky V. P., Sidelnik N. Ya., Sevruck P. V. The database of the forest fire characteristics	5
Tolkach I. V., Shulga E. A. Determination of heights and diameters of tree crowns from lidar data.....	15
FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE.....	22
Goman P. N. Factors determining the occurrence and the spread of forest fires in the Republic of Belarus	22
Klimchik G. Ya., Shalimo P. V., Bel'china O. G. Assessment of damage from forest fires in pine forests	31
Rozhkov L. N., Klysh A. S., Eroshkina I. F. Create the forests of the future with the lessons of the past	39
FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING	53
Alam M., Voitau I. V., Nosnikov V. V. Enhancing forest plantations survivability through hy- drogel, fertilizers, and growth regulators	53
Nosnikov V. V., Sevruck T. D. Influence of ash content of milled peat blank and neutra- lizing components on its electrical conductivity	59
Rabko S. U., Novikov A. I., Novikova T. P., Petrishchev E. P. The relationship between the geometric and gravimetric parameters of the seeds of the Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) of sort Negorelskaya.....	66
Churilo Ye. V., Kib Ye. K., Pimenova Zh. Yu., Zhukov I. A. Influence of timely carrying out agricultural care on the growth and development of non-closed forest crops in the subzone of horn- bek-oak-darconine forests	77
FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING	82
Ivashchenko L. O., Baranov O. Yu. Molecular genetic diagnostics of INA bacteria in Scots pine seed- lings with infectious lodging.....	82
Kozel A. V., Blintsov A. I., Khvasko A. V., Kukhta V. N. Formation and use of the educa- tional and methodological complex of the discipline "Forest entomology" to improve the educational process in the direction of "Forest protection"	87
Sinchuk N., Tichomirov V., Buga S. Trophic associations of the poplar leaf miner, <i>Phyl- lonorycter populifoliella</i> (Treitschke, 1833), in Belarus: results of an analysis of poplar (<i>Populus</i> L.) collection of the Herbarium of the Belarusian State University	92
Khvasko A. V., Larinina Yu. A., Volchenkova G. A., Korzon V. G. Some physical and me- chanical properties of oak wood affected by rot	99
TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS	105
Kononovich D. A., Ariko S. Ye., Mokhov S. P. Comparative analysis of methods for perform- ing loading and unloading operations taken into account of redistribution of supports reactions of machine for transporting logging waste.....	105
Evkovich I. A., Protas P. A. Forecasting the consequences of natural disaster in the forest fund by Savage and Wald criteria in the MathCAD program	112

Petrovskaya A. A., Mokhov S. P. Determination of dimensional and quality indicators of the tree stand using drones and methods ground-based laser scanning	120
Golyakevich S. A., Goronovsky A. R., Korobkin V. A. Methodology for predicting the efficiency of forestry machinery complexes.....	125
Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Mathematical dynamic model of manipulators of multi-operational forestry machines	132
Naskovets M. T., Kim Yu. A., Zhlobich P. N., Tyavlovskaya T. M., Shcherbakova O. K. Theoretical prerequisites of interaction of wheel load with soil bases of forest roads without coverings	144
Kozharina T. V., Karpov S. V., Goronovsky A. R. Reverse engineering of tillage machine parts for finite element analysis	150
WOODWORKING INDUSTRY	157
Zharskaya Ya. P., Fedosenko I. G. Use of wood raw materials of heterogeneous humidity in the production of sanitary filler.....	157
Dupanov S. A., Leonovich O. K. Problems of preservation of archaeological objects from natural bog oak and pine	165

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *Е. А. Матейко, Е. В. Ильченко*
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 12.01.2024. Формат 60×84¹/₈.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 20,6. Уч.-изд. л. 22,1.
Тираж 39 экз. Заказ 21.

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.