

# Техническая информация

DOI: 10.32864/polymmattech-2023-9-1-64-70

УДК 544.23:678

## ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

М. А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ<sup>+</sup>, С. В. НЕСТЕРОВА

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Беларусь

*Быстрое и надежное распознавание древесных пород имеет большое практическое значение, оказывая потенциальное воздействие на целый ряд областей, включая предполагаемое применение, безопасность строительства, а также выявление незаконных вырубок ценной древесины, контрабанду древесных пород, находящихся под угрозой исчезновения.*

*Цель работы — оценка физических (спектральных, цветометрических, термических) методов для идентификации древесины.*

*Рассмотрена возможность использования физических методов анализа для идентификации природных растительных материалов. Необходимость применения такого подхода обусловлена трудоемкостью и неоднозначностью результатов визуального (органолептического) анализа, опирающегося на вербальное описание признаков пород. В качестве основных методов анализа рассмотрены: спектры отражения, томография, цветометрия, качественная флуоресценция. Анализ предложенных подходов показывает, что использование физических методов спектрального анализа пока не получило широкого развития. Не самая высокая эффективность таких исследований сопряжена с отсутствием проверки робастности предложенных методов и трудностью создания полноценной базы данных.*

**Ключевые слова:** идентификация, древесные породы, спектральный анализ, цветометрия, флуоресценция.

## FEATURES OF IDENTIFICATION OF NATURAL PLANT POLYMERS BY PHYSICAL METHODS

M. A. ZILBERGLEIT<sup>+</sup>, S. V. NESTEROVA

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

*Rapid and reliable identification of natural plant materials is of great practical importance, with potential impact on a number of areas, including intended use, construction safety, as well as the detection of illegal logging of valuable timber, smuggling of endangered timber.*

*The purpose of the work is to evaluate physical (spectral, colorimetric, thermal) methods for the identification of wood.*

*The possibility of using physical methods of analysis for the identification of natural plant materials is considered. The necessity of using such methods is conditioned by the labor intensity and ambiguity of the results of the visual analysis of the tested wood species. As the main methods of analysis, the following are considered: reflection spectra, tomography, color measurement, quality fluorescence. The analysis of the proposed approaches shows that the use of physical methods of spectral analysis has not yet received wide development. Not the highest efficiency of these methods is associated with the absence of verification of the robustness of the proposed approaches and the difficulty of creating a full-fledged database.*

**Keywords:** identification, wood species, spectral analysis, colorimetry, fluorescence.

<sup>+</sup>Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: mazi@list.ru

## Введение

Широко известный и используемый природный растительный материал — древесина обладает своими специфическими физическими, эстетическими свойствами, поэтому корректная идентификация древесных пород требуется в многочисленных практических приложениях, начиная со строительной промышленности, производства, проектирования и реставрации мебели и заканчивая оценкой стоимости на деревянные изделия. Поэтому быстрое, надежное и практическое распознавание древесных пород имеет большое значение, оказывая потенциальное воздействие на целый ряд областей, включая предполагаемое применение, безопасность строительства, а также выявление незаконных вырубок видов и контрабанду древесных пород, находящихся под угрозой исчезновения. Достоверная идентификация древесины может оказаться решающей при получении целлюлозы, ее отбелке, подготовке к химической переработке.

Вопросы идентификации пород древесины до сих пор являются недостаточно изученными. Это относится как к числу публикаций, затрагивающих рассматриваемую проблему, так и к аппаратной базе. Так, например, использование поисковой системы *ScienceDirect.com* и ключевых слов «wood», «digital-image» показало, что с 1986 по 2001 годы количество публикаций составило 7 наименований, с 2006 года по настоящее время 130, т. е. за последнее время в среднем 10 публикаций в год. Наиболее часто такие исследования публиковались в журнале «Construction and Building Materials», с импакт фактором 4.046 за 2018 год.

Следует также отметить, что число патентов по заявленной проблеме не превышает 10 наименований.

Деревья и кустарники, произрастающие в разных климатических условиях, на разных почвах, выращены из неодинакового посадочного материала, получают разное корневое питание, и, следовательно, древесина имеет значительный разброс свойств, по которым ее принято идентифицировать.

Визуального контроля и опыта контролирующего органа не всегда достаточно для правильного определения породы древесины. Традиционный метод распознавания древесных пород заключается в ручном просмотре цифровых каталогов древесного шпона и вынесении субъективного суждения. Обычно исследуют текстуру, резкость перехода от ядра к заболони, твердость, наличие ядра, цвет, блеск, группировку и характеристику сосудов и смоляных ходов, объемную усушку, вид коры и иные морфологические признаки [1, 2]. Например, ключ для определения древесины лиственных двудольных пород включает 95 диагностических признаков (ключей) [1]. Диагностические признаки представлены как вербальными, так и количественными переменными. При этом надежность этих методов основана на личном опыте разработчиков, и работы, в которых имеется статистическая проверка диагностики, нам не встречались.

Таким образом, использование для качественного анализа продолжительных и довольно дорогих микроскопических, химических и физико-механических методов исследования не всегда приводит к однозначным ответам на поставленные вопросы. Например, химические методы, с помощью которых анализируют лигнин и пентозаны, позволяют лишь разделить лиственные и хвойные породы [3]. Необходимость экспресс-методов при экспорте древесины, например, на таможне или при импорте целлюлозных (вискозных) волокон является определяющей.

**Цель работы** — оценка физических (спектральных, цветометрических, термических) методов для идентификации древесины.

## Результаты и их обсуждение

В настоящей статье дана попытка представить и оценить физические (спектроскопические) методы, которые возможно использовать для решения задачи по идентификации древесных пород.

Несмотря на то, что математические методы обработки многомерных данных развиты уже достаточно широко, число работ, посвященных использованию аппаратных методов физического контроля для идентификации растительного сырья и продуктов его переработки методами спектрального, хроматографического и цветометрического анализа, относительно невелико. Вне всякого сомнения, причины этого явления связаны с отбором достоверных дескрипторов, а также с большими затратами по созданию полных баз данных.

Наиболее интересные сообщения, в которых упоминается использование портативного прибора для определения древесных пород, приведено в источниках [4, 5]. На основании исследований авторов была разработана и введена в эксплуатацию серия приборов типа «Кедр» и «Кедр М» (рис. 1). Прибор изготавливает ООО «Инновационная техника и технологии» (Россия) специально для таможенных органов. Он внесен в Госреестр средств измерений и принят на снабжение таможенных органов Российской Федерации приказом ФТС № 88 от 17 января 2011 г.

Спектральный анализ базируется на использовании длин волн в интервале 300–900 нм. В ходе анализа учитывают температурную коррекцию. Достоверительный интервал этого метода достаточно широк, а приводимые авторами спектры различных пород древесины в интервале некоторых длин волн иногда перекрываются [6] (рис. 2).

Известно, что некоторые, особенно редкие породы древесины под воздействием ультрафиолета люминесцируют [7, 8]. В цитируемом сообщении [7] показано, что неудача с применением прибора «Кедр» при анализе двух пород древесины — красного дерева и венге — может быть решена с использованием спектров флуоресценции. Цитируемый сайт [8] приводит ряд спектров флуоресценции, а также методику проведения исследований.



Рисунок 1 — Прибор для идентификации древесины «Кедр-М»  
Fig. 1 — Wood identification device “Kedr-M”

В [9–12] описаны проведенные исследования возможности идентификации древесины разных пород и сортов с использованием компьютерной томографии, позволяющей определить как внешнее, так и внутреннее состояние исходных лесоматериалов.

Для сканирования использовали медицинский компьютерный томограф типа «Bright Speed Excel by GE Healthcare» («General Electric», США). В результате получили фотоснимки с разрешением 512×512 пикселей, где каждому скану соответствует плоскость древесины толщиной от 0,65 мм до 10 мм. Стандартная процедура присваивает каждому пикселю изображения уровень градации серого цвета в соответствии с линейным коэффициентом ослабления исследуемого материала. Затем происходит преобразование в значение плотности исследуемого образца. Обработку результатов, полученных при помощи снимков компьютерной томографии, осуществляли широко используемой программой *ImageJ*, позволяющей оценить геометрические параметры бревен, плотность сучков, а также ряд других макроскопических признаков. В результате обработки получили ряд графических 3D-моделей в программе *Bil3D* (разработчик — *Frederic Mothe*). Примеры 3D-моделей бревен для различных пород приведены на рис. 3.

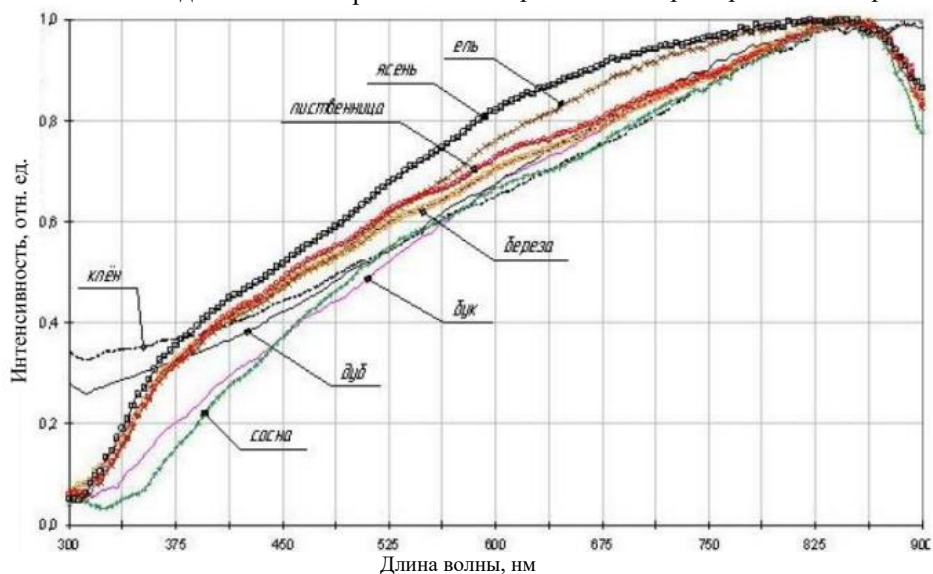


Рисунок 2 — Спектры диффузионного отражения различных пород древесины [6]  
Fig. 2 — Spectra of diffusion reflection of various wood species [6]

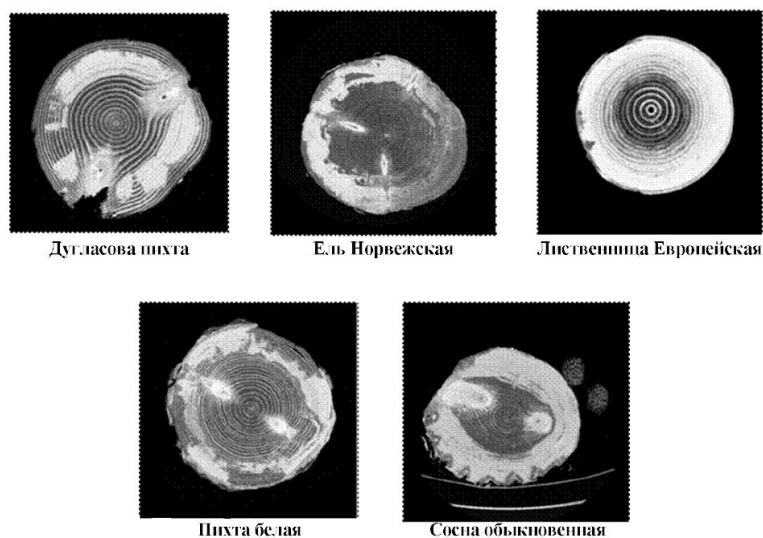


Рисунок 3 — Примеры снимков компьютерной томографии для исследуемых пород [9]  
Fig. 3 — Examples of computed tomography images for the studied rocks [9]

Одним из эффективных методов идентификации, судя по литературным данным, является метод пиролизической газожидкостной хроматографии. В отчете по НИР «Разработать и внедрить технологию производства бумаги документной на комбинированной БДМ» (разработчик — «Белорусский государственный технологический университет»), выполненной по заказу УП «Бумажная фабрика» Гознака (г. Борисов, Беларусь), была показана возможность достаточно эффективного использования такого подхода. Этот же прием использовали разработчики для распознавания качества льна. Для исследования использовали пиролизическую ячейку, присоединенную к хроматографу «ЛХМ-7а» (Московский опытный завод «Хроматограф», СССР).

В дальнейшем был предложен подход, который не требует создания специальной аппаратуры (можно ограничиться фотоснимком или сканом образца) [13]. Он заключается в использовании графического файла исследуемого объекта и стандартной системы цветиметрии. Сущность метода заключается в обработке цветного изображения в традиционных цветовых системах (*RGB*, *CMYK*, *Lab*, *HSB*) и применении программы распознавания образов для идентификации исследуемого объекта. Было создано решающее правило, которое позволяет на основании собранной базы данных идентифицировать «спорную» породу древесины. В качестве решающего правила можно использовать разные подходы. В частности, авторы использовали так называемые линейные классификационные функции и вариант кластерного анализа, известный как метод «трех ближайших соседей». Объектами исследования служили ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) Karst.) и туя западная (*Thuja occidentalis* L.). Съемки ствола осуществляли в дневное время на высоте примерно 1,5 м камерой с небольшим разрешением матрицы в 8 мегапикселей. Обработку фотографий проводили при поддержке *Adobe Photoshop CC* (изображения усредняли) и описывали в цветовых системах *CMYK*, *RGB*, *HSB*, *Lab*. Объем обучающей выборки: туя западная — 28 образцов; ель обыкновенная — 25 образцов. Мера близости в кластерном анализе — расстояние Ев-

клида (предварительно стандартизированные переменные). Исследования проводили последовательно в два этапа: наряду с применением цветиметрических характеристик *CMYK*, *RGB*, *HSB*, *Lab* дополнительно использовали ещё одним признаком — число цветов в каждом образце. В итоге показали, что правильно удается распознать 92–96% объектов. Такой результат достигли за счет добавления упомянутого ранее дополнительного признака. Авторы отмечают, что одинаковые результаты получили в случае применения в качестве решающего правила метода линейного дискриминантного анализа и алгоритма «трех ближайших соседей». При этом полагали, что использование методов распознавания, которые основаны на разных исходных предположениях, повышает уровень доверия к полученным результатам.

В [14–16] приведен пример использования спектров КР и ИК для идентификации хвойных пород древесины (рис. 4). Использование метода главных компонент позволило достаточно удачно провести разделение для пяти хвойных пород [14].

В [17, 18] описана технология, которая вычисляет расширенные многоспектральные марковские текстурные характеристики и находит из своей базы данных наиболее похожие породы древесины. В приведенной работе утверждают, что марковские особенности не только очень эффективны при осуществлении свертки факторного пространства и представления визуальных свойств древесины, но и инвариантны к цвету освещения и устойчивы к неоднородности и направлению освещения. Практическая проверка, проведенная на образцах шестидесяти образцов древесины, показала степень распознавания 81%. Для такого количества образцов результат следует признать удовлетворительным.

Достаточно удачное решение по идентификации древесины представлено в [19]. За основу метода принимали дескрипторы на базе многомерного текстурного анализа. Результаты анализа 4200 изображений древесины с поперечного, радиального и тангенциального сечений для двенадцати пород,

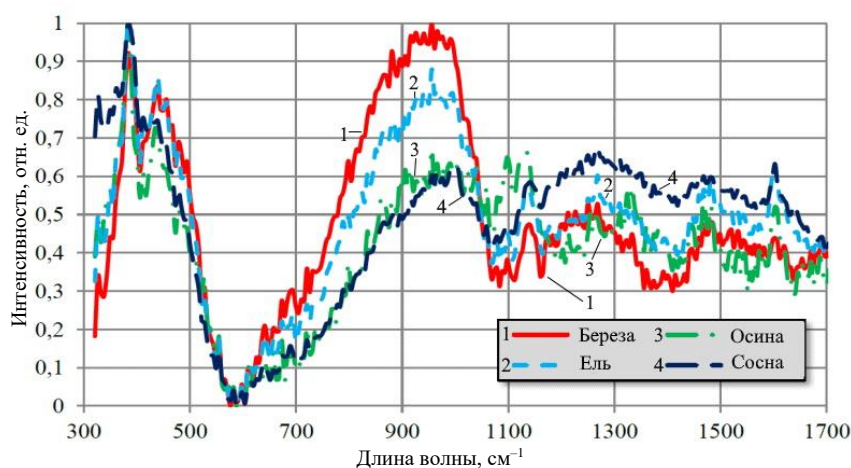


Рисунок 4 — КР-спектр древесины [14]  
Fig. 4 — KR spectrum of wood [14]



существующих на территории Греции, позволили добиться 91,47% правильной идентификации классифицируемых объектов.

Подход, который, скорее всего, следует отнести к исследованию текстуры, предложен в [20]. В качестве дескрипторов использовали три первых момента распределения RGB. Пять образцов древесины — *A. nephrolepis*, *P. koraiensis*, *P. koraiensis*, *P. jezoensis*, *F. mandshurica* в количестве 200 единиц (100 на обучение, 100 на тестирование) показали, что степень распознавания для таких дескрипторов колеблется от 83% до 93%.

Группа исследователей [21], используя подход, основанный на анализе таких показателей, как интенсивность (шкала серых эталонов), контрастность, энтропия, однородность при изучении 50 образцов *Campnosperma auriculatum* (*tr*), *Dyera costulata* (*je*), *Durio lowianus* (*durian*), *Kokoona littoralis* (*mu*), *Anisoptera costata* с применением нейронной сети не смогла добиться результата выше 72%. Однако их результат ценен тем, что, исследовав влияние угла расположения образца относительно камеры, они установили, что, скорее всего, положение образца при определенных условиях незначимо.

Аппаратурное сопровождение поставленной проблемы достаточно проблематично. Так наряду с упоминавшимся ранее российским прибором «Кедр», в литературе приводятся крайне скудные данные по разработкам немецкой фирмы «Rinntech» («Lintab» (рис. 5), «Lignostation», «Resistograph® R650-SC»). Результаты, получаемые с помощью данной аппаратуры, основываются на исследовании дендрохронологических особенностей деревьев (чередование узких и широких колец) [22].

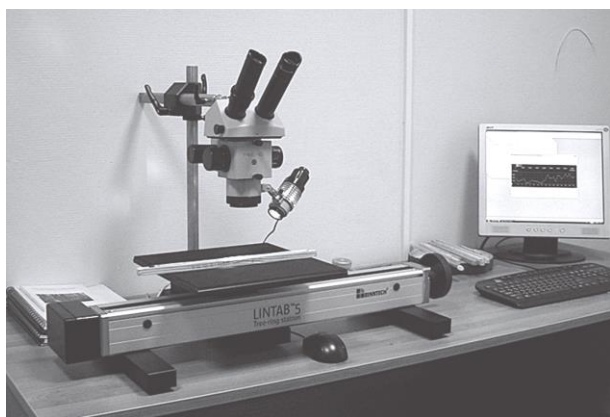


Рисунок 5 — Общий вид прибора «Lintab»  
Fig. 5 — General view of the “Lintab” device

В заключении следует упомянуть работу, в которой в качестве аппаратуры фиксации использовали микроскоп с ПЗС камерой и 50-кратным увеличением и последующим улучшением снимка при помощи преобразования Габера [23]. Нейронная сеть (10 образцов для обучения, 10 — для классификации) для пород древесины, характерных для Индонезии — дуриан, рамин, джати, меранти, пути, мерсава, даху, керунинг, кампер, мербау и магони —

позволила правильно классифицировать 95% пород.

## Выводы

Рассмотренные подходы с использованием физических методов идентификации обладают рядом однотипных недостатков. Все они используют крайне небольшую базу данных, что обусловлено трудоемкостью создания таких баз. Но, в отличие от не менее трудоемкого метода визуализации, данные базы создаются только один раз, а затем могут пополняться. В принципе существуют стандартные методы восполнения (репликации) недостающих данных (бутстреп-методы [24]), однако для рассмотренной проблемы примеров их использования нет. Во-вторых, ни в одной из перечисленных работ не рассмотрены вопросы робастности полученных решений.

Относительно невысокий интерес к поставленной проблеме объясняется узкой практической сферой, связанной с криминалистическими и таможенными исследованиями.

## Литература

1. Вихров Е. В. Диагностические признаки древесины главных лесохозяйственных и лесопромышленных пород СССР. М. : АН СССР, 1959. 132 с.
2. Чепик Ф. А. Определитель деревьев и кустарников. М. : Агропромиздат, 1985. 232 с.
3. Азаров В. И., Буров А. В., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров : учебник для вузов. СПб. : СПбЛТА, 1999, 628 с.
4. Ухов А. А. Оптические спектрометры с многоэлементными фотоприемниками : дис. доктора техн. наук : 05.11.07. СПб., 2015. 290 с.
5. Воронин А. А. Разработка и исследование спектрального метода и аппаратуры для оперативной идентификации пород древесины : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.11.07. СПб., 2011. 20 с.
6. Воронин А. А., Смирнова Е. В., Смирнов А. П. К вопросу идентификации пород древесины с применением метода анализа спектров // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 2 (66). С. 5–10.
7. Афонин Д. Н. Информационно-техническое обеспечение идентификации ценных пород древесины при таможенном контроле // Бюллетень инновационных технологий. 2020. Т. 4, № 1 (13). С. 78–80.
8. Fluorescence: A Secret Weapon in Wood Identification // The Wood Database. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wood-database.com/wood-articles/fluorescence-a-secret-weapon-in-wood-identification/> (дата обращения: 04.09.2020).
9. Люнгетюд Ф., Моте Ф., Бахшиева М. А., Чубинский А. Н., Тамби А. А., Шарпентье П., Бомбардьё В. Исследование процесса идентификации древесных пород по макроскопическим признакам с использованием компьютерной томографии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. № 202. С. 158–167.
10. Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J. M. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography // Annals of Forest Science, 2009, vol. 66, no. 8, pp. 804–813. doi: 10.1051/forest/2009071
11. Colin F., Mothe F., Freyburger C., Morisset J. B., Leban J.-M., Fontaine F. Tracking rameal traces in sessile oak trunks with X-ray computer tomography: biological bases, preliminary results and perspectives // Trees. Structure and Function, 2010, vol. 24, no. 5, pp. 953–967. doi: 10.1007/s00468-010-0466-1

12. Kobayashi K., Hwang S.-W., Okochi T., Lee W.-H., Sugiyama J. Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data // *Journal of Cultural Heritage*, 2019, vol. 38, pp. 88–93. doi: 10.1016/j.culher.2019.02.001
13. Зильберглейт М. А., Якубовский С. Ф. Идентификация пород древесины с использованием цветометрических характеристик // *Вестник ПГУ. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки*. 2017. № 3. С. 105–109.
14. Хох А. Н., Галавнёва А. И., Колтович Д. А. Подходы к определению видовой принадлежности древесных пород на основе спектрометрической информации // *Судебная экспертиза Беларуси*. 2018. № 2 (7). С. 14–18.
15. Gerasimov V. A., Gurovich A. M., Kostrin D. K., Selivanov L. M., Simon V. A., Stuchenkov A. B., Paltcev A. V., Uhov A. A. Raman spectroscopy for identification of wood species // *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 741, no. 1, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012131
16. Lavine B. K., Davidson C. E., Moores A. J., Griffiths P. R. Raman Spectroscopy and Genetic Algorithms for the Classification of Wood Types // *Appl. Spectrosc.*, 2001, vol. 55, no. 8, pp. 960–966. doi: 10.1366/0003702011953108
17. Ojala T., Pietikäinen M., Mäenpää T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2002, vol. 24, no. 7, pp. 971–987. doi: 10.1109/TRAMI.2002.1017623
18. Vácha P., Haindl M., Suk T. Colour and rotation invariant textural features based on Markov random fields // *Pattern Recognition Letters*, 2011, vol. 32, no. 6, pp. 771–779. doi: 10.1016/j.patrec.2011.01.002
19. Barmpoutis P., Dimitropoulos K., Barboutisa I., Grammalidis N., Lefakis P. Wood species recognition through multidimensional texture analysis // *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 144, pp. 241–248. doi: 10.1016/j.compag.2017.12.011
20. Peng Z. Robust wood species recognition using variable color information // *Optik*, 2013, vol. 124, no. 17, pp. 2833–2836. doi: 10.1016/j.jleo.2012.08.058
21. Tou J. Y., Lau P. Y., Tay Y. H. Computer vision-based wood recognition system // *Proceedings of the International Workshop on Advanced Image Technology*, 2007, pp. 197–202.
22. Дружинин Н. А., Дружинин Ф. Н., Жаворонков Ю. М. Использование дендрохронологического метода исследования в ботанических судебных экспертизах // *Лесной журнал*. 2012. № 3. С. 137–142.
23. Yuliasuti E., Suprijanto, Retno Sasi S. Compact Computer Vision System For Tropical Wood Species Recognition Based On Pores and Concentric curve // *3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, Bali, Indonesia, 28–30 August 2013. 2013, pp. 198–202. doi: 10.1109/ICA.2013.6734071
24. Efron B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife // *Annals of Statistics*, 1979, vol. 7, no. 1, pp. 1–26. doi: 10.1214/aos/1176344552
6. Voronin A. A., Smirnova E. V., Smirnov A. P. K voprosu identifikatsii porod drevesiny s primeneniem metoda analiza spektrov [On the question of identifying wood species using the spectra analysis method]. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2010, no. 2 (66), pp. 5–10.
7. Afonin D. N. Informatsionno-tehnicheskoe obespechenie identifikatsii tsennykh porod drevesiny pri tamozhennom kontrole [Information and technical support for the identification of valuable wood species during customs control]. *Byulleten' innovatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Innovative Technologies], 2020, vol. 4, no. 1 (13), pp. 78–80.
8. Fluorescence: A Secret Weapon in Wood Identification (2020). Available at: <https://www.wood-database.com/wood-articles/fluorescence-a-secret-weapon-in-wood-identification/> (accessed 4 September 2020).
9. Lyungetyud F., Mote F., Bakhshieva M. A., Chubinskiy A. N., Tambi A. A., Sharpent'e P., Bombard'e V. Issledovanie protsessa identifikatsii drevesnykh porod po makroskopicheskim priznakam s ispol'zovaniem komp'yuternoy tomografii [Investigation of the process of identification of tree species by macroscopic features using computed tomography]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2013, no. 202, pp. 158–167.
10. Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J. M. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, no. 8, pp. 804–813. doi: 10.1051/forest/2009071
11. Colin F., Mothe F., Freyburger C., Leban J.-M., Morisset J.-B., Fontaine F. Tracking rameal traces in sessile oak trunks with X-ray computer tomography: biological bases, preliminary results and perspectives. *Trees. Structure and Function*, 2010, vol. 24, no. 5, pp. 953–967. doi: 10.1007/s00468-010-0466-1
12. Kobayashi K., Hwang S.-W., Okochi T., Lee W.-H., Sugiyama J. Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, vol. 38, pp. 88–93. doi: 10.1016/j.culher.2019.02.001
13. Zil'bergleyt M. A., Yakubovskiy S. F. Identifikatsiya porod drevesiny s ispol'zovaniem tsvetometricheskikh kharakteristik [Identification of wood species using colorimetric characteristics]. *Vestnik PGU. Ser. B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of PSU. Ser. B. Industry. Applied Sciences], 2017, no. 3, pp. 105–109.
14. Khokh A. N., Galavneva A. I., Koltovich D. A. Podkhody k opredeleniyu vidovoy prinalozhnosti drevesnykh porod na osnove spektrometricheskoy informatsii [Approaches to Determining the Species of Tree Species Based on Spectrometric Information] *Sudebnaya ekspertiza Belarusi* [Judicial expertise of Belarus], 2018, no. 2 (7), pp. 14–18.
15. Gerasimov V. A., Gurovich A. M., Kostrin D. K., Selivanov L. M., Simon V. A., Stuchenkov A. B., Paltcev A. V., Uhov A. A. Raman spectroscopy for identification of wood species. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 741, no. 1, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012131
16. Lavine B. K., Davidson C. E., Moores A. J., Griffiths P. R. Raman Spectroscopy and Genetic Algorithms for the Classification of Wood Types. *Applied Spectroscopy*, 2001, vol. 55, no. 8, pp. 960–966. doi: 10.1366/0003702011953108
17. Ojala T., Pietikäinen M., Mäenpää T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2002, vol. 24, no. 7, pp. 971–987. doi: 10.1109/TRAMI.2002.1017623
18. Vácha P., Haindl M., Suk T. Colour and rotation invariant textural features based on Markov random fields. *Pattern Recognition Letters*, 2011, vol. 32, no. 6, pp. 771–779. doi: 10.1016/j.patrec.2011.01.002
19. Barmpoutis P., Dimitropoulos K., Barboutisa I., Grammalidis N., Lefakis P. Wood species recognition through multidimensional texture analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 144, pp. 241–248. doi: 10.1016/j.compag.2017.12.011
20. Peng Z. Robust wood species recognition using variable color information. *Optik*, 2013, vol. 124, no. 17, pp. 2833–2836.

## References

1. Vikhrov E. V. Diagnosticheskie priznaki drevesiny glavneyshikh lesokhozyaystvennykh i lesopromyshlennykh porod SSSR [Diagnostic signs of wood of the main forestry and forestry species of the USSR]. Moscow : AN SSSR Publ., 1959. 132 p.
2. Chepik F. A. *Opredelitel' derev'ev i kustarnikov* [Qualifier of trees and shrubs]. Moscow : Agropromizdat Publ., 1985. 232 p.
3. Azarov V. I., Burov A. V., Obolenskaya A. V. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic materials]. Saint-Petersburg : SPBLTA Publ., 1999. 628 p.
4. Ukhov A. A. Opticheskie spektrometry s mnogoelementnymi fotopriemnikami. Diss. dokt. tekhn. nauk [Optical spectrometers with multi-element photodetectors. Dr. eng. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2015. 290 p.
5. Voronin A. A. Razrabotka i issledovanie spektral'nogo metoda i apparatury dlya operativnoy identifikatsii porod drevesiny. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of the spectral method and equipment for the operational identification of wood species. PhD tekhn. sci. diss. abstr.]. Saint-Petersburg, 2011. 20 p.

- doi: 10.1016/j.ijleo.2012.08.058
21. Tou J. Y., Lau P. Y., Tay Y. H. Computer vision-based wood recognition system. *Proceedings of the International Workshop on Advanced Image Technology*, 2007, pp. 197–202.
22. Druzhinin N. A., Druzhinin F. N., Zhavoronkov Yu. M. Ispol'zovanie dendrokronologicheskogo metoda issledovaniya v botanicheskikh sudebnykh ekspertizakh [Use of the dendrochronological research method in botanical forensic examinations]. *Lesnoy zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 3, pp. 137–142.
23. Yuliasuti E., Suprijanto, Retno Sasi S. Compact Computer Vision System For Tropical Wood Species Recognition Based On Pores and Concentric curve. *3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, Bali, Indonesia, 28–30 August 2013, 2013, pp. 198–202. doi: 10.1109/ICA.2013.6734071
24. Efron B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *Annals of Statistics*, 1979, vol. 7, no. 1, pp. 1–26. doi: 10.1214/aos/1176344552
- 

Поступила в редакцию 08.12.2022

© М. А. Зильберглейт, С. В. Нестерова, 2023