



## Исследование качества пропитки и структурных особенностей древесины березы методом микрорентгеновской компьютерной томографии

Елена В. Томина<sup>1</sup>, [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Константин В. Жужукин<sup>1</sup>, [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Александр И. Дмитренко<sup>1</sup>, [dmitrenkov2109@mail.ru](mailto:dmitrenkov2109@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>

Нгуен Ань Тьен<sup>2</sup>, [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn), <https://orcid.org/0000-0002-4396-0349>

Анна А. Соловьева<sup>3</sup>, [annasolo1990@mail.ru](mailto:annasolo1990@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0009-5070-2645>

Алена В. Дорошенко<sup>1</sup>, [al.doroschenko2016@yandex.ru](mailto:al.doroschenko2016@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7487-5078>

Анна Ю. Корчагина<sup>1</sup>, [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>

Людмила А. Новикова<sup>1</sup>, [yonk@yandex.ru](mailto:yonk@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3162-8872>

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

<sup>2</sup>Педагогический университет Хошимина, ул. Ан Зьонг-Вьонг, 280, округ 4, район 5, Хошимин, Вьетнам

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация

Контроль качества внутренней структуры древесины является актуальной задачей как с научной, так и с практической точек зрения. Существующие методы контроля в основном подразумевают деструктивный подход связанный с разрушением части изделия, что в отдельных случаях является невозможным. В данном исследовании было проведено изучение морфологических особенностей пустотного пространства древесины с оценкой открытой пористости, распределения пор по размерам, а также с отдельным анализом пустотного пространства с пространственным определением и оценкой размеров пор, заполненных пропиткой и пустых пор методом микрорентгеновской компьютерной томографии. Для оценки пористости применили подход сегментация пор по рентген-плотности. Общая пористость образца древесины, использованного для исследования составляла 42,96%, Наибольшее количество пор в процентном соотношении от общего объема было размером от 7 до 14 микрометров, что соответствует расстоянию между основным структурным компонентами клеточной стенки (сосуды, трахеиды, либриформ). После пропитки древесины по данным микрорентгеновской томографии процент заполненных пор составлял 75,1%, объем оставшихся пустотных пространств в древесине не заполненной пропиточной композицией составил 26,9%. Кроме того, было проведено 3D моделирование древесины без пропитки и с пропиткой с отдельной сегментацией пропиточной композиции в порах. Установлено, что данный метод позволяет с высокой степенью точности оценить степень и глубину пропитки, распределение жидкости по анатомическим структурам древесины, а применение метода сегментации по рентген плотности позволяет повысить точность исследования. Следует отметить, что точность измерения напрямую от размера образца.

**Ключевые слова:** *древесина, анатомические особенности, структура, пропитка, микрорентгеновская томография*

**Финансирование:** Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>.

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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование качества пропитки и структурных особенностей древесины березы методом микрорентгеновской компьютерной томографии / Е. В. Томина, К. В. Жужукин, А. И. Дмитренко, Нгуен Ань Тьен, А. А. Соловьева, А. В. Дорошенко, А. Ю. Корчагина, Л. А. Новикова // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 4 (56). – С. 172-186. – Библиогр.: с. 182-185 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/12>.

*Поступила* 18.10.2024. *Пересмотрена* 2.11.2024. *Принята* 12.12.2024. *Опубликована онлайн* 27.12.2024.

Article

### Study of the quality of impregnation and structural features of birch wood using the method of micro-X-ray computed tomography

Elena V. Tomina<sup>1</sup>, [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru),  0000-0002-5222-0756

Konstantin V. Zhuzhukin<sup>1</sup>, [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru),  0000-0002-7093-3274

Alexander I. Dmitrenkov<sup>1</sup>, [dmitrenkov2109@mail.ru](mailto:dmitrenkov2109@mail.ru),  0000-0001-9296-1762

Nguyen Anh Tien<sup>2</sup>, [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn),  0000-0002-4396-0349

Anna A. Solovieva<sup>1</sup>, [annasolo1990@mail.ru](mailto:annasolo1990@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0009-5070-2645>

Alena V. Doroshenko<sup>1</sup>, [al.doroschencko2016@yandex.ru](mailto:al.doroschencko2016@yandex.ru),  0000-0001-7487-5078

Anna Y. Korchagina<sup>1</sup>, [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>

Lyudmila A. Novikova<sup>1</sup>, [yonk@yandex.ru](mailto:yonk@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3162-8872>

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

<sup>2</sup>Ho Chi Minh City University of Education, 278 An Duong Vuong St., Ward 4, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>3</sup>Voronezh State University, 1, University Square, Voronezh, 394018, Russian Federation

#### Abstract

Quality control of the internal structure of wood is an urgent task from both scientific and practical points of view. Existing control methods mainly imply a destructive approach associated with the destruction of a part of the product, which in some cases is impossible. In this study, the morphological features of the void space of wood were studied with an assessment of open porosity, pore size distribution, as well as a separate analysis of the void space with spatial determination and assessment of the sizes of pores filled with impregnation and empty pores using the method of micro-X-ray computed tomography. To assess the porosity, the approach of pore segmentation by X-ray density was used. The total porosity of the wood sample used for the study was 42.96%. The largest number of pores as a percentage of the total volume was 7 to 14 micrometers in size, which corresponds to the distance between the main structural components of the cell wall (vessels, tracheids, libriforms). After impregnation of wood, according to the micro-X-ray tomography data, the percentage of filled pores was 75.1%, the volume of the remaining void spaces in the wood not filled with the impregnation composition was 26.9%. In addition, 3D modeling of wood without impregnation and with impregnation with separate segmentation of the impregnation composition in the pores was carried out. It was found that this method allows to estimate with a high degree of accuracy the degree and depth of impregnation, the distribution of liquid along the anatomical structures of wood, and the use of the segmentation method by X-ray density allows to increase the accuracy of the study. It should be noted that the accuracy of the measurement is directly dependent on the size of the sample.

**Keywords:** wood, anatomical features, structure, impregnation, micro-X-ray tomography

**Funding:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Tomina E. V., Zhuzhukin K. V., Dmitrenkov A. I., Nguyen Anh Tien, Solovyova A. A., Doroshenok A. V., Korchagina A. Yu., Novikova L. A. (2024) Study of the quality of impregnation and structural features of birch wood using the method of micro-X-ray computed tomography. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 4(56), pp. 172-186 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/12>.

*Received* 18.10.2024. *Revised* 12.11.2024. *Accepted* 12.12.2024. *Published online* 27.12.2024.

### Введение

Химическая неоднородность в пространственных измерениях является распространенной проблемой при использовании биоматериалов, таких как древесина. Структурная и полимерная анизотропность возникает в натуральной древесине, например, через распределение экстрактивных веществ сердцевины, а также может быть результатом обработки древесины, например, химическими агентами в процессе пропитки. Помимо современных процессов, которые создают функциональные материалы из древесной основы зависящих от процесса распределение химических веществ также актуальны в традиционных пропиточных обработках древесины, которые предотвращают быструю деградацию при наружном применении. Выявление областей применения древесных материалов с недостаточным или чрезмерным поглощением химических веществ требует современных методов химической и физической визуализации для анализа химических свойств образца в пространственных измерениях. Однако применение таких методов визуализации к древесине затруднено из-за ее сложного иерархического, анизотропного построения. Древесина выглядит как компактное твердое тело в макроскопическом масштабе, но состоит из длинных и полых клеток на микроскопическом уровне. Например, клетки волокон в листовых породах древесины обычно имеют длину 0,5–2 мм и диаметр 10–60 мкм. Поэтому химическую неоднородность необходимо учитывать на макроскопическом уровне древесного продукта в масштабе нескольких миллиметров и более, а также по клеткам в микронном масштабе (Brunswick P. et al., [1] и Deklerck V. et al, [2]).

Ярким примером процесса обработки, основанном на равномерном распределении химического вещества в древесине на разных пространственных уровнях, является пропитка термореактивными смолами, такими как фенолформальдегидная смола. Пропитка не только повышает твердость древесины, но и защищает её от грибкового поражения и изменений размеров, вызванных поглощением воды. При модификации пропиткой древесину сначала пропитывают водным раствором мономера или олигомера фенолформальдегидной-смолы с помощью вакуума и/или давления. Затем пропитанную древесину высушивают, а смолу отверждают при нагревании, чтобы сформировать крупные макромолекулы, которые необратимо фиксируются в структуре древесины. Условия пропитки и этап термической обработки определяют распределение смолы (или других химических веществ) в обработанной древесине на макроскопическом и клеточном уровнях (Томина и др. [25]).

На микроскопическом уровне проникновение термореактивной смолы в клеточную стенку древесины является необходимым условием для достаточной защиты. Смола заполняет пространство в клеточных стенках, которое в противном случае занимала бы вода, и древесина остается в постоянно набухом состоянии. Это повышает стабильность размеров и устойчивость обработанной древесины к гнилостным грибам. Однако распределение смолы на макроскопическом уровне, в масштабе нескольких миллиметров или сантиметров, не менее важно. В этом масштабе градиенты нагрузки смолой могут приводить к пространственным различиям в усадке и, следовательно, создавать напряжения, сотовые

расщелины и трещины. Сильно модифицированные поверхностные слои также могут не препятствовать гниению в менее модифицированных внутренних слоях обработанной доски, поскольку гнилостные грибы могут проникать через участки древесины с высокой степенью модификации, чтобы добраться до других участков обработанной древесины

На сегодняшний день наиболее распространенным методом исследования структурных особенностей пород древесины является разрушающий отбор проб образцов и изучение анатомических особенностей древесины в процессе микроскопии. Во многих областях отбор образца для деструктивного анализа не представляет проблемы. Однако в других случаях (например, культурные объекты) даже небольшой образец представляет собой значительный разрыв в исходном материале и необратимое изменение целостности объекта.

Для удовлетворения потребности в неразрушающей идентификации древесины, исследуются и разрабатываются инструменты неразрушающего анатомического анализа. Например, химическое профилирование с использованием масс-спектрометрии всё чаще применяется для идентификации древесины (Shang D. et al. [3]). Совсем недавно для изучения анатомии древесины была применена микромагнитно-резонансная томография (Stagno V. et al. [4]). Однако разрабатываемые способы имеют определенные ограничения.

Метод рентгеновской томографии на сегодняшний день является наиболее разработанным методом неразрушающего исследования внутренней структуры древесины. Этот инструмент позволяет визуализировать те же анатомические особенности, что и стандартный микроскопический анализ. При первом внедрении рентгеновской КТ в медицине качество сканирования было слишком низким, чтобы визуализировать древесину для получения какой-либо анатомической информации. По мере развития технологий, а впоследствии и улучшения качества сканирования, рентгеновская КТ была применена при исследованиях тканей растений ([Frias M. et al., [5], Duncan K. E. et al. [6], Dierickx S. et al. [7]). Начиная с 2009 года были опубликованы многообещающие эксперименты и тематические исследования,

доказывающие жизнеспособность метода описательной и количественной идентификации древесины (Rankin K. E. et al. [8], Stelzner J. et al. [9]). Поскольку метод рентгеновской томографии позволяет различить плотности веществ, в связи с чем его возможно применять для контроля качества пропитки древесины.

Компьютерная рентгеновская микротомография является удобным инструментом неразрушающего контроля, в литературе встречается достаточно работ по исследованиям строения древесины и ее пористости. (Koddenberg T., Zauner M., Militz H. [10], Karahara I. et al. [12], Hwang S. W., Tazuru S., Sugiyama J. [11,13]).

Недавние опубликованные исследования, несмотря на низкое разрешение по сравнению с современными технологиями, показывают, что данную неразрушающую технологию можно систематически использовать для выявления наличия или отсутствия следов ветвления, то есть неровностей, связанных с ветвлением, таких как сучки, в дубе.

В последние годы рентгеновская микротомография высокого разрешения показала себя как перспективный метод для количественного анализа анатомии растений и древесины. Авторы одного из исследований смогли визуализировать трёхмерную структуру различных растений, таких как секции пальмы, дуба, ананаса, цветка тюльпана и соцветия *Leucospermum tottum*, с использованием относительно низкого линейного разрешения в 50 микрометров. Для изучения внутренней структуры древесины, были созданы трёхмерные модели срезов бука, дуба, сердцевины ели, пихты Дугласа, сосны обыкновенной, тика и эвкалипта, а также арабидопсиса, который не является древесным растением.

Можно считать, что метод компьютерной рентгеновской микротомографии достаточно молодой и не обладает, практически – не включает в себя стандартов, которые давали бы одинаковые результаты анализа. Это связано, во-первых, с широким разнообразием конфигураций компьютерных рентгеновских микротомографов, которые отличаются своей конфигурацией и вшитыми в программное обеспечение режимами сканирования, реконструкции и обработки данных. Кроме этого, каждое ска-

нирование образцов является практически уникальным, так как на конечный результат могут повлиять такие факторы как температура, микродвижения образца во время сканирования, износ томографической камеры и рентгеновской трубки и другие. Все эти факторы вызывают различные артефакты при сканировании, которые не всегда возможно устранить. Очень распространенная и дискуссионная тема связана с определением градации серого цвета для математических расчётов геометрических свойств того или иного элемента образца. Существуют различные подходы с использованием нейросетей, математических алгоритмов автоматизированного выбора, например градации серого цвета пор, но общепринятой методикой исследования на сегодняшний день является определение градацией «на глаз» оператора микротомографа. (Ponomarev A. et al. [14], Герке К.М. [15]).

Задачей с точки зрения компьютерной рентгеновской микротомографии в контексте данного исследования выступило изучение морфологических особенностей пустотного пространства древесины с оценкой открытой пористости, распределения пор по размерам, а также с отдельным анализом пустотного пространства с пространственным определением и оценкой размеров пор заполненных пропиткой и пустых пор. Также наша группа исследователей выполнила 3D моделирование древесины без пропитки, с пропиткой с отдельной сегментацией пропитки в порах.

### Материалы и методы

#### Объект и предмет исследований

Для исследований были подготовлены цилиндрические образцы древесины березы диаметром 3 мм. Образцы представляли собой цилиндрические керны, взятые из центров пропитанных и не пропитанных образцов древесины размерами 150x40x40 мм (длина, толщина, ширина). Про-

питка образцов осуществлялась по методике описанной в (K. V. Zhuzhukin, [16]). В качестве пропиточного состава использовали отработанное моторное масло GULF Formula GX Powermax SAE 5W-40.

Томографию проводили при помощи компьютерного рентгеновского микротомографа SkyScan 1172 (Bruker, Germany) на котором были получены цифровые модели данных образцов. Настройки томографического сканирования были следующими: Source Voltage (kV) = 28; Source Current (uA) = 163; Image Pixel Size (um) = 1,87; Filter = No filter; Exposure (ms) = 250; Rotation Step (deg) = 0.3; Frame Averaging = ON (6); Use 360 Rotation = YES; Random Movement = ON (20). Настройки реконструкции, которые использовались в программе NRecon: Smoothing=0; Ring Artifact Correction=20; Beam Hardening Correction (%)=0; Minimum for CS to Image Conversion=-0.095658; Maximum for CS to Image Conversion=0.209181.

Далее цифровые модели обрабатывались в таких программах как *CTan*, *DataViewer*, *CTvox*, *CTvol* (Bruker, Germany). Область интересов для анализа образцов была выбрана в виде цилиндра диаметром 2 мм и высотой 1,7 мм в связи с необходимостью повышения качества анализа и визуализации.

Особое внимание следует уделить анализу в среде *CTan*, так как количественная оценка геометрии пустотного пространства производилась именно в ней. Для исследования томографических изображений характерны наличие артефактов. Поэтому для повышения качества расчетов мы использовали дополнительную обработку сегментированных по рентген-плотности объектов (образцов, на рис. 2 представлены примеры томографических изображений а) естественный вид, б) сегментация по рентген-плотности; с) сегментация по рентген-плотности и дополнительная обработка в *CTan*.

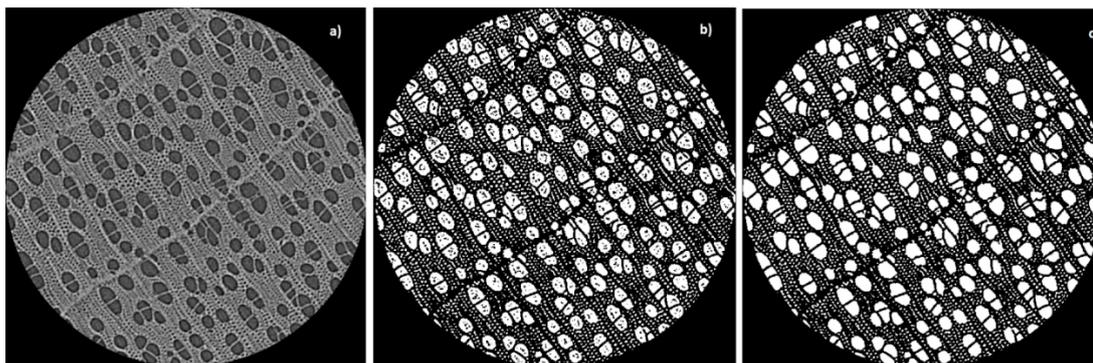


Рисунок 1. Примеры томографических изображений а) естественный вид, б) сегментация пор по рентген-плотности; в) сегментация пор по рентген-плотности и дополнительная обработка в *CTan*

Figure 1. Examples of tomographic images a) natural view, b) pore segmentation by X-ray density; c) pore segmentation by X-ray density and additional processing in *CTan*

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' calculations

Для удаления артефактов, связанных с широким интервалом рентген-плотности, который в последствие выдает черные точки внутри пор (они влияют на количественную оценку пористости и распределения пор по размерам) – был использован метод удаления черных точек (Despeckle- Remove black speckles (2D space)- less than 1000 pixels). Это позволило повысить качества расчетов в *CTan*. Анализ пропитанной древесины проводился по аналогичной методике. Отличия в анализе заключались в том, что кроме оценки пористости и распределения пор по размерам, дополнительно оценивалась доля от открытой пористости пустых пор и пор, заполненных пропиткой.

Для детальной визуализации пустотного пространства в исследуемых образцах дополнительно были произведены расчеты пористости и оценки их размеров с последующей 3D визуализацией.

#### *Анализ данных*

Для проверки статистической значимости результатов исследований использовали VASSARSTAT (<http://vassarstats.net/anova1u.html>) для выполнения однофакторного дисперсионного анализа. Все данные выражены в средних значениях  $\pm(CO) SE$  (стандартное отклонение). Статистическая значимость определялась по сравнению с непропитанной древесиной при  $p < 0,05$ .

#### **Результаты**

На полученных изображениях (рис. 2, А) отчетливо видны анатомические структуры древесины, свободные для потенциального заполнения пропиточным составом: сосуды, трахеиды, сердцевинные лучи, переход годичного слоя, либриформ. Более мелкие морфологические структуры менее выражены в связи с ограниченной разрешающей способностью томографа. На изображениях древесины (рис. 2, В), пропитанной композицией, присутствуют менее темные участки, идентифицируемые как пропиточная композиция (отмечено цифрой 3 на рис. 2, В). Эти участки свидетельствуют о том, что пропиточная композиция эффективно заполняет доступные анатомические структуры древесины. На полученных изображениях пропитанной древесины присутствуют и не заполненные пропиточной композицией поры (отмечено цифрой 1 на рис. 2, В). Однако их количество невелико, что указывает на высокую степень проникновения пропиточной композиции в древесину.

Эти наблюдения позволяют сделать вывод о том, что пропиточная композиция эффективно заполняет доступные анатомические структуры древесины, обеспечивая равномерное распределение состава и минимизируя количество незаполненных пор. Это, в свою очередь, способствует улучшению физико-механических свойств древесины и повышению ее устойчивости к внешним воздействиям.

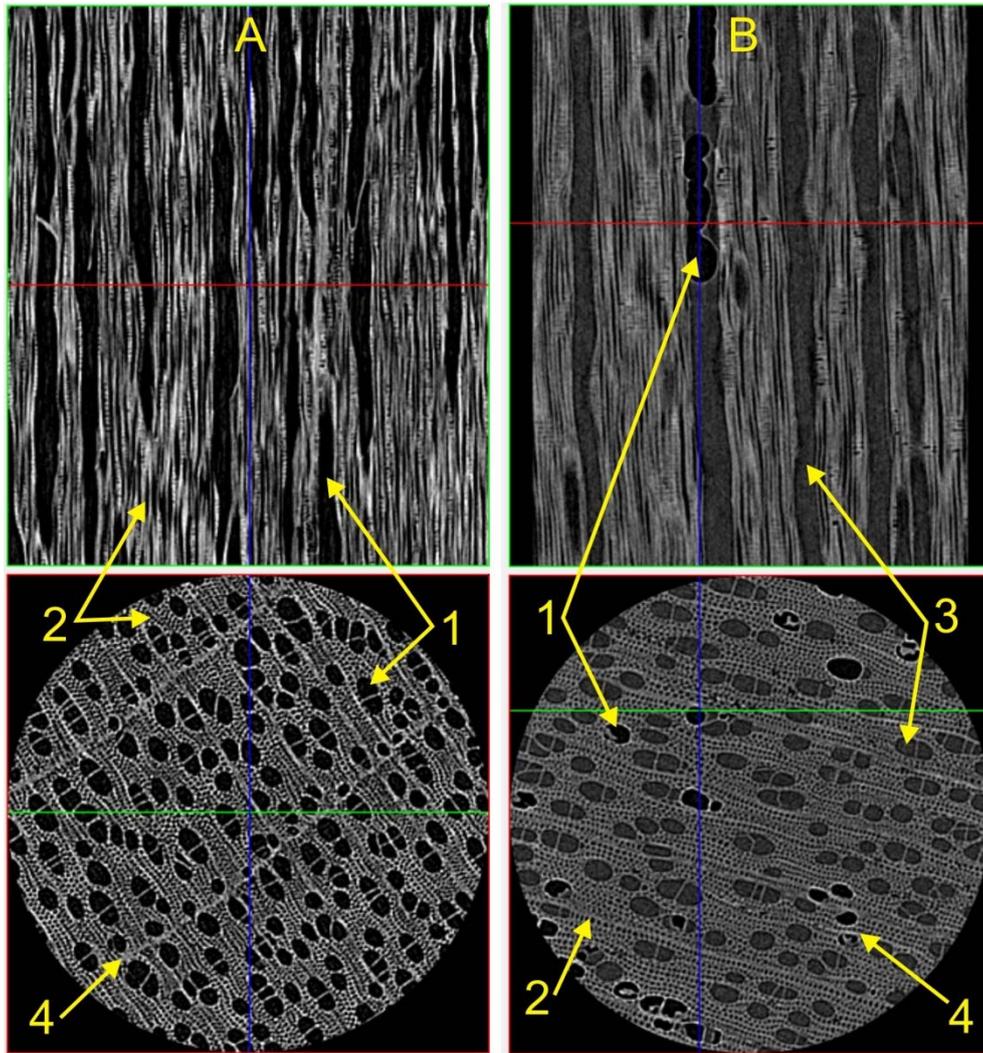


Рисунок 2. Цифровые продольный и поперечный срезы образцов: А – древесина до пропитки, В – древесина, обработанная пропиточной композицией. 1 – анатомические структуры древесины, не заполненные пропиточной композицией; 2 – трахеиды; 3 – заполненные пропиткой анатомические пустоты; 4 – граница перехода годичного слоя

Figure 2. Digital longitudinal and cross-sections of samples: A – wood before impregnation, B – wood treated with impregnation composition. 1 – anatomical structures of wood not filled with impregnation composition; 2 – tracheids; 3 – anatomical voids filled with impregnation; 4 – boundary of transition of annual layer

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' calculations

Для количественной оценки изменения пористости древесины и степени заполняемости пор и пустот в процессе пропитки были построены диаграммы их распределения по размерам до и после

пропитки древесины, которые представлены на рис. 3.

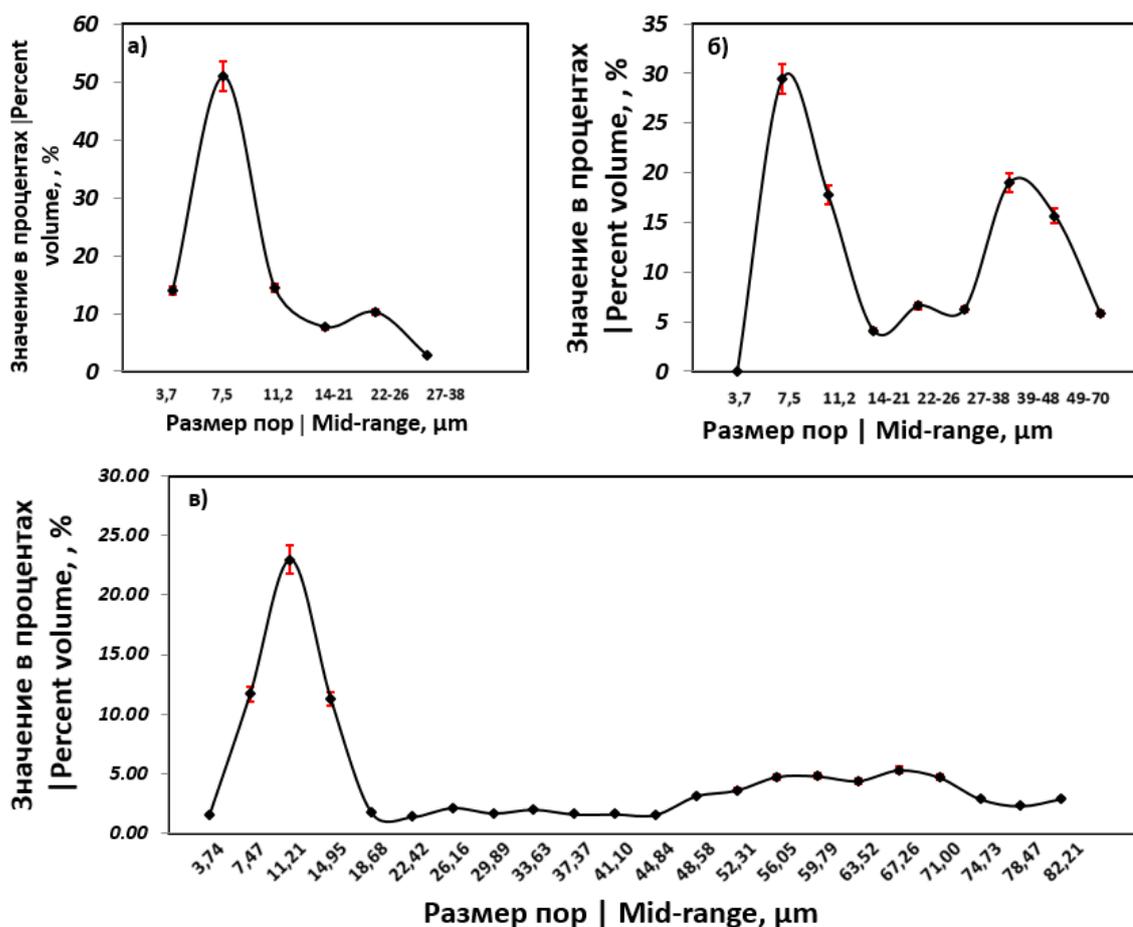


Рисунок 3. Распределение пор по размерам до и после пропитки древесины: а – незаполненных пор, составляющие от общей пористости образца 26,9%, б – поры, заполненные пропиточной композицией, составляющие от общей пористости образца 75,1%, в – распределение пор по размерам древесины до пропитки (общая пористость 42,96%). Алгоритм с удалением черных точек

Figure 3. Distribution of pore sizes before and after wood impregnation: а – unfilled pores, making up 26.9% of the total porosity of the sample, б – pores filled with the impregnating composition, making up 75.1% of the total porosity of the sample, в – distribution of pores by wood sizes before impregnation (total porosity 42.96%). Algorithm with removal of black dots

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' calculations

Общая пористость образца древесины, использованного для исследования составляла 42,96%, что согласуется с литературными данными по определению данного показателя (Sun H. et al. [17]). Наибольшее количество пор в процентном соотношении от общего объема было размером от 7 до 14 микрометров, что соответствует расстоянию между основным структурным компонентами клеточной стенки (сосуды, трахеиды, либриформ). После пропитки древесины по данным микрорентгеновской томографии процент заполненных пор составлял

75,1% (рис. 3, б), объем оставшихся пустотных пространств в древесине не заполненных пропиточной композицией составил 26,9%. В сумме общий объем пор составил более 100%, что связано со специфической оценки пористости древесины. При задании границ рентген-плотности для удаления черных точек – объекты анализа становятся, в том числе, поры, частично заполненные пропиткой, либо наоборот частично незаполненные, в результате процент заполненных и незаполненных пор от общей пористости

получается выше 100% (Galkin S. V. et al. [18]). Точная сегментация пор, заполненных пропиткой и пустых по отдельности затруднена – поэтому результаты могут нести в себе некоторые погрешности. В процессе пропитки древесины заполняются поры разного размерного диапазона от 3 до 70 мкм, что говорит о высокой проникающей способности пропиточной композиции в структуры древесины.

Для более наглядного и точного понимания структурных особенностей древесины и распределения пропиточной композиции были проведены построения 3D моделей пустотного пространства образца древесины, а также визуализации распределения пропиточной композиции по анатомическим и структурным компонентам древесины (рис. 4).

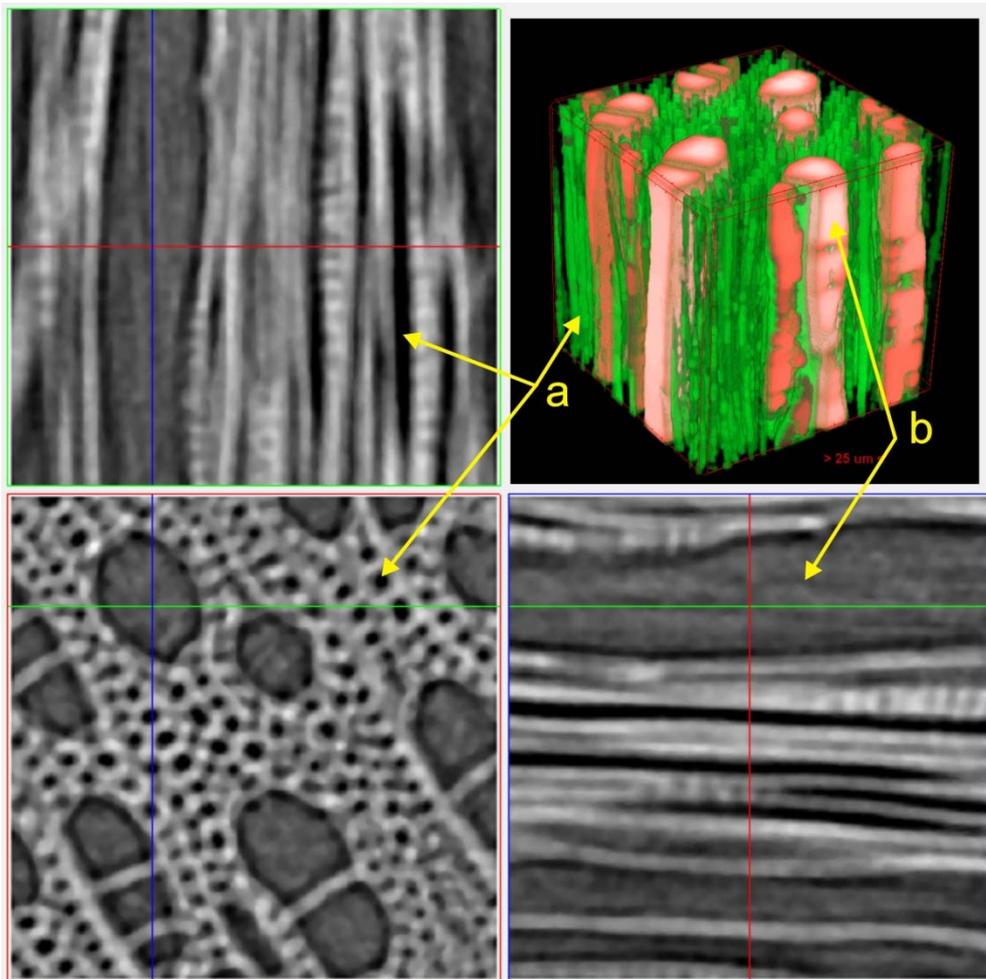


Рисунок 4. Три плоскости поперечного сечения и 3D модель структуры пустотного пространства образца без пропитки с сегментацией пор на сосуды, трахеиды, либриформ. а – трахеиды, либриформ, мелкие сосуды, б – крупные сосуды

Figure 4. Three planes of cross-section and 3D model of the void structure of the sample without impregnation with segmentation of pores into vessels, tracheids, libriforms. a – tracheids, libriforms, small vessels, b – large vessels

### Обсуждение

Естественная потеря древесиной своих механических свойств требует разработки новых технологий и процессов для повышения эффективности

её использования и продления срока службы ресурса. Для этого могут быть применены активные модификации, т. е. изменение химической природы древесины, или пассивные методы, т. е. изменение свойств древесины, но не её химической структуры.

Модификация древесины различными пропиточными жидкостями значительно улучшает механические свойства поверхности и стабильность размеров древесины. Особенно эффективна пропитка для древесины твёрдых пород благодаря наличию в их анатомической структуре сосудов, которые служат транспортными элементами и позволяют мономерам проникать внутрь древесины. Например, метилметакрилат успешно пропитывает различные породы древесины благодаря своему небольшому размеру молекул и низкой вязкости, что позволяет ему проникать через стенки клеток древесины и заполнять полости сосудов. После проникновения мономеры полимеризуются на месте внутри сосудов, повышая твёрдость древесины. Однако большинство применяемых процессов пропитки предполагают полное погружение образцов в раствор (процесс Беттла) и являются трудоёмкими и дорогостоящими из-за высокой химической нагрузки. Поэтому их можно считать экономически неэффективными с точки зрения количества используемых материалов, потребляемой энергии и продолжительности процесса. Предыдущие исследования показали, что пропитка мономером поверхности древесины твёрдых пород с использованием короткого периода вакуумирования была успешной и могла решить эти проблемы. Согласно литературным источникам, вязкость жидкости ( $\mu$ ), поверхностная температура древесины ( $T$ ), уровень вакуума в процессе, а также время проникновения жидкости после отключения вакуума, или время абсорбции ( $AT$ ), являются важными факторами, влияющими на эффективность проникновения мономера. Однако существовала проблема невозможности контроля качества пропитки древесины.

Проницаемость жидкости через любую пористую среду напрямую связана с реологическими свойствами жидкости и перепадом давления, создающим поток. Первый фактор представляет собой силы сопротивления движению жидкости через поры. Применение вакуумного давления в системе пропитки расширяет воздух, находящийся внутри древесных сосудов, и вытесняет часть воздуха из древесины. Это также создает разницу в давлении между внешней жидкостью и порами древесины при возвращении системы к атмосферному давлению.

Изменение температуры древесины без изменения её химической структуры приводит к значительным изменениям физических свойств из-за потери воды или летучих экстрактивных веществ. Эти изменения могут повлиять на поглощение мономера. Ожидается, что повышение уровня вакуума увеличит количество воздуха, удаляемого из пор образца. Это создаст пустоту, которая может быть заполнена мономерами после возвращения системы к атмосферному давлению. Время впитывания рассматривается как период, в течение которого древесина пропитывается жидкостью для пропитки; следовательно, оно напрямую связано с капиллярными эффектами. Ожидается, что более длительное время впитывания приведёт к большему поглощению мономера до достижения равновесия.

Рентгеновская микрокомпьютерная томография, надежный и неразрушающий метод оценки внутренней микроструктуры древесины. Данный метод первоначально использовался для обнаружения и локализации внутренних дефектов в бревнах (Shi J. et al. [19]). С непрерывным совершенствованием технологии она получила более широкое распространение, например, для проверки плотности и влажности (Martin B. et al. [20]), для изучения развития ксилемы (R. Lehnebach, [21]), распределения текстуры волокон в местах соединения ветвей и стеблей (Hu M. et al. [22]). Кроме того, микрорентгеновская томография была использована для изучения микроструктуры и свойств ацетилированной древесины (Toumpanaki E., Shah D. U., Eichhorn S. J. [23]) и древесины, пропитанной смолой на основе фурфуролилового спирта.

Микротомография основана на ослаблении рентгеновских лучей при их прохождении через плотный материал. Таким образом, можно назначить различные фазы плотности с помощью уровней шкалы серого и восстановить изображение исходного материала, обработанного пропиточной композицией.

Анатомическая ориентация структур древесины значительно влияет на процесс пропитки древесины (Frias M. et al. [24], Е. В. Томина [25]). На полученных изображениях распределения пропиточной композиции видно, что движение пропиточ-

ного состава происходит по пути наименьшего сопротивления в торцовом направлении вдоль крупных анатомических структур (сосуды, трахеиды). Анизотропная анатомия древесины может оказывать значительное влияние на пропитку и приводить к неравномерному характеру проникновения пропиточной композиции. Возможно, это может привести к образованию неравномерных предпочтительных дорожек или пальцев вдоль толщины образца - в основном для менее вязких составов.

### Заключение

Исследования показали, что метод рентгеновской компьютерной томографии является одним из самых многообещающих новых инструментов для изучения трехмерной структуры и анатомии древесины, а также он играет важную роль в обработке древесины и научных исследованиях. В данном исследовании с точки зрения компьютерной рентгеновской микротомографии были изучены образцы древесины березы ее морфологические особенности пустотного пространства с оценкой открытой пористости, распределения пор по размерам, а также с от-

дельным анализом пустотного пространства с пространственным определением и оценкой размеров пор, заполненных пропиткой. Общая пористость образца древесины составила 42,96%, что согласуется с литературными данными. Наибольшее количество пор в процентном соотношении от общего объема имело размер от 7 до 14 микрометров. После пропитки древесины процент заполненных пор составил 75,1%, а объем оставшихся пустотных пространств - 26,9%. Общий объем пор превысил 100% из-за специфики оценки пористости древесины. Пропиточная композиция проникала в поры размером от 3 до 70 мкм, что свидетельствует о ее высокой проникающей способности.

Также было проведено 3D моделирование древесины без пропитки и с пропиткой с отдельной сегментацией пропиточной композиции в порах. Установлено, что данный метод позволяет с высокой степенью точности оценить степень и глубину пропитки, распределение жидкости по анатомическим структурам древесины, а применение метода сегментации по рентген плотности позволяет повысить точность исследования.

### Список литературы

1. Brunswick P., Cuthbertson D., Yan J. et al. A practical study of CITES wood species identification by untargeted DART/QTOF, GC/QTOF and LC/QTOF together with machine learning processes and statistical analysis. *Environmental Advances*. 2021; 5: 100089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100089>.
2. Deklerck V., Lancaster C., Acker J., Espinoza E., Bulcke J., Beeckman H. Chemical fingerprinting of wood sampled along a pith-to-bark gradient for individual comparison and provenance identification. *Forests*. 2020; 11 (1): 107. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010107>.
3. Shang D., Brunswick P., Yan J. et al. Chemotyping and identification of protected Dalbergiatimber using gas chromatography quadrupole time of flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 2020; 1615: 460775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460775>.
4. Stagno V., Moricca C., Sadori L., Dell'Aglio E., Reale R., Capuani S. Evaluation of the efficacy of micro-Magnetic Resonance Imaging compared with light microscopy to investigate the anatomy of modern and ancient waterlogged wood. *Magnetic Resonance Imaging*. 2023; 102: 164-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2023.06.011>.
5. Frias M., Blanchet P., Bégin-Drolet A., Triquet J., Landry V. Parametric study of a yellow birch surface impregnation process. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021; 79 (4): 897-906. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01700-7>.
6. Duncan K. E., Czymmek K. J., Jiang N., Thies A. C., Topp C. N. X-ray microscopy enables multiscale high-resolution 3D imaging of plant cells, tissues, and organs. *Plant Physiology*. 2022; 188 (2): 831-845. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab405>.

7. Dierickx S., Genbrugge S., Beeckman H., Hubau W., Kibleur P., Van den Bulcke J. Non-destructive wood identification using X-ray  $\mu$ CT scanning: which resolution do we need. *Plant Methods*. 2024; 20 (1): 98. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01216-0>.
8. Rankin K. E., Hazell Z. J., Middlton A. M., Mavrogordato M. N. Micro-focus X-ray CT scanning of two rare wooden objects from the wreck of the London, and its application in heritage science and conservation. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2021; 39: 103158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103158>.
9. Stelzner J., Million S., Stelzner I., Nelle O., Banck-Burgess J. Micro-computed tomography for the identification and characterization of archaeological lime bark. *Scientific Reports*. 2023; 13 (1): 6458. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33633-x>.
10. Koddenberg T., Zauner M., Militz H. Three-dimensional exploration of soft-rot decayed conifer and angiosperm wood by X-ray micro-computed tomography. *Micron*. 2020; 134: 102875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2014.06.003>.
11. Karahara I., Yamauchi D., Uesugi K., Mineyuki Y. Three-dimensional visualization of plant tissues and organs by X-ray micro-computed tomography. *Microscopy*. 2023; 72 (4): 310-325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.04.001>.
12. Apsari A. N., Sudoyo E., Alamsyah E.M., Kobayashi K., Tanaka T. The visualization of low-molecule phenol (LMP) and copper naphthenate on treated wood using X-ray microtomography. *Scientific Reports*. 2022; 12 (1): 2239. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05022-3>.
13. Hwang S. W., Tazuru S., Sugiyama J. Wood identification of historical architecture in Korea by synchrotron X-ray microtomography-based three-dimensional microstructural imaging. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2020; 48 (3): 283-290. DOI: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.3.283>.
14. Ponomarev A., Zalatsky M. D., Nurullina T. S., Kadyrov M. Application of core X-ray microtomography in oilfield geology. *Georesources*. 2021; 23 (4): 34-43. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.4>.
15. Герке К. М., Корост Д. В., Карсанина М. В. и др. Изучение и анализ современных подходов к построению цифровых моделей ядра и методов моделирования многофазной фильтрации в масштабах порового пространства. *Георесурсы*. 2021; 23 (2): 197-213. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.20>.
16. Zhuzhukin K. V., Tomina E. V., Ponomarev A., Skudar D. Improving the Performance Properties of Impregnated Wood with its Subsequent Utilization into a Biochar Sorbent. *Floresta e Ambiente*. 2023; 30 (4): 20230030. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0030>. EDN: XNMDTE.
17. Sun H., Bi H., Ren Z., Zhou X. Hydrostable reconstructed wood with transparency, Excellent ultraviolet-blocking performance, and photothermal conversion ability. *Composites Part B: Engineering*. 2022; 232: 109615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109615>.
18. Galkin S. V., Martyushev D., Osovetsky B., Kazymov K. P. Evaluation of void space of complicated potentially oil-bearing carbonate formation using X-ray tomography and electron microscopy methods. *Energy Reports*. 2022; 8: 6245-6257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.070>.
19. Shi J., Liu X., Xia C., Leng W. Visualization of wood cell structure during cellulose purification via high resolution X-ray CT and spectroscopy. *Industrial Crops and Products*. 2022; 189: 115869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115869>.
20. Martin B., Colin J., Lu P., Mahamadou M. Monitoring imbibition dynamics at tissue level in Norway spruce using X-ray imaging. *Holzforschung*. 2021; 75 (12): 1081-1096. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0269>.
21. Lehnebach R., Campioli M., Gricar J., Prislán P. High-Resolution X-Ray Computed Tomography: A New Workflow for the Analysis of Xylogenesis and Intra-Seasonal Wood Biomass Production. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 12 (APR): 698640. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698640>. EDN: SDWCOK.
22. Hu M., Olsson A., Hall S. A., Seifert T. Fibre directions at a branch-stem junction in Norway spruce: a microscale investigation using X-ray computed tomography. *Wood Science and Technology*. 2022; 56 (1): 147-169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01353-y>.

23. Toumpanaki E., Shah D. U., Eichhorn S. J. Beyond what meets the eye: Imaging and imagining wood mechanical–structural properties. *Advanced Materials*. 2021; 33 (28): 2001613. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202001613>.

24. Frias M., Blanchet P., Bégin-Drolet A., Triquet J. Parametric study of a yellow birch surface impregnation process. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021; 79 (4): 897-906. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01700-7>.

25. Томина Е. В., Дмитренко А. И., Нгуен Ань Тьен, Жужукин К. В., Ходосова Н.А. Гидрофобизация древесины *Betula pendula* Roth и *Pinus sylvestris* L. отработанным растительным маслом и возможности ее утилизации в биоугольный сорбент для ионов меди. *Лесотехнический журнал*. 2024; 14 (1(53)): 190-202. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/11>. EDN: NMCOPY.

### References

1. Brunswick P., Cuthbertson D., Yan J. et al. A practical study of CITES wood species identification by untargeted DART/QTOF, GC/QTOF and LC/QTOF together with machine learning processes and statistical analysis. *Environmental Advances*. 2021; 5: 100089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100089>.

2. Deklerck V., Lancaster C., Acker J., Espinoza E., Bulcke J., Beeckman H. Chemical fingerprinting of wood sampled along a pith-to-bark gradient for individual comparison and provenance identification. *Forests*. 2020; 11: 1: 107. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010107>.

3. Shang D., Brunswick P., Yan J. et al. Chemotyping and identification of protected Dalbergiatimber using gas chromatography quadrupole time of flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 2020; 1615: 460775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460775>.

4. Stagno V., Moricca C., Sadori L., Dell'Aglio E., Reale R., Capuani S. Evaluation of the efficacy of micro-Magnetic Resonance Imaging compared with light microscopy to investigate the anatomy of modern and ancient waterlogged wood. *Magnetic Resonance Imaging*. 2023; 102: 164-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mri.2023.06.011>.

5. Frias M., Blanchet P., Bégin-Drolet A., Triquet J., Landry V. Parametric study of a yellow birch surface impregnation process. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021; 79 (4): 897-906. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01700-7>.

6. Duncan K. E., Czymmek K. J., Jiang N., Thies A. C., Topp C. X-ray microscopy enables multiscale high-resolution 3D imaging of plant cells, tissues, and organs. *Plant Physiology*. 2022; 188 (2): 831-845. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab405>.

7. Dierickx S., Genbrugge S., Beeckman H., Hubau W., Kibleur P., Van den Bulcke J. Non-destructive wood identification using X-ray  $\mu$ CT scanning: which resolution do we need. *Plant Methods*. 2024; 20 (1): 98. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01216-0>.

8. Rankin K. E., Hazell Z. J., Middlton A. M., Mavrogordato M. N. Micro-focus X-ray CT scanning of two rare wooden objects from the wreck of the London, and its application in heritage science and conservation. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2021; 39: 103158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103158>.

9. Stelzner J., Million S., Stelzner I, Nelle O., Banck-Burgess J. Micro-computed tomography for the identification and characterization of archaeological lime bark. *Scientific Reports*. 2023; 13 (1): 6458. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33633-x>.

10. Koddenberg T., Zauner M., Militz H. Three-dimensional exploration of soft-rot decayed conifer and angiosperm wood by X-ray micro-computed tomography. *Micron*. 2020; 134: 102875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2014.06.003>.

11. Karahara I., Yamauchi D., Uesugi K., Mineyuki Y. Three-dimensional visualization of plant tissues and organs by X-ray micro-computed tomography. *Microscopy*. 2023; 72 (4): 310-325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.04.001>.

12. Apsari A. N., Sudoyo E., Alamsyah E.M., Kobayashi K., Tanaka T. The visualization of low-molecule phenol (LMP) and copper naphthenate on treated wood using X-ray microtomography. *Scientific Reports*. 2022; 12 (1): 2239. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05022-3>.
13. Hwang S. W., Tazuru S., Sugiyama J. Wood identification of historical architecture in Korea by synchrotron X-ray microtomography-based three-dimensional microstructural imaging. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2020; 48 (3): 283-290. DOI: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.3.283>.
14. Ponomarev A., Zalatsky M. D., Nurullina T. S., Kadyrov M. Application of core X-ray microtomography in oilfield geology. *Georesources*. 2021; 23 (4): 34-43. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.4>.
15. Gerke K.M., Korost D. V., Karsanina M. V. et al. Izuchenie i analiz sovremenny`x podxodov k postroeniyu cifrovyy`x modelej kerna i metodov modelirovaniya mnogofaznoj fil`tracii v masshtabax porovogo prostranstva [The study and analysis of modern approaches to the construction of digital core models and methods for modeling multiphase filtration on the scale of pore space]. *Geosursy`*. 2021; 23 (2): 197-213. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.20>.
16. Zhuzhukin K. V., Tomina E. V., Ponomarev A., Skudar D. Improving the Performance Properties of Impregnated Wood with its Subsequent Utilization into a Biochar Sorbent. *Floresta e Ambiente*. 2023; 30 (4): 20230030. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0030>. EDN: XNMDTE.
17. Sun H., Bi H., Ren Z., Zhou X. Hydrostable reconstructed wood with transparency, Excellent ultraviolet-blocking performance, and photothermal conversion ability. *Composites Part B: Engineering*. 2022; 232: 109615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109615>.
18. Galkin S. V., Martyshev D., Osovetsky B., Kazymov K. P. Evaluation of void space of complicated potentially oil-bearing carbonate formation using X-ray tomography and electron microscopy methods. *Energy Reports*. 2022; 8: 6245-6257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.070>.
19. Shi J., Liu X., Xia C., Leng W. Visualization of wood cell structure during cellulose purification via high resolution X-ray CT and spectroscopy. *Industrial Crops and Products*. 2022; 189: 115869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115869>.
20. Martin B., Colin J., Lu P., Mahamadou M. Monitoring imbibition dynamics at tissue level in Norway spruce using X-ray imaging. *Holzforschung*. 2021; 75 (12): 1081-1096. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0269>.
21. Lehnebach R., Campioli M., Gricar J., Prislán P. High-Resolution X-Ray Computed Tomography: A New Workflow for the Analysis of Xylogenesis and Intra-Seasonal Wood Biomass Production. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 12 (APR): 698640. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698640>. EDN: SDWCOK.
22. Hu M., Olsson A., Hall S. A., Seifert T. Fibre directions at a branch-stem junction in Norway spruce: a microscale investigation using X-ray computed tomography. *Wood Science and Technology*. 2022; 56 (1): 147-169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01353-y>.
23. Toumpanaki E., Shah D. U., Eichhorn S. J. Beyond what meets the eye: Imaging and imagining wood mechanical–structural properties. *Advanced Materials*. 2021; 33 (28): 2001613. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202001613>.
24. Frias M., Blanchet P., Begin-Drolet A., Triquet J. Parametric study of a yellow birch surface impregnation process //European Journal of Wood and Wood Products. 2021; 79 (4): 897-906. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01700-7>.
25. Tomina E. V., Dmitrenkov A. I., Nguen An`T`en, Zhuzhukin K. V., Xodosova N.A. Gidrofobizaciya drevesiny` *Betula pendula* Roth i *Pinus sylvestris* L. otrabotanny`m rastitel`ny`m maslom i vozmozhnosti ee utilizacii v biougol`ny`j sorbent dlya ionov medi [Hydrophobization of *Betula pendula* Roth and *Pinus sylvestris* L. wood with used vegetable oil and the possibility of its utilization into a biocarbon sorbent for copper ions]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2024; 14 (1(53)): 190-202. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/11>. EDN: NMCOPY.

### Сведения об авторах

*Томина Елена Викторовна* – доктор химических наук, зав. кафедрой химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

*Жужукин Константин Викторович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

*Дмитренков Александр Иванович* – кандидат технических наук, доц. кафедры химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: dmitrenkov2109@mail.ru.

*Нгуен Ань Тьен* – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой неорганической химии, Педагогический университет Хошимина, ул. Ан Зьонг-Вьонг, 280, округ 4, район 5, Хошимин, Вьетнам; e-mail: tienna@hcmue.edu.vn. ORCID iD: 0000-0002-4396-0349.

*Соловьева Анна Алексеевна* – преподаватель кафедры материаловедения и индустрии наносистем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация, e-mail: annasolo1990@mail.ru.

*Дорошенко Алена Владимировна* – преподаватель кафедры химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: al.doroschenko2016@yandex.ru.

*Корчагина Анна Юрьевна* – преподаватель кафедры химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: nuta01011@yandex.ru.

*Новикова Людмила Анатольевна* – кандидат химических наук, доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: yonk@yandex.ru.

### Information about the authors

*Elena V. Tomina* – Doctor of Chemical Sciences, Head of the Chemistry Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

*Konstantin V. Zhuzhukin* – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Chemistry Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: kinkon18@yandex.ru.

*Alexander I. Dmitrenkov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chemistry Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: dmitrenkov2109@mail.ru.

*Nguyen Anh Tien* – Ph.D. Chem. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Inorganic Chemistry, Ho Chi Minh City Pedagogical University, st. 280 An Duong Vuong, Ward 4, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam; e-mail: tienna@hcmue.edu.vn. ORCID iD: 0000-0002-4396-0349.

*Anna A. Solovieva* – Lecturer, Department of Materials Science and Nanosystems Industry, Voronezh State University, 1, University Square, Voronezh, 394018, Russian Federation, e-mail: annasolo1990@mail.ru.

*Alena V. Doroshenko* – Lecturer, Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: al.doroschenko2016@yandex.ru.

*Anna Yu. Korchagina* – lecturer of the Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: nuta01011@yandex.ru.

*Lyudmila A. Novikova* – PhD, Associate Professor of the Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: yonk@yandex.ru.