

ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРОВ ДИФфуЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОРОД

© 2007 г. В. А. Анчуков*, Г. Г. Горбунов*, доктор техн. наук; С. С. Гулидов*, Ю. В. Илясов*;
А. П. Лаппо*, Ю. И. Полушкин*, Ал. Г. Серегин*, канд. техн. наук; Ар. Г. Серегин*;
А. П. Смирнов*, канд. физ.-мат. наук; О. К. Таганов*, канд. физ.-мат. наук

* НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

** ООО “СДЦ”, Санкт-Петербург

Рассматриваются вопросы применения спектральных приборов для получения спектров диффузного отражения различных образцов древесины. Приведены сведения о важности задачи определения пород и качества деревьев с помощью приборов неразрушающего контроля. Описывается переносной монохроматор, работающий в диапазоне спектра от 0,4 до 2,5 мкм, разработанный для снятия спектров диффузного отражения различных образцов древесины в полевых условиях. Демонстрируются примеры зарегистрированных спектров.

Коды OCIS: 300.6220.

Поступила в редакцию 20.11.2006.

Россия экспортирует лесобумажную продукцию более чем в 100 стран мира. Обладая крупнейшими лесными ресурсами, Россия является ведущим экспортером лесоматериалов среди развитых стран. Так, по данным НИПИЭИлеспром, доля экспорта России в объемах мирового экспорта лесоматериалов составляет более 1/3, при этом основа валютной выручки приходится не на продукты переработки древесины, а на экспорт сырья в виде круглых лесоматериалов [1].

Как показывает практика таможенного контроля, при экспорте имеют место случаи, когда экспортеры под видом обычных пород вывозят более ценные породы древесины или уклоняются от уплаты пошлины, декларируя вывоз беспошлинных пород, фактически экспортируя древесину, облагаемую пошлиной. Поэтому для эффективной борьбы с подобными нарушениями необходимы технические средства, позволяющие быстро и объективно идентифицировать породу древесины в полевых условиях.

Кроме проведения таможенного контроля, определение породы или проверка качества древесины необходимы в кораблестроении и лесоперерабатывающей промышленности, производстве мебели и бумаги, в датировании произведений искусства, изготовленных из дерева [2, 3]. Внедрение экспрессных методов контроля качества древесины в лесодобывающие комплексы позволит проводить подобную проверку даже и на еще растущих деревьях, в том числе для экспрессного отбора растений с лучшими физическими (механическими) свойствами для последующего воспроизводства, как уже намечается делать в Канаде [4]. Это позволит значительно увеличить эффективность использования лесного богатства, проводя отбраковку и подбор необхо-

димого качества древесины еще в условиях роста деревьев, улучшить экологический климат мест добытия древесины, реально на новом оборудовании проводить контроль использования природоохранительных технологий на всех стадиях добычи и переработки древесины.

В настоящее время приборов, в достаточной мере отвечающих требованиям оперативных методов контроля качества древесины в полевых условиях, не существует, поэтому стоит задача их создания на основе оптимальных методов экспресс-анализа с применением передовых технологий, современных методов приема и обработки сигналов и алгоритмов обработки и распознавания образов.

Бесспорно, следует отдавать предпочтение методам неразрушающего контроля. Это объясняется простотой подготовки проб, меньшими затратами времени на измерение, меньшей погрешностью результата, лучшими условиями эксплуатации. Метод, позволяющий решать задачу идентификации, должен опираться на устойчивые характерные признаки, присущие отдельным породам древесины.

Элементарный химический состав органической части древесины всех пород практически одинаков. Абсолютно сухая древесина содержит в среднем 49–50% углерода, 43–44% кислорода, около 6% водорода и 0,1–0,3% азота. Эти химические элементы образуют сложные химические соединения: целлюлозу, лигнин, гемицеллюлозы, пентозаны и экстрактивные вещества. Содержание органических веществ в древесине зависит от породы, возраста и других факторов. У хвойных пород больше целлюлозы, у лиственных – пентозанов. В зоне ранних годичных слоев целлюлозы меньше, чем в поздних слоях. С возрастом содержание экстрактивных веществ увеличивается [5]. Структура и качество дре-

веса в пределах выбранной зоны, пригодной для взятия проб, могут быть неоднородны. На спилах древесины встречаются трещины, сучья и другие локальные аномалии. Даже очень качественно обработанная поверхность древесины не имеет зеркального блеска, так как однородные неровности отражают световой поток диффузно. Поперечный спил круглых товарных лесоматериалов, как правило, имеет грубую неровную поверхность и может быть загрязнен, покрыт льдом или снегом. Все это создает проблемы, с точки зрения правильного отбора проб, и предъявляет особые требования к методу экспресс-анализа и технологии его реализации. Рассмотрение всех разнородных требований и условий эксплуатации прибора показывает, что в наибольшей степени решаемой задаче соответствует аналитический метод диффузной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона (БИК-анализ) с получением спектральной информации о древесине с небольшой глубины из-под внешней поверхности спила.

Диффузная отражательная спектроскопия в видимой и ближней ИК областях спектра (длины волн в диапазоне 0,4–2,5 мкм) является уникальным физическим методом, позволяющим осуществлять определение значительного числа показателей в органических продуктах сложного химического строения [6], к которым относится и древесина [7]. ИК спектроскопия находит все большее применение для идентификации объектов на основе статистических методов распознавания образов. Суть БИК-анализа сводится к измерению спектров пропускания (отражения) образцов в ближней ИК области практически без пробоподготовки и их последующему анализу, который заключается в установлении корреляции между измеренными спектрами и параметрами образцов, полученными стандартными (референтными) методами [8, 9]. Подобная процедура называется калибровкой ИК анализатора. При этой процедуре по специальной методике отбирается представительный набор образцов, проводятся измерения спектров этих образцов с последующим анализом их повторяемости и однозначности спектрального отклика. Результаты этих измерений служат основой для последующей интерпретации данных ИК анализа.

Наиболее сложными, требующими больших временных и материальных затрат остаются отработка методик получения однозначного спектрального отклика от исследуемых образцов, создание первичного банка спектральных данных, отработка методик и программ обработки и сравнения полученных спектральных данных.

Применительно к решаемой задаче экспрессной идентификации породы древесины была разрабо-

тана методика и изготовлен опытный образец БИК-спектрометра для получения спектров диффузного отражения проб различных древесных пород.

Методы БИК-анализа, несмотря на их активное и повсеместное использование за рубежом, в России до сих пор применяются ограниченно. Подобная ситуация обусловлена следующими причинами. До последнего времени в РФ отсутствовало серийное производство высококачественных БИК-анализаторов. Подобные анализаторы, производимые зарубежными фирмами, являются очень дорогостоящим продуктом высоких технологий, причем значительная часть стоимости данных аналитических систем приходится на самую главную их составляющую – программное обеспечение (естественно, не русифицированное). Но самая главная проблема заключается в том, что система их калибровок не адаптирована к отечественным объектам анализа.

Для получения и изучения спектров диффузного отражения различных древесных пород и отработки технических решений, закладываемых в основу перспективного прибора для идентификации пород древесины, был разработан опытный образец спектрального прибора. Он представляет собой переносной БИК-анализатор (спектрометр), снабженный волоконным жгутом с оптическим зондом (“головкой”), заглубляемым под поверхность исследуемого образца древесины на глубину нескольких миллиметров, для того чтобы устранить влияние на древесину факторов внешних воздействий (обработка, загрязнение, обледенение и т. д.).

Упрощенная оптическая схема прибора показана на рис. 1. Основу оптико-электронной части прибора составляет модифицированный призмный монохроматор. Источником излучения служит вольфрамовая нить накала миниатюрной галогенной лампы мощностью около 10 Вт, имеющая цветовую температуру $T_{\text{цв}} \approx 3000$ К. Такие характеристики лампы позволяют получить максимальную яркость на $\lambda \approx 1$ мкм и обеспечить удовлетворительное отношение сигнал/шум при диффузном рассеянии излучения исследуемым образцом древесины в диапазоне 0,4–2,5 мкм. Поток источника излучения I после модулятора 3 собирается сферическим зеркалом 2 на входной щели монохроматора 4. Расходящиеся пучки излучения от входной щели коллимируются сферическим зеркалом 5 и направляются на диспергирующую призму 6. После двойного прохождения призмы пучки разложенного на спектральные составляющие излучения фокусируются вторым сферическим зеркалом 5 на выходной щели. Разворот спектра от 0,4 до 2,5 мкм осуществляется поворотом призмы примерно на 3° . Поворот призмы происходит с помощью шагового двигателя, устанавливаемого внутри кожуха прибора. Выходная

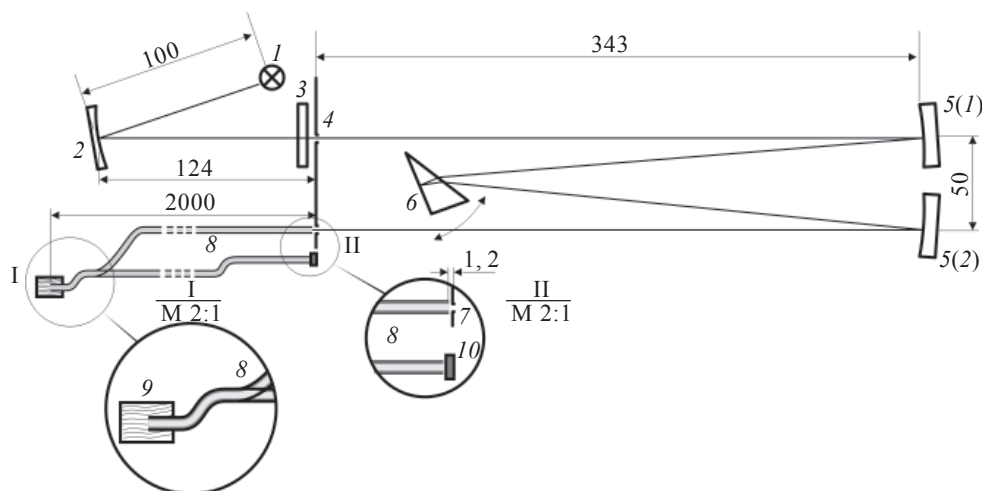


Рис. 1. Оптическая схема прибора для определения спектров диффузного отражения древесины различных пород (габаритные размеры приведены в мм). 1 – источник излучения, 2, 5(1), 5(2) – сферические зеркала, 3 – модулятор, 4 – входная щель монохроматора, 6 – призма, 7 – выходная щель монохроматора, 8 – оптоволоконный жгут, 9 – зона измерения (образец древесины), 10 – приемник излучения.

часть оптического тракта прибора, конструктивно выполненная на основе использования оптоволоконного жгута, обозначена на рис. 1 римскими цифрами I и II (для наглядности она дополнительно вынесена за границы оптической схемы и представлена в увеличенном масштабе). Излучение определенного спектрального состава, сформированного монохроматором на выходной щели 7, поступает в волоконный жгут для транспортировки в зону измерения исследуемого образца древесины 9. Таким образом, эта часть волокон жгута служит для освещения изучаемого объекта. Вторичный рассеянный поток, как результат взаимодействия освещающего излучения с древесиной образца, возвращается в обратном направлении по специально выделенным для этой цели волокнам жгута (для этой цели служит разветвление жгута 8) и направляется к фотоприемнику 10.

Фотоприемник, в качестве которого используется фотосопротивление на основе PbS, обладающее хорошей чувствительностью в широком спектральном диапазоне от 0,4 до 3 мкм, преобразует световой сигнал в электрический. Этот сигнал после соответствующего усиления полосовым усилителем с синхронным детектором поступает в 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь, а затем в запоминающее устройство. Каждый записанный спектр состоит из 300 отсчетов, поступающих примерно через 7 нм по шкале длин волн. Для получения последующего единичного отсчета шаговый двигатель делает около 50 шагов, что позволяет значительно уменьшить неравномерность снятия отсчетов по спектру путем усреднения возможных ошибок единичного шага шагового двигателя.

Конструктивно прибор состоит из двух модулей (рис. 2). В одном из них расположены все оптические элементы, входная и выходная щели, механизм перемещения призмы и модулятор с синхронным детектором. Малогабаритный модулятор снабжен оптопарой, являющейся частью синхронного детектора и одновременно датчиком обратной связи электронной системы, поддерживающей постоянную скорость вращения модулятора. Осветительная часть прибора с лампой накаливания и первым сферическим зеркалом вынесена наружу и имеет самостоятельный кожух. В другом модуле прибора расположены фотоприемник с предусилителем и

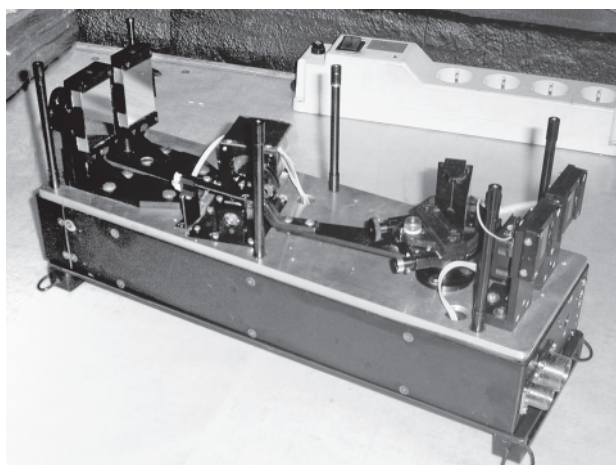


Рис. 2. Фотография общего вида макета прибора (со снятой крышкой) для определения спектров диффузного отражения древесины различных пород.

электронная плата с узкополосным усилителем, системой управления шаговым двигателем, аналого-цифровым преобразователем и запоминающим устройством.

Волоконный жгут, служащий для транспортировки монохроматического излучения к исследуемому объекту (древесине) и обратной транспортировки отраженной рассеянной части этой энергии к фотоприемнику, одним концом крепится к корпусу прибора. Другой конец жгута закрепляется стопорными винтами в “головке” в полем металлическом цилиндре с наружным диаметром 7 мм. “Головка” в свою очередь может скрепляться винтами с кондуктором, через который просверливаются отверстия в древесине. Свободный конец цилиндра выступает из кондуктора и погружается в высверленное в исследуемой древесине отверстие, имеющее также диаметр 7 мм и глубину около 7 мм.

Сканирование по спектру осуществляется поворотом призмы. Механизм перемещения призмы состоит из рычажной системы, шагового двигателя и оптопары с “флажком”. При включении прибора оптопара автоматически устанавливается так, чтобы пересечение “флажком” ее луча соответствовало началу рабочей области спектра. Как только “флажок” пересечет луч оптопары, начинается “прямой” рабочий ход призмы. Съем спектральной информации происходит во время остановки движения. После окончания регистрации всего рабочего спектрального диапазона призма возвращается в начальное положение.

Управление работой прибора осуществляется с дистанционного пульта управления, расположенного на ручном дисплее.

После разработки и изготовления данного прибора выполнены экспериментальные исследования на образцах древесины нескольких хвойных и лиственных пород, включая ель, сосну, кедр, лиственницу, березу, дуб, клен и др. Исследования включали в себя отработку методики получения спектров диффузного отражения, калибровку прибора, анализ полученной спектральной информации, определение информативных идентификационных признаков и степени их отличия для исследованных древесных пород, определение характера и степени влияния на спектры различных внешних факторов, характеристик прибора и зонда, методики и технологии измерений.

Исследования проводились как в лабораторных, так и в полевых условиях. В качестве образцов древесины использовались срезы круглого неокоренного лесоматериала, взятого из разных регионов произрастания. Исследовались образцы древесины различного возраста с разной естественной влажностью.

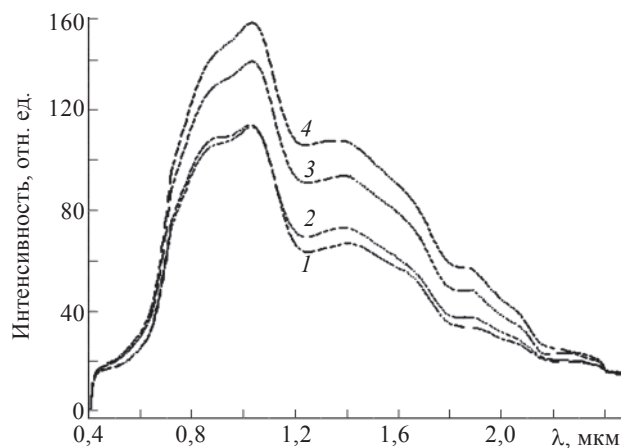


Рис. 3. Характерные спектры диффузного отражения древесины разных пород деревьев. 1 – лиственница, 2 – береза, 3 – ель, 4 – сосна.

На рис. 3 показаны характерные зарегистрированные спектры диффузного отражения сосны, ели, березы, и лиственницы. Как видно из приведенного примера, спектры имеют отличия, хотя и достаточно близки по форме.

Для уверенного распознавания пород древесины по измеренным спектрам прежде всего необходимо добиться воспроизводимости измерений идентичных образцов. Помимо методических и инструментальных причин, на повторяемость оказывают сильное влияние некоторые факторы, специфичные для обследуемых объектов. Так, при обработке древесины режущими инструментами происходит перерезание полых анатомических элементов (сосудов) и на поверхности древесины образуются неровности. У большинства лиственных рассеяно-сосудистых пород высота анатомических неровностей составляет 30–100 мкм, у хвойных пород – 8–60 мкм. Скорее всего из-за наличия подобных неровностей изменяется глубина проникновения излучения и, как оказалось, меняется спектральный отклик. Для воспроизводимости спектрального отклика исследуемого образца необходима четкая ориентация излучения, выходящего из волоконного жгута, относительно годовичных колец дерева, для чего необходима тщательная отработка конструкции ввода и позиционирования излучения в отверстии исследуемого образца.

В конечном счете выбранная конструкция оптического зонда и методика ввода зонда в контрольное отверстие, заготовленное в образце древесины, позволили получить хорошо воспроизводимый спектральный отклик от исследуемого образца в условиях стабильной температуры окружающей среды и фиксированной влажности образца.

Далее были проведены работы по созданию методик сбора спектральных баз данных и оптимизации алгоритмов обработки для последующего определения породы дерева по спектру диффузного отражения.

Обработка признаков в системах распознавания [8] наиболее часто ведется тремя способами: отбором наиболее информативных признаков (отбором подмножеств), образованием отношений отдельных признаков (отношений отдельных компонентов вектора признаков) и образованием линейных комбинаций отдельных признаков. Поскольку в реальных полевых приборах возможности используемых в них ЭВМ всегда накладывают ограничения на объемы спектральной информации, обрабатываемой в реальном времени, необходимо стремиться к минимизации выделяемых признаков.

Отбор подмножества спектральных признаков наиболее целесообразно вести путем выделения такого рабочего диапазона, в котором энергетическое отношение сигнал/помеха максимально. В рассматриваемом приборе, как видно из рис. 3, наиболее информативным является спектральный диапазон от 0,5 до 2,2 мкм.

Как показали исследования, существенное значение в спектрах диффузного отражения древесины имеет влажность, которая в отдельных случаях снижает коэффициент отражения и увеличивает коэффициент пропускания в несколько раз. В среднем влияние влажности сказывается почти одинаково на всех породах. Кроме того, в спектрах влажных образцов происходит сдвиг максимумов в коротковолновую часть спектра. Это приводит к тому, что между спектрами диффузного отражения образцов древесины одной породы, но различной влажности нет линейной зависимости и при применении простого корреляционного анализа такие состояния одной породы могут быть не идентифицированы. Как показал эксперимент, влажность значительно влияет на вид всего спектра. Из этого можно сделать два вывода: во-первых, для точной дальнейшей идентификации пород древесины необходимо исключить влияние влажности и, пользуясь заранее составленным банком спектральных данных, с помощью дополнительной математической обработки приводить зарегистрированные экспериментальные спектры либо к “сухим” образцам, либо к наиболее часто встречающимся стандартизованным значениям “влажности” древесины; во-вторых, имея экспериментальный банк данных разных пород древесины, измеренных при разной ее влажности, из полученных спектров можно определить влажность исследуемого образца.

Другой возможностью идентификации может служить анализ отношения максимумов. Как видно

из рис. 3, первые максимумы пород имеют различные отношения ко второму максимуму, однако для некоторых сочетаний пород эта методика работает не однозначно. Возможно использовать для идентификации не только максимумы, но и спектральную контрастность исследуемых образцов. Ранжирование спектров по контрастам экстремумов осуществляется определением близости вектора контрастов исследуемого спектра к векторам контраста банка путем вычисления скалярного произведения нормированных векторов контраста.

Чтобы проиллюстрировать механизм идентификации, рассмотрим его особенности на примере трех пород: березы, ели и сосны – при идентификации по соотношению амплитуд. Механизм имеет статистический характер. Доверительный интервал оценок при идентификации зависит от шума источника, который составлял для описываемого прибора ± 6 отн. ед. Для пород, максимум интенсивности которых составляет 100–150 отн. ед. (рис. 3), погрешность идентификации по вероятности попадания спектра идентифицируемой породы в полосу спектра конкретного образца из банка составляет 6–9%. В этом случае, например, достоверно различаются между собой ель и береза, так как вероятность попадания в полосу спектров соответствующего образца составляет 0,1–0,4. Сосна имеет широкий разброс вероятностей попадания в полосы ели и березы: 0,2–1, т. е. в процессе повторных измерений может быть достоверно идентифицирована. С другой стороны, и ель и береза, имея интервал попадания в полосу спектров сосны 0,8–1, с большей вероятностью могут быть приняты за сосну и требуют большего числа повторных опытов при идентификации.

Проведенная работа впервые показала возможность решения задачи экспрессной идентификации древесины различных пород деревьев в лабораторных и полевых условиях с использованием аппаратных средств БИК-спектроскопии диффузного отражения. Разработанные методики сбора банка спектральных данных позволяют проводить накопление различных признаков для последующего увеличения надежности распознавания различных пород деревьев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Товарная номенклатура внешнеэкономической деятельности России. М.: ГТК, 2000.
2. Лежнев М.Ю. Идентификация лесопродукции // Лесное машиностроение. 1999. № 3. С. 3–5.
3. Колосова М.И. Идентификация древесины музейных предметов // Симпозиум “Экспертиза и атрибуция произведений изобразительного и декоративно-приклад-

- ного искусства”. 27 июня 2000 г. Государственный Эрмитаж. <http://www.hermitagemuseum.org/html>.
4. *Varga G.* Development of a field-mobile, near-infrared sensor for measuring the chemical composition and mechanical properties of standing wood a field-rugged system will be able to predict properties from in-situ measurements // February 2001, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585. <http://www.eere.energy.gov/industry/forest/pdfs/nir.pdf>.
 5. *Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В.* Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.: Наука, 1999. 628 с.
 6. *Йошихиса С., Сайчиро Х. (Yoshihisa S., Seiichiro H.)* Идентификация материалов покрытий для бумаги на месте с использованием метода ИК-спектроскопии с фурье-преобразованием и спектров отражения // Бумага, стабилизация, полимерные покрытия, спектроскопия. 1996. № 34. С. 88–99. [Библиография: РЖ Химия. 1998. 8Ф153.]
 7. *Chi-Leung So, Brian K. Via, Leslie H. Groom and others.* Near Infrared Spectroscopy in the Forest Products Industry // Forest Products Journal. 2004. V. 54. № 3. P. 6–16.
 8. *Сухов Д.А., Казанский С.А.* ИК фурье-спектроскопия диффузного отражения света для целей паспортизации и идентификации образцов бумаги и предметов искусства на бумажной основе // СПб.: Государственный технологический университет растительных полимеров, 2003.
 9. *Meglen R.R.* Applications of NIR and Chemometrics to Prediction of Wood Properties // 2nd NIR Nord Process-NIR Conference: NIR on Wood and Fiber – characterization and process applications. 23–24 November 1999. Björken, Sweden.
-