



**Математическая модель определения объемов бересты
на деревообрабатывающих предприятиях при организации производства
композиционных материалов**

Александр С. Черных¹, ✉ as-umu@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1601-420X>

Илья Ю. Рублев¹, ilya.rublev.2001@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-7129-699X>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В России на деревоперерабатывающих предприятиях ежегодно образуется около 5 млн м³ березовой коры, которая практически не используется, в основном сжигается. Установлено, что перспективным направлением переработки коры березы является организация производства multifunctional композиционных материалов, в том числе биопластиков из ее компонентов, в частности из бересты. Несмотря на созданные предпосылки в рамках различных НИОКР, данное направление не получило широкого развития, прежде всего из-за отсутствия точного инструмента оценки и прогнозирования количества и параметров бересты. Впервые публикуются обобщенные результаты исследований параметров коры березы пушистой на основании анализа 482 образцов с 16 модельных стволов различных диаметров, а также разработанная на их основе многослойная математическая модель (береста-кора-ствол), позволяющая наиболее точно оценивать объемы бересты и прогнозировать ее запасы на деревообрабатывающих предприятиях. Кроме того, проведен анализ изменения толщины коры и толщины бересты по длине ствола, а также их объемов в зависимости от диаметра, показывающий, что наибольшая толщина бересты и коры отмечается в комлевой части ствола 5,75 мм и 13,6 мм, а наименьшая в вершинной части 0,62 мм и 3,25 мм соответственно. У всех модельных стволов, которые были исследованы выявлена закономерность, что с увеличением диаметра увеличивается толщина бересты, а по месту взятия образцов по длине ствола от комля к вершине уменьшается. Установлено, что объем бересты и коры в зависимости от диаметра по длине ствола не соответствуют закономерностям, установленным при изменчивости их толщины: доля бересты и коры от объема древесины в комлевой части, составляет соответственно 1,54...4,31% и 6,5...12,4%, в срединной части на длине от 7 до 15 метров снижается до 0,85...1,45% и 3,9...7,1% соответственно, а в верхней четверти ствола наблюдается небольшое увеличение до значений 1,05...1,72% и 4,2...6,7% соответственно. При этом доля бересты от объема ствола березы пушистой составляет 2,56...3,84%, а на долю коры приходится 8,78...12,1%. Эти показатели зависят от параметров ствола дерева – диаметра и длины, и соответственно возраста. В основу многослойной математической модели (береста-кора-ствол) положено математическое описание образующей древесного ствола с помощью кубических сплайн-функций, заданных в параметрическом виде, что позволило получить многослойные 3-D модели каждого модельного ствола дерева и оценить объемы каждого слоя. Достоверность результатов составляет 98,1%. На основе разработанного программного обеспечения в среде Python был произведен анализ ряда крупных деревоперерабатывающих предприятий, перерабатывающих березу. Объем бересты от годовой программы предприятий колеблется от 2,58% до 3,74%, в абсолютных величинах доходят до нескольких тысяч и даже десятков тысяч тонн. Результаты исследований позволили прийти к выводу, что при готовой программе переработки более 20 тыс. м³, организация

производства многофункциональных композиционных материалов, в том числе биопластиков из бересты будет эффективна. При этом требуется совершенствование и повышение эффективности технологии производства.

Ключевые слова: *древесные отходы, кора березы, береста, сплайн-функция, объем, композиционный материал, переработка*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Черных А.С. Математическая модель определения объемов бересты на деревообрабатывающих предприятиях при организации производства композиционных материалов / А.С. Черных, И.Ю. Рублев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 437-455. – Библиогр.: с. 453-455 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/26>.

Поступила 20.03.2025. Пересмотрена 22.09.2025. Принята 30.11.2025. Опубликована онлайн 26.12.2025.

Article

Mathematical model for determining the volume of birch bark at woodworking enterprises when organizing the production of composite materials

Alexander S. Chernykh¹, ✉ as-umu@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1601-420X>

Ilya Y. Rublev¹, ilya.rublev.2001@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-7129-699X>

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

In Russia, wood processing enterprises produce about 5 million m³ of birch bark every year, which is practically unused and is mostly burned. It has been established that a promising area for processing birch bark is the production of multifunctional composite materials, including bioplastics made from its components, such as birch bark. Despite the existing prerequisites for this development through various research and development projects, this area has not been widely pursued, primarily due to the lack of an accurate tool for assessing and predicting the quantity and characteristics of birch bark. For the first time, the generalized results of studies of the parameters of the downy birch bark are published based on the analysis of 482 samples from 16 model trunks of various diameters, as well as a multilayer mathematical model (birch bark-trunk) developed on their basis, which allows for the most accurate estimation of birch bark volumes and prediction of its reserves at woodworking enterprises. In addition, an analysis was conducted to determine the change in bark and birch bark thickness along the trunk length, as well as their volumes, depending on the diameter. The analysis showed that the highest thickness of birch bark and bark was observed in the base of the trunk, at 5.75 mm and 13.6 mm, respectively, while the lowest thickness was observed in the top of the trunk, at 0.62 mm and 3.25 mm, respectively. All of the model trunks that were studied showed a pattern in which the thickness of the birch bark increases with increasing diameter, and decreases along the length of the trunk from the base to the top. It has been established that the volume of birch bark and bark, depending on the diameter along the length of the trunk, does not correspond to the patterns established with the variability of their thickness: the proportion of birch bark and bark from the volume of wood in the lumpy part is 1.54...4.31% and 6.5...12.4%, respectively, in the middle part at a length of 7 to 15 meters decreases up to 0.85...1.45% and 3.9...7.1%, respectively, and in the upper quarter of the trunk there is a slight increase to values of 1.05...1.72% and 4.2...6.7%, respectively.

At the same time, the share of birch bark in the volume of the fluffy birch trunk is 2.56...3.84%, and the share of the bark is 8.78...12.1%. These indicators depend on the parameters of the tree trunk, such as diameter and length, and, accordingly, on the age of the tree. The basis of the multilayer mathematical model (birch bark-trunk) is a mathematical description of the tree trunk using cubic spline functions defined in a parametric form, which allowed us to obtain multilayer 3-D models of each model tree trunk and estimate the volumes of each layer. The reliability of the results is 98.1%. Based on the developed software in the Python environment, we analyzed a number of large birch processing enterprises. The volume of birch bark from the annual program of enterprises ranges from 2.58% to 3.74%, and in absolute terms it reaches several thousand and even tens of thousands of tons. The research results led to the conclusion that, with a ready-made recycling program of more than 20000 m³, the production of multifunctional composite materials, including bio-plastics made from birch bark, will be effective. At the same time, it is necessary to improve and enhance the efficient production technology.

Keywords: *wood waste, birch bark, birch bark paper, spline function, volume, composite material, recycling*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: the authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Chernykh A.S., Rublev I.Y. (2025). Mathematical model for determining the volume of birch bark at woodworking enterprises when organizing the production of composite materials. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 437-455 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/26>

Received 20.03.2025. *Revised* 22.09.2025. *Accepted* 30.11.2025. *Published online* 26.12.2025.

Введение

Актуальность

В контексте глобального перехода к принципам устойчивого развития и циркулярной экономики особую актуальность приобретают технологии рационального использования возобновляемых природных ресурсов [1]. Деревообрабатывающая промышленность Российской Федерации, обладающей крупнейшими в мире лесными ресурсами, сталкивается с необходимостью повышения эффективности переработки отходов, доля которых достигает 40-60% от объема исходной древесины [2]. Одним из перспективных, но недостаточно вовлеченных в хозяйственный оборот видов биомассы является береста - наружный покров коры березы.

Уникальный химический состав бересты, характеризующийся высоким содержанием бетулина, суберина и фенольных соединений, открывает широкие возможности для ее использования в производстве композиционных материалов и биологически активных веществ [3].

Однако организация рентабельного производства требует решения фундаментальной задачи - разработки достоверной математической модели определения объемов бересты. Точный прогноз сырьевой базы критически важен для планирования логистических цепочек, проектирования производственных мощностей и обоснования инвестиций в перерабатывающие линии [4].

Современные исследования демонстрируют значительный потенциал использования бересты в композиционных материалах. В работах [5, 6] показано улучшение термических и механических свойств полимерных композитов при введении модифицированной бересты, а исследования [7, 8] подтверждают возможность создания на ее основе биоразлагаемых материалов. Эти разработки формируют устойчивый рыночный спрос, актуализируя задачу точного прогнозирования объемов сырья.

Анализ существующих методик показывает, что, несмотря на наличие работ по определению доли коры в общем объеме ствола [9], береста как

специфический слой требует отдельного рассмотрения. Исследования [10, 11] детально изучают анатомическое строение и физико-химические свойства бересты, в то время как работы [12, 13] экспериментально исследуют изменение ее объема в зависимости от дендрометрических показателей.

В последнее десятилетие активно развиваются подходы к оптимизации раскроя и управления ресурсами на лесопромышленных предприятиях с использованием методов математического программирования [14, 15]. Однако эти модели преимущественно фокусируются на основном продукте, тогда как моделирование побочных продуктов, включая бересту, остается недостаточно разработанным.

Перспективным направлением является внедрение технологий цифровых двойников и лазерного сканирования [16-18], позволяющих с высокой точностью определять морфометрию бревен и служить источником данных для прецизионных моделей объема бересты. Исследования [19,20] в области логистики и управления качеством отходов также вносят значительный вклад в организацию берестяного сырьевого потока.

Анализ литературы свидетельствует о наличии значительного научного задела в смежных областях, однако комплексная математическая модель, предназначенная специально для прогнозирования объемов бересты на промышленном предприятии с учетом производства композиционных материалов, обладает научной новизной и практической значимостью.

Точный прогноз объемов сырья критически важен для планирования логистических цепочек, проектирования производственных мощностей, калькуляции себестоимости и, в конечном счете, для обоснования инвестиций в новые перерабатывающие линии. Существующие методы оценки носят зачастую эмпирический характер и не учитывают всего спектра влияющих факторов, что обуславливает необходимость разработки строгой математической модели, адаптированной к

условиям конкретного деревообрабатывающего предприятия.

В частности, не учитывается нелинейный характер изменения морфометрических параметров березы по длине ствола, что приводит к значительной погрешности в расчетах валового выхода бересты.

В связи с этим разработка прецизионного инструмента для прогнозирования объемов данного вида сырья является научно-прикладной задачей, имеющей существенное значение для развития глубокой переработки древесных отходов.

Целью настоящей работы выступает разработка математической модели, предназначенной для прецизионной оценки объемов бересты и прогнозирования ее сырьевого потенциала на деревообрабатывающих предприятиях в контексте технико-экономического обоснования производства композиционных материалов. Ключевой задачей в рамках достижения поставленной цели является установление регрессионных зависимостей толщины бересты от диаметра ствола и его продольной координаты.

Материалы и методы

Объектом исследования служила береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) – типичный представитель лесных формаций европейской части России. Изучался пробковый слой коры (береста), отбираемый по всей длине ствола с деревьев диаметром от 12 до 44 см.

Заготовка образцов проводилась во время рубок ухода в Воронежском лесничестве. Для получения репрезентативных данных о пространственном распределении толщины и объема бересты было отобрано 16 модельных деревьев, охватывающих весь спектр товарных размеров древесины.

Отбор проб осуществлялся по специально разработанной схеме, предусматривающей взятие образцов коры (береста с лубом) на различных высотах: 0,5 м, 2,0 м и далее с 4-метровым интервалом по всей длине ствола. В каждом поперечном сечении пробы отбирались в пяти равноотстоящих точках по окружности ствола. Параллельно проводились замеры диаметров ствола

в точках отбора проб. Стандартный размер образцов составлял 30×30 мм.

Общий объем экспериментального материала включил 482 образца, отобранных с 16 модельных деревьев (рис.1.). Все образцы прошли стандартную процедуру кондиционирования до воздушно-сухого состояния. Разработанная методика обеспечивает получение статистически достоверных данных о пространственной изменчивости характеристик бересты в зависимости от положения на стволе и таксационных показателей дерева.

Для обеспечения высокой точности измерений диаметра ствола в точках отбора образцов использовалась электронная мерная вилка Haglof Digitech DP II, оснащенная линейкой SmartScale. Измерительная система

характеризовалась диапазоном измерений от 0 до 500 мм с точностью ±1 мм. Регистрация и

обработка данных осуществлялись с помощью карманного персонального компьютера со специализированным программным обеспечением, что обеспечивало автоматизированный сбор и документирование результатов.

Определение толщины образцов бересты проводилось с применением универсального цифрового микрометра «Кобальт», обеспечивающего измерения в диапазоне 0-25 мм с точностью 0,001 мм. Высокая точность измерительного прибора позволяла достоверно фиксировать пространственную изменчивость толщины бересты как вдоль ствола, так и по его окружности. Репрезентативная выборка результатов измерений представлена в таблице 1.

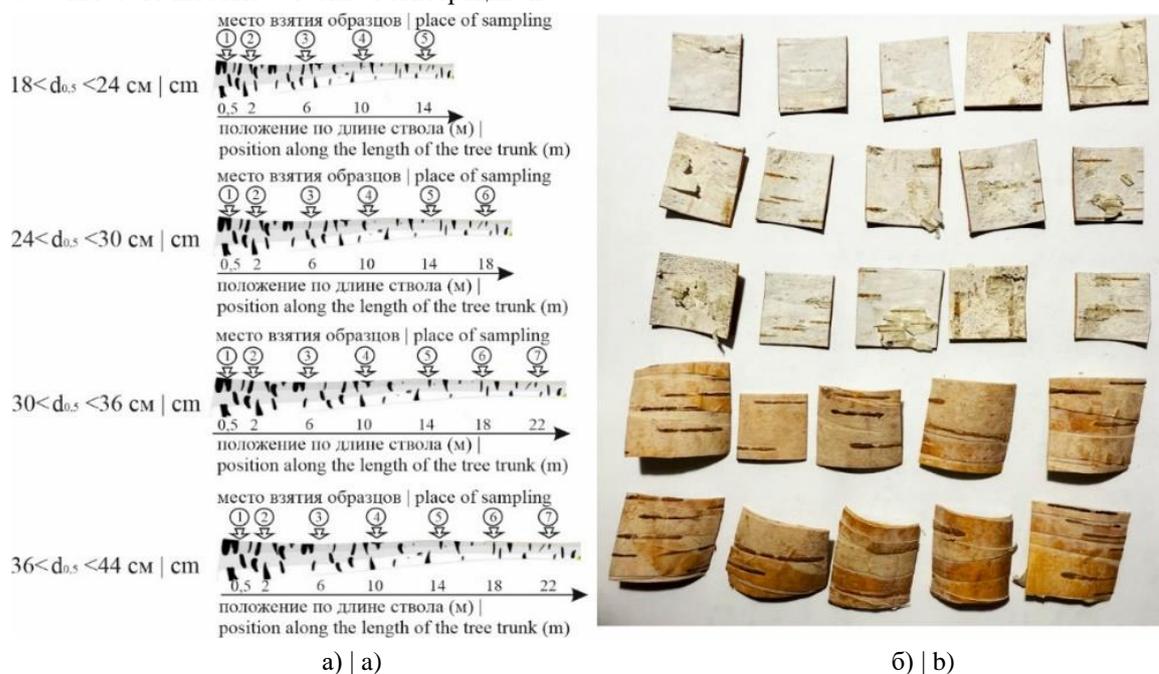


Рисунок 1. Размерный план модельных стволов деревьев для заготовки образцов коры (а) и примеры образцов бересты (б)

Figure 1. Dimensional plan of model tree trunks for collecting bark samples (a) and examples of birch bark samples (b)

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

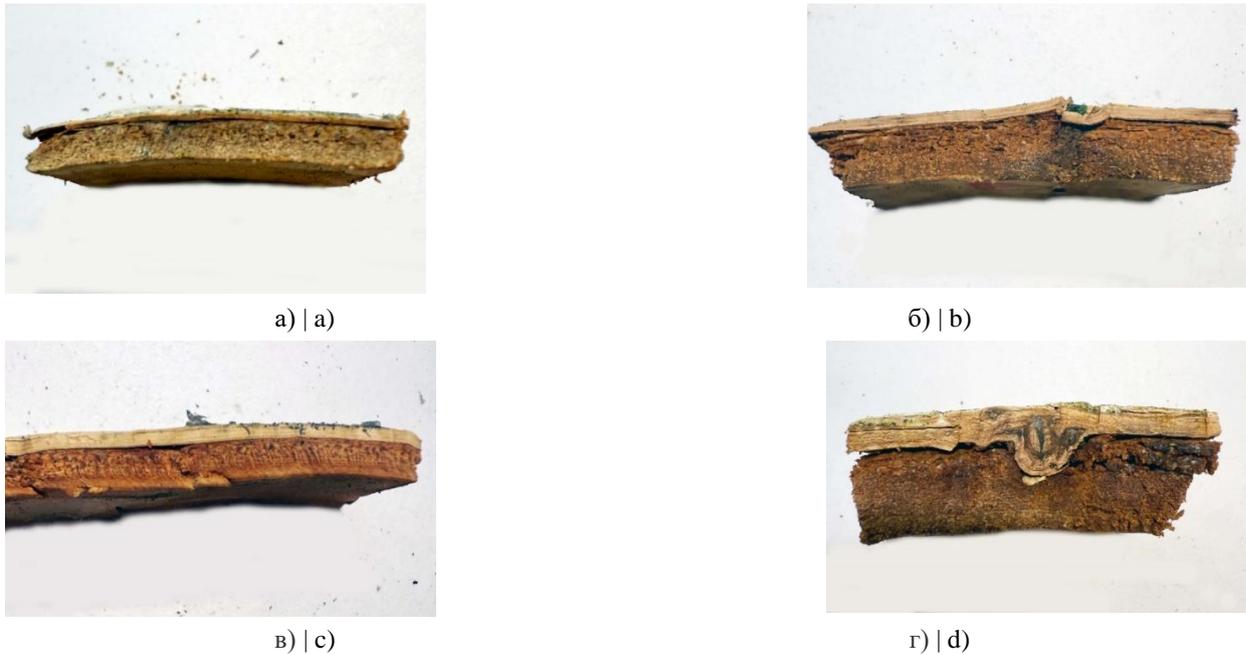


Рисунок 2. Примеры поперечных срезов образцов коры березы (береста и луба) полученных на расстоянии 0,5 м от комля: а) при диаметре 21,2 см; б) при диаметре 24,6 см; в) при диаметре 28,1 см; г) при диаметре 36,8 см.

Figure 2. Examples of cross-sections of birch bark samples (birch bark and bast) obtained at a distance of 0.5 m from the base: a) with a diameter of 21.2 cm; b) with a diameter of 24.6 cm; c) with a diameter of 28.1 cm; d) with a diameter of 36.8 cm.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 1

Table 1

Фрагмент результатов измерений толщины образцов бересты и коры, диаметров березы пушистой по длине ствола (Модельный ствол №8)

Fragment of the results of measurements of the thickness of birch bark samples and the diameters of fluffy birch along the trunk length (Model tree trunk No. 8)

Положение по длине ствола для взятия образцов, м Position along the tree trunk for taking samples, m	Диаметр ствола (см)/толщина бересты (мм)/толщина коры (мм) Tree trunk diameter (cm)/birch bark thickness (mm)/bark thickness (mm)				
	1 образец (0 град.) 1 sample (0 degrees)	2 образец (72 град.) 2 sample (72 degrees)	3 образец (144 град.) 3 sample (144 degrees)	4 образец (216 град.) 4 sample (216 degrees)	5 образец (288 град.) 5 sample (288 degrees)
0,5	43,5	43,1	43,6	42,9	42,6
	5,70	5,64	5,56	5,49	5,41
	13,31	13,21	13,08	12,96	12,86
2	38,5	38,2	38	37,8	37,7
	3,75	3,72	3,71	3,7	3,68
	12,31	12,26	12,14	12,08	11,89
6	31,1	30,8	30,6	30,4	30,5
	2,55	2,52	2,5	2,48	2,5
	9,54	9,48	9,42	9,4	9,44

10	27,3	27	27	27,1	26,9
	2,14	2,1	2,11	2,11	2,1
	7,22	7,09	7,12	7,14	7,11
14	22,6	22,4	22,4	22,3	22,3
	1,69	1,67	1,66	1,66	1,65
	6,85	6,76	6,75	6,69	6,7
18	19,4	19,2	19,2	19,3	19,2
	1,44	1,41	1,42	1,42	1,41
	5,76	5,72	5,7	5,73	5,7
22	16,8	16,6	16,5	16,6	16,4
	1,14	1,12	1,11	1,11	1,12
	4,1	4,06	4,08	4,08	4,07

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Методы измерений и оборудование

Экспериментальные исследования выполнены в искусственно созданном насаждении березы пушистой. Следует отметить, что если пространственная изменчивость толщины коры у березы повислой достаточно хорошо изучена и имеются методики прогнозирования запасов бересты для этой породы, то для березы пушистой аналогичные исследования ранее не проводились. Данный вид обладает рядом преимущественных характеристик: более протяженной бессучковой зоной, шарообразной формой кроны с малым количеством сучьев, а также минимальной склонностью к искривлению стволов, что представляет особую ценность для фанерного производства.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием комплекса программных средств. Первичная обработка и статистический анализ данных измерений толщины бересты проводились в среде MS Excel. Для построения трехмерных моделей стволов и расчета объемов структурных компонентов применялось программирование на Python с использованием сплайн-функций, что позволило с высокой точностью аппроксимировать геометрические характеристики древесных стволов.

Многоуровневая математическая модель "береста-кора-ствол"

Для математического описания сложной геометрии древесного ствола разработана многоуровневая модель, основанная на применении сплайн-аппроксимации. В качестве математического аппарата использованы кубические сплайны, позволяющие с высокой точностью описывать как поперечные сечения ствола, так и его продольную образующую. Особенностью подхода является сохранение гладкости кривых и обеспечение непрерывности изменения кривизны по всей длине ствола.

Управление геометрической формой осуществляется через систему параметрических элементов, включающих контрольные точки и управляющие многоугольники. Данный подход обеспечивает гибкость в описании сложных поверхностей древесного ствола и позволяет точно учитывать его природную изменчивость.

Построение трехмерной геометрической модели

Трехмерное моделирование поверхности ствола реализовано на основе бикубических сплайнов. Модель представляет собой двустороннюю поверхность цилиндрического типа с замкнутой направляющей. Геометрическая структура задается регулярной сеткой контрольных точек, формирующей точечный каркас поверхности. Такой подход позволяет адекватно воспроизводить сложную морфологию древесного ствола и

Формируются сплайн-функции поперечных сечений ствола по длине z:

$$S_k = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}, \quad (7)$$

где x, y – координаты сечения на уровне z -к.

С учетом, что для каждого угла φ выполняется условие:

$$\varphi_k \in \left\{0, \frac{2\pi}{5}, \dots, \frac{8\pi}{5}\right\}. \quad (8)$$

Строим функцию $r(t, s)$, интерполированную по сетке точек (t_i, φ_k) . Формируем систему декартовых координат:

$$\vec{r}(t, s) = \begin{cases} x(t, s) = r(t, s) \cos s; \\ y(t, s) = r(t, s) \sin s; \\ z(t, s) = L \cdot t. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, поверхность ствола формируется вращением радиуса вокруг оси ствола z с плавным изменением вдоль t .

Далее представим многослойную модель: береста – кора – ствол. Каждому слою соответствует своя сплайн-функция радиуса и длины:

$r_{ст}(t, s)$ – радиус ствола в коре;

$r_k(t, s) = r_{ст}(t, s) - h_k(t, s)$ – радиус коры или радиус ствола без коры;

$r_б(t, s) = r_{ст}(t, s) - h_б(t, s)$ – радиус бересты или радиус ствола без бересты.

Тогда модель имеет три вложенные поверхности:

$$\vec{r}_{ст}(t, s), \vec{r}_k(t, s), \vec{r}_б(t, s). \quad (10)$$

Объем каждой из вложенных моделей определяется исходя, что фигуры образованы вращением кривой $r(t)$ вокруг оси ствола z . Представим его интегралом по параметрической поверхности:

$$V = \iint_{(t,s) \in [0,1] \times [0,2\pi]} \left(r(t, s)^2 \cdot \frac{L}{2} \right) dt ds, \quad (11)$$

где $r^2 \cdot dz = r^2 \cdot L dt$.

Данная модель была реализована в среде программирования Python.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ экспериментальных данных выявил устойчивые закономерности в распределении толщины коры и бересты по длине

ствола березы пушистой (рис. 4). Установлено, что толщина обоих параметров демонстрирует выраженную зависимость от диаметра ствола и положения по его длине. Наблюдается постепенное уменьшение толщины коры и бересты от комлевой части к вершине дерева.

Важным результатом является выявление относительной однородности распределения толщины по окружности ствола. Колебания значений в пяти контрольных точках отбора проб не превышают 6,4%, что свидетельствует о равномерности формирования коры и бересты по периметру ствола.

На рисунке 5 представлены установленные зависимости толщины бересты и коры от диаметра и местоположения по длине ствола, а на рисунке 6 показаны обобщенные зависимости для всей совокупности исследованных модельных стволов.

Статистическая обработка массива экспериментальных данных, включающего 486 образцов и 2430 отдельных измерений, подтвердила воспроизводимость выявленных закономерностей для всей выборки модельных деревьев. Полученные зависимости позволяют с достаточной для практических целей точностью прогнозировать объемы бересты на основе таксационных показателей деревьев.

Комплексный анализ экспериментальных данных выявил четкие закономерности в распределении толщины коры и бересты по длине ствола. Как показывает комплексный график (рис. 6), зависимость толщины бересты от диаметра и положения по длине ствола имеет нелинейный характер и успешно описывается степенной функцией. Наблюдается значительное изменение толщины бересты и коры по длине ствола - от максимальных значений 5,75 мм и 13,6 мм в комлевой части до минимальных 0,62 мм и 3,25 мм в вершинной соответственно. У всех исследованных модельных деревьев прослеживается устойчивая тенденция увеличения толщины бересты с ростом диаметра ствола при одновременном ее уменьшении по направлению от комля к вершине. Характерной особенностью является локальное увеличение толщины в зоне расположения сучков. Полученные

зависимости позволяют с высокой достоверностью прогнозировать объемы бересты на основе дендрометрических показателей деревьев, что имеет важное значение для организации промышленной переработки данного вида сырья.

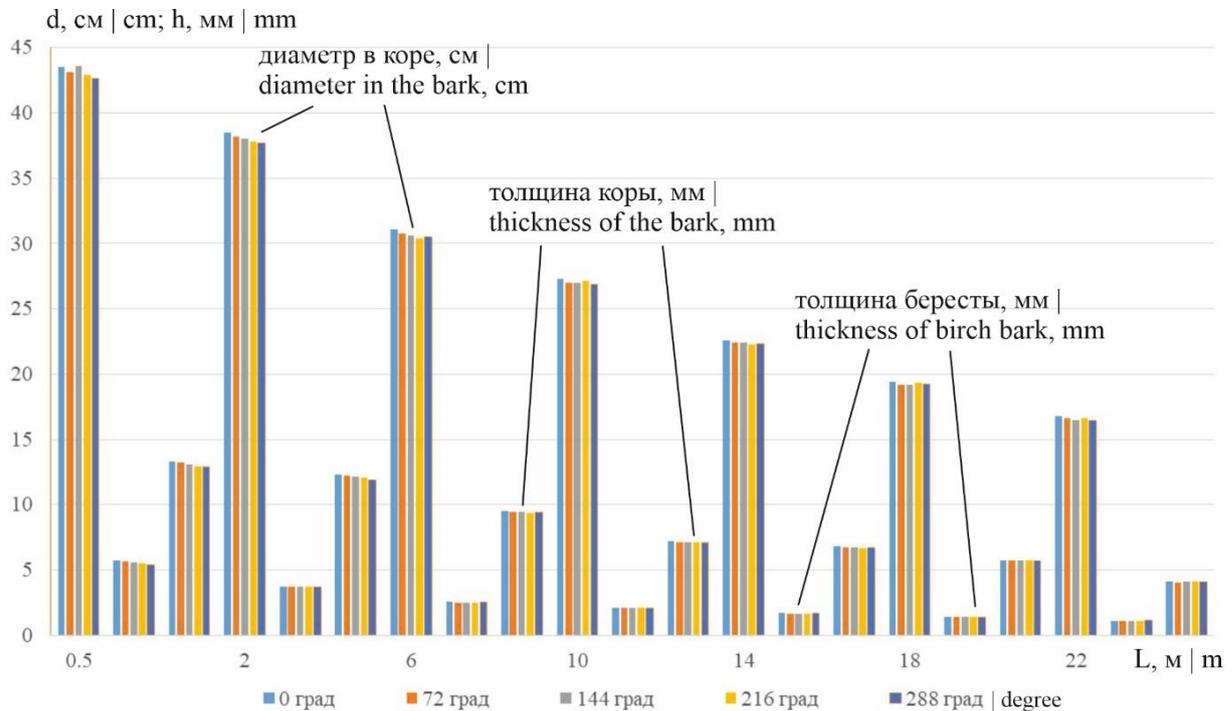


Рисунок 4. Изменение диаметра в коре, толщин коры и толщины бересты по длине ствола березы пушистой (модельный ствол №8)

Figure 4. Changes in bark diameter, bark thickness, and birch bark thickness along the length of a downy birch trunk (model trunk No. 8)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Зависимость толщины бересты от диаметра ствола описывается следующим уравнением, полученным на основе регрессионного анализа данных модельных стволов

$$y = 0,00002x^4 - 0,0013x^3 + 0,0317x^2 - 0,1892x \quad (12)$$

Данная функция отражает указанную зависимость с высокой точностью, коэффициент аппроксимации равен 0,981.

Для количественной оценки объемов бересты, коры и древесины была применена разработанная методика трехмерного моделирования. В результате реализации данного подхода получены

многослойные 3D-модели каждого модельного ствола, представленные в нормализованном виде (рисунок 7).

Использование нормализованных моделей позволяет проводить сравнительный анализ пространственного распределения объемов структурных компонентов для деревьев различного диаметра и таксационных характеристик. Данный подход обеспечивает точное определение объемных показателей бересты как сырьевого ресурса для последующей переработки в композиционные материалы.

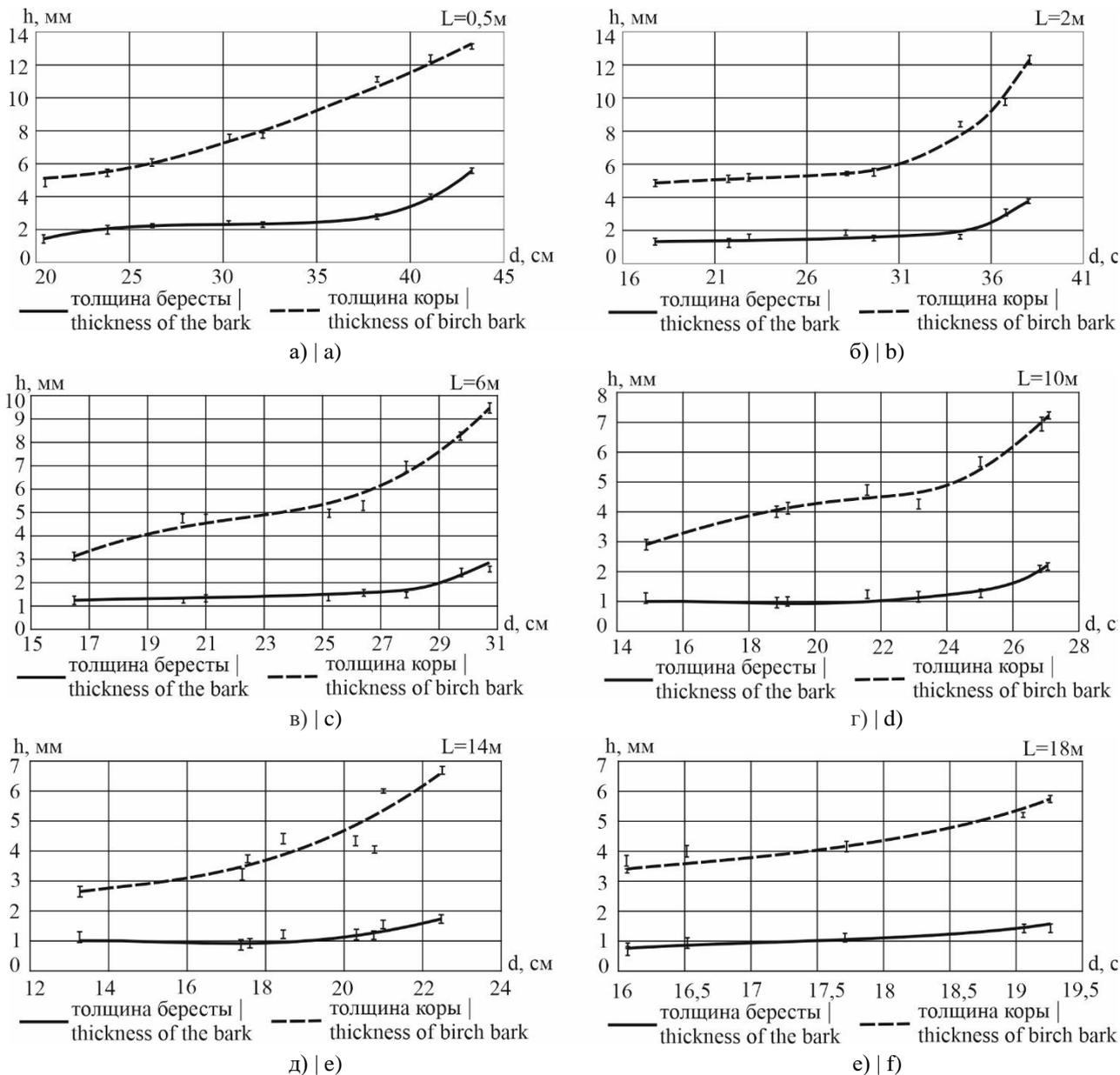


Рисунок 5. Графики зависимости толщины бересты и толщины коры от диаметра и местоположения по длине ствола: а) длина 0,5 м; б) длина 2,0 м; в) длина 6,0 м; г) длина 10,0 м; д) длина 14,0 м; е) длина 18,0 м.

Figure 5. Graphs of the dependence of birch bark thickness and bark thickness on diameter and location along the trunk length: а) length of 0.5 m; б) length of 2.0 m; в) length of 6.0 m; д) length of 10.0 m; е) length of 14.0 m; ф) length of 18.0 m.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

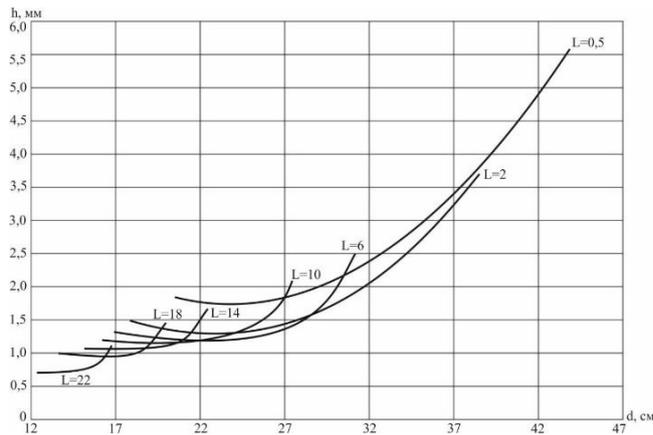


Рисунок 6. График зависимости толщины бересты от диаметра и места взятия образцов по длине ствола березы пушистой

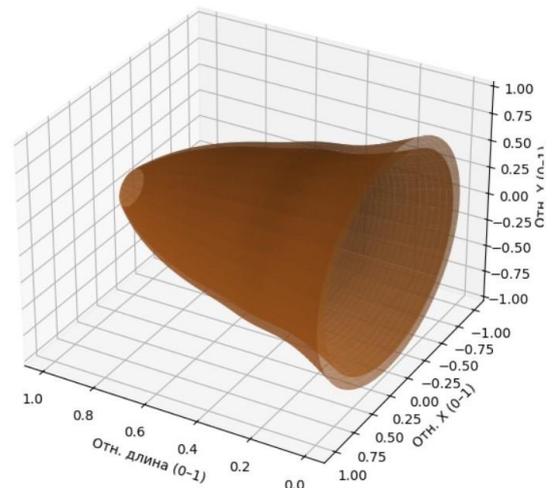
Figure 6. Graph of the dependence of birch bark thickness on the diameter and location of samples taken along the length of the fluffy birch trunk

Источник: Собственная композиция авторов

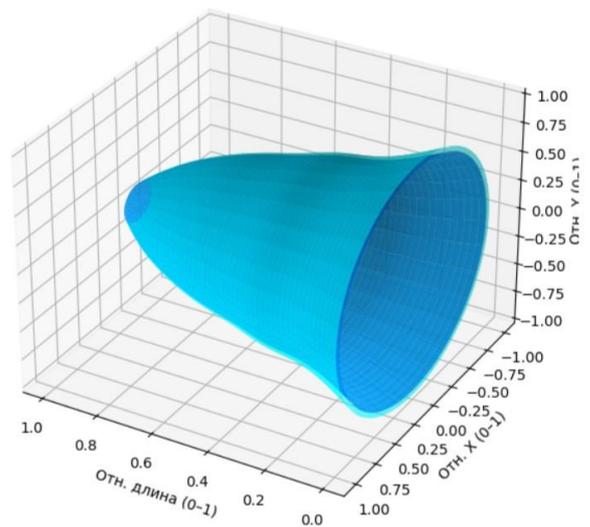
Source: author's composition

Установлено, что объем бересты и коры в зависимости от диаметра по длине ствола не соответствуют закономерностям, установленным при изменчивости их толщины: доля бересты и коры от объема древесины в комлевой части, составляет соответственно 1,54...4,31% и 6,5...12,4%, в срединной части на длине от 7 до 15 метров снижается до 0,85...1,45% и 3,9...7,1% соответственно, а в верхней четверти ствола наблюдается небольшое увеличение до значений 1,05...1,72% и 4,2...6,7% соответственно. Минимальное значение наблюдается в средней части бессучковой зоны: бересты 0,85% и коры 3,9%. Этот показатель выше в 2 раза в комлевой части ствола.

Доля бересты от объема ствола березы пушистой составляет 2,56...3,84%, а на долю коры приходится 8,78...12,1%. (табл. 2) Эти показатели зависят от параметров ствола дерева – диаметра и длины, и соответственно возраста. Кроме того, как указано в исследованиях [1, 19, 20, 21, 22] на толщину бересты и изменчивость ее по длине ствола также оказывают определенное влияние условия произрастания и бонитет насаждения.



а) | а)



б) | б)

Рисунок 7. Примеры многослойной трехмерной модели ствола березы в относительных величинах, а) ствол и кора (береста и луб); б) ствол и береста.

Figure 7. Examples of a multi-layered three-dimensional model of a birch trunk in relative terms: a) trunk and bark (birch bark and bast); b) trunk and birch bark.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результаты указанных исследований в обобщенном виде также были учтены при создании программного обеспечения.

Доля объема бересты и коры от объема ствола дерева березы пушистой

The ratio of birch bark and wood to the volume of the birch tree trunk

№ модели № models	$V_{\text{хл}}, \text{м}^3$	$\varphi_{\text{К}}, \%$	$\varphi_{\text{Б}}, \%$
1	0,304	8,78	2,56
2	0,311	8,81	2,72
3	0,438	8,85	2,68
4	0,441	8,94	2,96
5	0,461	8,98	3,02
6	0,596	8,60	2,86
7	0,851	9,15	3,11
8	0,882	9,24	3,02
9	0,981	8,98	3,28
10	1,030	9,42	3,32
11	1,186	9,69	3,40
12	1,230	10,12	3,48
13	1,378	10,70	3,56
14	1,406	11,23	3,65
15	1,474	11,72	3,63
16	1,488	12,10	3,84

где $V_{\text{хл}}$ - объем ствола (хлыста) м^3 ; $\varphi_{\text{К}}$ – объемная доля коры, %; $\varphi_{\text{Б}}$ – объемная доля бересты, %.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

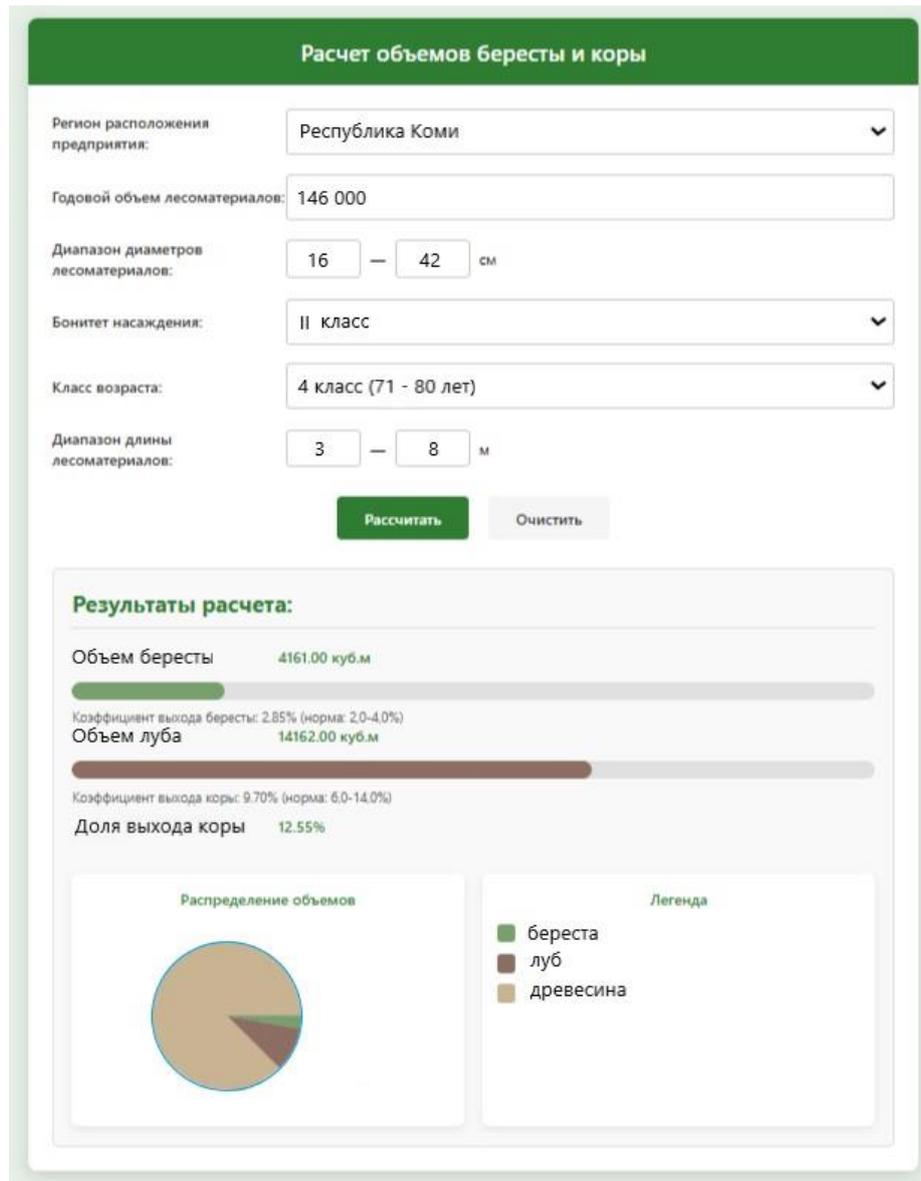


Рисунок 8. Интерфейс программы по расчету объемов бересты и коры на предприятиях
Figure 8. Interface of the program for calculating the volumes of birch bark and wood in enterprise

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таким образом, была разработана и реализована в среде программирования Python математическая модель для определения объемов бересты, коры и древесины. Интерфейс программы представлен на рисунке 8. В качестве основных входных параметров модели используются: объем переработки, диаметральный ряд лесоматериалов, их длина, а также бонитет и класс возраста насаждений.

Применение данного программного обеспечения позволяет осуществлять моделирование и прогнозирование объемов бересты и коры для предприятий березоперерабатывающего комплекса Российской Федерации.

На основе разработанной модели проведен анализ потенциала образования отходов коры и бересты на крупнейших деревоперерабатывающих предприятиях, специализирующихся на переработке березы. Следует отметить, что в России

функционирует более 60 фанерных производств, из которых 31 относится к категории крупных. Наибольшие объемы производства фанеры сосредоточены в Приволжском федеральном округе (33,2% от общероссийского объема), за которым следуют Северо-Западный (32,3%) и Центральный (23,4%) федеральные округа.

В таблице 3 систематизированы расчетные объемы отходов в виде коры и бересты для ведущих предприятий березоперерабатывающей отрасли.

Анализ данных по объемам отходов в виде коры березы показывает, что объем коры в общем объеме сырья составляет от 9,2% до 13,5%, объем бересты от годовой программы предприятий колеблется от 2,58% до 3,74%. Как видно из таблицы 3 объем бересты по каждому предприятию доходит до нескольких тысячи и даже десятков тысяч тонн, которые не используются и в основном сжигаются.

Таблица 3

Table 3

Объемы бересты по ведущим предприятиям России, перерабатывающим березу
Amounts of birch bark at Russia's leading birch processing enterprises

Предприятие Company	Годовая программа по сырью, тыс. м ³ Annual raw material program, thou. m ³	Объем коры, тыс. м ³ The volume of the bark, thou. m ³	Масса коры, тонн The mass of the bark, tons	Объем бересты, тыс.м ³ The volume of birch bark, thou. m ³	Масса бересты, тонн The mass of birch bark, tons	Объемный выход бересты от годовой программы, % Volume output of birch bark from the annual program, %
Группа «СВЕЗА» The Group «SVEZA»	1340	174,2	97552	50116	28064,9	3,74
Холдинг «Илим Тимбер» Holding «Ilm Timber»	310	38,44	21526,4	10044	5624,6	3,24
ОАО «Фанплит» JSC «Fanplit»	210	25,2	14112	5418	3034,1	2,58
Сыктывкарский фанерный завод (СФЗ) Syktyvkar Plywood Factory (SPF)	252	28,98	16228,8	7282,8	4078,4	2,89
Жешартский фанерный завод Zheshtarsky Plywood Factory	240	28,08	15724,8	7464	4179,8	3,11
Производственный холдинг «СтарВуд» Production Holding «StarWood»	210	23,31	13053,6	5544	3104,6	2,64

ООО «Пермский фанерный комбинат» LLC «Perm Plywood Mill»	345	43,815	24536,4	10039,5	5622,1	2,91
ЗАО «Муромский фанерный завод» CJSC «Murog Plywood Factory»	195	21,06	11793,6	6084	3407,1	3,12
ООО «Демидовский фанерный комбинат» LLC «Demidov Plywood Mill»	160	16,32	9139,2	5136	2876,2	3,21
ООО «Брянский фанерный комбинат» LLC «Bryansk Plywood Mill»	230	24,84	13910,4	6532	3657,9	2,84
ЗАО «Семеновский фанерный завод» CJSC «Semenovsky Plywood Factory»	21	2,27	1270,1	785,4	439,8	3,74

Выводы

- Перспективным направлением утилизации древесных отходов, в частности, коры березы, является организация производства многофункциональных композиционных материалов, включая биопластики, из бересты, характеризующихся высокой добавленной стоимостью.
- Обобщение результатов исследований параметров коры березы пушистой (*Betula pubescens*) на основе анализа 482 образцов, отобранных с 16 модельных стволов различного диаметра, позволило установить нелинейный характер изменения толщины коры и бересты по длине ствола. Максимальные значения толщины зафиксированы в комлевой части: 5,75 мм для бересты и 13,6 мм для коры. Минимальные значения наблюдаются в вершинной части: 0,62 мм и 3,25 мм соответственно.
- Установлено, что распределение объемов бересты и коры по длине ствола не коррелирует с выявленной изменчивостью их толщины. Доля бересты от объема древесины в комлевой части составляет 1,54–4,31%, доля коры — 6,5–12,4%. В срединной части ствола (на участке от 7 до 15 метров) данные показатели снижаются до 0,85–1,45% для бересты и 3,9–7,1% для коры. В верхней четверти ствола отмечается незначительное увеличение доли до 1,05–1,72% (береста) и 4,2–6,7% (кора).
- Суммарная доля бересты от объема ствола колеблется в интервале 2,56–3,84%, доля коры — 8,78–12,1%. Установлена зависимость данных показателей от таксационных параметров дерева: диаметра, длины и возраста.
- Разработана многослойная математическая модель «береста-кора-ствол», основанная на математическом описании образующей древесного ствола с применением кубических сплайн-функций, заданных в параметрическом виде. Модель обеспечивает высокоточную оценку объемов бересты и прогнозирование ее ресурсов на деревообрабатывающих предприятиях с достоверностью 98,1%.
- На основе многослойной модели и обобщенных данных разработан программный комплекс в среде Python. Апробация программного обеспечения на ряде крупных деревоперерабатывающих предприятий показала, что выход бересты от годового объема переработки составляет 2,58–3,74%, что в абсолютном выражении может достигать нескольких тысяч и десятков тысяч тонн.
- На основании результатов исследований сделан вывод, что организация производства многофункциональных композиционных материалов и биопластиков из бересты экономически целесообразна для предприятий с объемом переработки свыше 20 тыс. м³ в год.
- Перспективные задачи дальнейших исследований лежат в области совершенствования и повышения эффективности технологии производства многофункциональных композиционных материалов, в том числе биопластиков, на основе бересты.

Список литературы

1. Savov V, Antov P, Zhou Y, Bekhta P. Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications. *Polymers (Basel)*. 2023 Feb 10;15(4):892. doi: 10.3390/polym15040892. PMID: 36850175; PMCID: PMC9966963.
2. Zyryanov, Mikhail & Medvedev, Sergei & Stupak, Pavel & Khvostov, Alexey. (2023). Analysis of the rationality of using a natural resource in the form of wood biomass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1231. 012071. 10.1088/1755-1315/1231/1/012071.
3. Leontiev L.L., Morskoy-Lemeshko P.D., Eltsova L., Vedernikov D.N. Chemical composition and mechanical properties of various parts of birch wood. *Journal of Chemistry and Petroleum Engineering*. 2022;56(4):589-602. DOI: 10.14258/jcprm.20220411045
4. Thurner T., Kuzminov I., Lobanova P. The Russian forest industry: declining wood production and emerging opportunities in bioenergy. *Biofuels*. 2022;13(7):845-857. DOI: 10.1080/17597269.2022.2144761
5. Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Birchwood pre-hydrolytic treatment effect on physical and mechanical characteristics of composite material obtained on its basis. *Forestry Bulletin*. 2022;26(4):103-112. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-103-112
6. Rudykh L.G., Khomich N.V. Problems and prospects of low-rise construction in Eastern Siberia in 2020-2021. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2456:020013. DOI: 10.1063/5.0091611
7. Arefieva S.A., Vavilova V.V. Unique application of composite materials in modern science and technology. *Modern Science*. 2022;4:41-47. DOI: 10.47813/mip.4.2022.4.41-47
8. Zhukov A., Stepina I., Bazhenova S., Sodomon M. Preliminary optimization of composite compositions based on modified Sosnowsky's Heracleum. *BioResources*. 2024;19(3):5731-5740. DOI: 10.15376/biores.19.3.5731-5740
9. Gorbunova V., Menshikov S. The Chemical Composition of Birch Leaves and the Vital State of Birch Stands in the Gradient of Aerotechnogenic Emissions of JSC "Karabashmed". *Environmental Research*. 2023;216:114432. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114432
10. Platonov A., Novikov A., Kantyeveva E.V., Snegireva S., Novikova T., Drapalyuk M. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. *Forests*. 2022;13(11):1758. DOI: 10.3390/f13111758
11. Safina A., Safin R.G., Valeev K.V., Nazipova L.R., Solov'eva E.N. Mathematical description of birch bark impregnation and heating process of birch bark with toluene. *E3S Web of Conferences*. 2023; 413:06007. DOI: 10.1051/e3sconf/202341306007
12. Medvedev S.P., Yakusheva M., Dudin P. A model for improving the efficiency of forest industry enterprises in the context of rational environmental management. *BIO Web of Conferences*. 2024; 108:14004. DOI: 10.1051/bioconf/202410814004
13. Krivorotova A.I., Usoltsev O.A. Study of the possibility of using biomass coniferous in the production of composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2023; 1230:012011. DOI: 10.1088/1757-899X/1230/1/012011
14. Dolmatov S., Scherbakov A., Tsubiks V., Zhadan O., Sayfutdinova A., Sakhapov R. Increasing the efficiency of design in CAD CAE systems based on the application of parametrization methods. *BIO Web of Conferences*. 2024; 105:05010. DOI: 10.1051/bioconf/202410505010
15. Kunickaya O., Levushkin D., Voronova A., Storodubtseva T., Kruchinin I., Pomiguyev A., Borisov V.M., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals. *Forests*. 2023;14(8):1543. DOI: 10.3390/f14081543
16. Zyryanov M., Yakusheva M.O. The introduction of modern woodworking equipment into the logging process as a tool to improve environmental management. *BIO Web of Conferences*. 2024;108:14005. DOI: 10.1051/bioconf/202410814005

17. Saveliev Y. Biotechnological potential of the forest regions of Russia and a feasibility study for integrated processing of forest biotechnological resources. *Forestry Bulletin*. 2022;26(2):45-53. DOI: 10.15862/02nzor122
18. Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2024). Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. *Sensors*, 24(10), 3117. <https://doi.org/10.3390/s24103117>
19. Reinprecht L., Iždinský J. Composites from Recycled and Modified Woods – Technology, Properties, Application. MDPI Books. 2023;210 p. DOI: 10.3390/books978-3-0365-3108-3
20. Wenig C., Berendt F., Burgert I. et al. Adhesives free bark panels: An alternative application for a waste material. *PLoS ONE*. 2023;18(3): e0280721. DOI: 10.1371/journal.pone.0280721

References

1. Savov V, Antov P, Zhou Y, Bekhta P. Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications. *Polymers (Basel)*. 2023 Feb 10;15(4):892. doi: 10.3390/polym15040892. PMID: 36850175; PMCID: PMC9966963.
2. Zyryanov, Mikhail & Medvedev, Sergei & Stupak, Pavel & Khvostov, Alexey. (2023). Analysis of the rationality of using a natural resource in the form of wood biomass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1231. 012071. 10.1088/1755-1315/1231/1/012071.
3. Leontiev L.L., Morskoy-Lemeshko P.D., Eltsova L., Vedernikov D.N. Chemical composition and mechanical properties of various parts of birch wood. *Journal of Chemistry and Petroleum Engineering*. 2022;56(4):589-602. DOI: 10.14258/jcprm.20220411045
4. Thurner T., Kuzminov I., Lobanova P. The Russian forest industry: declining wood production and emerging opportunities in bioenergy. *Biofuels*. 2022;13(7):845-857. DOI: 10.1080/17597269.2022.2144761
5. Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Birchwood pre-hydrolytic treatment effect on physical and mechanical characteristics of composite material obtained on its basis. *Forestry Bulletin*. 2022;26(4):103-112. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-103-112
6. Rudykh L.G., Khomich N.V. Problems and prospects of low-rise construction in Eastern Siberia in 2020-2021. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2456:020013. DOI: 10.1063/5.0091611
7. Arefieva S.A., Vavilova V.V. Unique application of composite materials in modern science and technology. *Modern Science*. 2022; 4:41-47. DOI: 10.47813/mip.4.2022.4.41-47
8. Zhukov A., Stepina I., Bazhenova S., Sodomon M. Preliminary optimization of composite compositions based on modified Sosnowsky's Heracleum. *BioResources*. 2024;19(3):5731-5740. DOI: 10.15376/biores.19.3.5731-5740
9. Gorbunova V., Menshikov S. The Chemical Composition of Birch Leaves and the Vital State of Birch Stands in the Gradient of Aerotechnogenic Emissions of JSC "Karabashmed". *Environmental Research*. 2023; 216:114432. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114432
10. Platonov A., Novikov A., Kantyeveva E.V., Snegireva S., Novikova T., Drapalyuk M. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. *Forests*. 2022;13(11):1758. DOI: 10.3390/f13111758
11. Safina A., Safin R.G., Valeev K.V., Nazipova L.R., Solov'eva E.N. Mathematical description of birch bark impregnation and heating process of birch bark with toluene. *E3S Web of Conferences*. 2023; 413:06007. DOI: 10.1051/e3sconf/202341306007
12. Medvedev S.P., Yakusheva M., Dudin P. A model for improving the efficiency of forest industry enterprises in the context of rational environmental management. *BIO Web of Conferences*. 2024; 108:14004. DOI: 10.1051/bioconf/202410814004
13. Krivorotova A.I., Usoltsev O.A. Study of the possibility of using biomass coniferous in the production of composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2023; 1230:012011. DOI: 10.1088/1757-899X/1230/1/012011
14. Dolmatov S., Scherbakov A., Tsubiks V., Zhadan O., Sayfutdinova A., Sakhapov R. Increasing the efficiency of design in CAD CAE systems based on the application of parametrization methods. *BIO Web of Conferences*. 2024; 105:05010. DOI: 10.1051/bioconf/202410505010

15. Kunickaya O., Levushkin D., Voronova A., Storodubtseva T., Kruchinin I., Pomiguyev A., Borisov V.M., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals. *Forests*. 2023;14(8):1543. DOI: 10.3390/f14081543
16. Zyryanov M., Yakusheva M.O. The introduction of modern woodworking equipment into the logging process as a tool to improve environmental management. *BIO Web of Conferences*. 2024;1 08:14005. DOI: 10.1051/bioconf/202410814005
17. Saveliev Y. Biotechnological potential of the forest regions of Russia and a feasibility study for integrated processing of forest biotechnological resources. *Forestry Bulletin*. 2022;26(2):45-53. DOI: 10.15862/02nzor122
18. Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. *Sensors*. 2024; 24(10), 3117. <https://doi.org/10.3390/s24103117>
19. Reinprecht L., Iždinský J. Composites from Recycled and Modified Woods – Technology, Properties, Application. *MDPI Books*. 2023;210 p. DOI: 10.3390/books978-3-0365-3108-3
20. Wenig C, Reppe F, Horbelt N, Spener J, Berendt F, Cremer T, et al. Adhesives free bark panels: An alternative application for a waste material. *PLoS ONE*. 2023; 18(1): e0280721. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280721>

Сведения об авторах

✉ *Черных Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1047-7331>, e-mail: as-umu@mail.ru

Рублев Илья Юрьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7129-699X>, e-mail: ilya.rublev.2001@mail.ru

Information about the authors

✉ *Alexander S. Chernykh* – Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Forestry, Metrology, Standardization, and Certification, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1047-7331>, e-mail: as-umu@mail.ru

Ilya Yu. Rublev – Postgraduate Student, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Department of Forestry Industry, Metrology, Standardization and Certification, 8 Timiryazeva Street, Voronezh, 394087; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7129-699X>, e-mail: ilya.rublev.2001@mail.ru

✉ Для контактов | Corresponding author