

ПРОЦЕДУРА ОСВЕТЛЕНИЯ БУКОВОГО, ДУБОВОГО, КЛЕНОВОГО И ЯСЕНЕВОГО ШПОНОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ИК-СПЕКТРЫ

С.А. Баскаков^{1✉}, Ю.В. Баскакова¹, А.В. Жарковская¹,
С.С. Красникова¹, Е.Н. Кабачков^{1,2}, Ю.М. Шульга¹

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1
²Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

sabaskakov@gmail.com

Описана в простейшем варианте известная концепция прозрачной древесины и указаны публикации, посвященные этому вопросу. Проведена процедура осветления для шпона бука, дуба, клена и ясеня с использованием только пероксида водорода вместо традиционных химических реактивов, содержащих хлориты или сульфиты. Для всех исследованных образцов было установлено, что после осветления и сушки происходит уменьшение размера (усадка) в направлении, перпендикулярном направлению роста. Впервые с использованием ИК-спектроскопии обнаружено, что при таком осветлении из шпона удаляются компоненты со слабыми водородными связями. Используя декомпозицию фрагмента ИК-спектра в области 1800...1500 см⁻¹, были выделены полосы поглощения валентных колебаний связей С=О и подтвержден эффект уменьшения в осветленной древесине концентрации компонентов, имеющих в своем составе карбонильные группы. Описаны также процедуры пропитки осветленного шпона эпоксидной смолой и определения лигнина Класона. Показано, что эффективность удаления лигнина существенным образом зависит от сорта древесины.

Ключевые слова: прозрачная древесина, ИК-спектры, бук, дуб, клен, ясень

Ссылка для цитирования: Баскаков С.А., Баскакова Ю.В., Жарковская А.В., Красникова С.С., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. Процедура осветления букового, дубового, кленового и ясеневое шпонов и ее влияние на ИК-спектры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 82–93.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-82-93

Прозрачная древесина — это материал, который начинает приобретать популярность [1–10]. Предполагается, что такую древесину можно использовать в качестве нового функционального сырья для замены других светопроводящих веществ, в частности стекла. Очевидным преимуществом прозрачной древесины по сравнению со стеклом является меньший удельный вес. С ее помощью можно обеспечить также безопасность использования продукции в связи с отсутствием хрупкости, имеющейся у стекла. Прозрачная древесина отличается от стекла большими гибкостью и устойчивостью к механическим повреждениям. Стекло легко трескается и разбивается, а прозрачная древесина способна выдерживать значительные нагрузки и удары, что существенно повышает уровень безопасности при использовании этого материала в различных конструкциях [5, 6]. Например, окна из прозрачной древесины могут заменять остекление в зданиях, расположенных в зонах

повышенной сейсмической активности или подверженных сильным ветровым нагрузкам.

Отметим экологичность прозрачной древесины. Она производится из возобновляемого сырья, что способствует снижению углеродного следа и уменьшению зависимости от ископаемых ресурсов [7]. Кроме того, на производство прозрачной древесины затрачивается меньше энергии по сравнению с производством стекла, что также положительно сказывается на окружающей среде.

Таким образом, прозрачная древесина имеет большой потенциал для применения в разнообразных областях экономики, начиная от строительства и заканчивая созданием новых типов электронных дисплеев и солнечных батарей [9, 10]. Продолжающиеся исследования и разработки в этой области открывают новые возможности для ее использования в будущем.

Концепция прозрачной древесины была предложена в 1992 г. [11]. В простейшем представлении метод ее изготовления заключается в том, чтобы сначала использовать раствор для

химического удаления лигнина из древесины, а затем полученный пористый материал наполнить связующим, например, смолой, олигомером или полимером с показателем преломления, близким к показателю преломления целлюлозы (для устранения светорассеяния на границе между клетками древесины). Почему нужно удалять лигнин? Потому что именно лигнин определяет оптические свойства и естественный цвет древесины. Отметим, что связующее, которое вводят в поры, ранее заполненные лигнином, может сообщать прозрачному дереву новые потребительские свойства. В частности, материалы с большой скрытой теплотой плавления в температурном интервале 30...50 °С, будучи помещенными в поры прозрачной древесины, могут препятствовать нагреву помещения днем и остыванию (охлаждению) ночью, если из модифицированной таким образом прозрачной древесины изготавливать внешние стены помещения.

Основными химическими веществами, используемыми для удаления лигнина, служат соединения натрия — гипохлорит, хлорит и сульфит [11–17]. Эти вещества позволяют эффективно удалить лигнин для достижения эффекта обесцвечивания древесины, однако это сопровождается загрязнением окружающей среды. В частности, гипохлориты и хлориды, образующиеся в процессе обработки, способны вызывать коррозию металлического оборудования и загрязнять сточные воды.

К другим более экологичным, но менее распространенным методам удаления лигнина относятся методы, основанные на использовании пероксида водорода [18–21]. При этом каждая модификация метода обесцвечивания характеризуется своими особенностями, которые следует изучать и оптимизировать для решения конкретных задач. Очевидно также, что в рамках одного метода осветления можно получить разные результаты, если им пользоваться для осветления древесины разных сортов, так как они обладают различными свойствами, такими как содержание лигнина, твердость, структура и плотность волокон, что влияет на эффективность выбранного метода обесцвечивания [16, 19]. Например, некоторые виды древесины могут требовать более длительного времени воздействия химических веществ или более высоких концентраций реагентов для достижения желаемого результата. Мягкие породы дерева — сосна или береза легче поддаются обработке и требуют меньше времени и концентрации обесцвечивающего реагента. Такие твердые породы, как дуб или бук, напротив, могут потребовать более агрессивных методов

и длительных процедур для достижения необходимого уровня обесцвечивания.

Судя по литературным данным, наибольший успех в осветлении был достигнут при использовании шпона из бальсы (или бальзы — *Ochroma pyramidale*). На белом шпоне бальсы практически не видны годовые кольца. Древесина бальсы легкая, поры, в которых находится лигнин, — большие. Процесс выделения лигнина проходит легче и за более короткое время. Единственным недостатком у этого материала в России является его высокая цена, поскольку дерево бальсы произрастает в экваториальной части Южной Америки.

Цель работы

Цель работы — получение образцов прозрачного шпона бука (*Fagus sylvatica*), дуба (*Quercus robur*), клена (*Acer pseudoplatanus*) и ясеня (*Fraxinus excelsior*) с использованием экологически более приемлемого реактива — пероксида водорода вместо традиционных химических реактивов, которые содержат хлориты или сульфиты, а также изучение с помощью ИК-спектроскопии особенностей изменения состава каждого типа древесины после процедуры осветления.

Материалы и методы

Материалы. Образцы шпона дуба, ясеня, клена и бука толщиной 0,6 мм, сорт А, гидроксид натрия марки «х. ч.» (ГОСТ Р 55064–201), пероксид водорода в концентрации 37 % (ГОСТ 177–88), эпоксидная смола и отвердитель Artline Honey (для ювелирных работ).

Процедура обесцвечивания (выделение лигнина). Обесцвечивание шпонов проводили по следующей методике. Шпоны нарезали квадратами со стороной 50 ± 5 мм, помещали их в химический стакан, заливали 600 мл 5%-го раствора NaOH и нагревали до кипения. Варку проводили в течение 1 ч для удаления щелочного лигнина. Затем щелок коричнево-красного цвета сливали и добавляли еще 600 мл белого 5%-го щелока и после закипания раствора порциями вводили 200 мл 37%-го пероксида водорода. Введение H_2O_2 выполняли порциями по 20...30 мл по мере прекращения выделения газообразного кислорода. Отбеленные образцы шпона промывали в дистиллированной воде до нейтральной реакции и сушили при комнатной температуре в течение 24 ч. Процедура отбеливания была идентичной для всех четырех видов древесины (клена, дуба, ясеня и бука).



Рис. 1. Шпон бука (а) и прозрачный композит, состоящий из четырех слоев осветленного шпона бука, пропитанного эпоксидной смолой (б)

Fig. 1. Photographs of beech veneer (a) and a transparent composite consisting of 4 layers of bleached beech veneer impregnated with epoxy resin (b)

Процедура пропитки шпона эпоксидной смолой. Перед пропиткой смолой образцы бленого шпона не высушивали от воды, а сменяли растворитель. Воду в образцах замещали ацетоном. Далее, не допуская высыхания ацетона, образцы переносили в герметичную емкость, в которую предварительно помещали смесь эпоксидной смолы и отвердителя в пропорции 2:1. Количество смолы было таким, чтобы образцы шпона полностью были ею покрыты. Емкость вакуумировали с помощью форвакуумного насоса для удаления ацетона из древесины и замены на смолу. Пропитанные смолой образцы шпона извлекали из формы и укладывали в четыре слоя таким образом, чтобы направление целлюлозных волокон каждого последующего слоя изменялось на 90° (в виде перевязки). Масса шпона после этого увеличивалась приблизительно на 10 % по сравнению с первоначальными образцами.

Определение лигнина Класона. Из абсолютно сухого образца бленого шпона брали навеску около 1 г, взвешенную с погрешностью не более 0,2 мг, помещали в химический стакан и смачивали 15 см кислотной смесью (шесть частей 75%-й серной кислоты и одна часть 85%-й ортофосфорной кислоты). Стакан с пробой помещали в термостат при температуре $35,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ и выдерживали 45 мин, периодически перемешивая содержимое стакана. По истечении указанного времени в стакан добавляли 400 мл дистиллированной воды, содержимое стакана нагревали до кипения и кипятили 15 мин. Стакан с пробой оставляли на 10 мин для охлаждения и отстаивания выделившегося осадка — лигнина. Раствор с осадком лигнина

фильтровали через бумажный фильтр, лигнин промывали раствором хлорида натрия до полного удаления следов кислоты. Фильтр с осадком лигнина высушивали в сушильном шкафу при температуре $103 \pm 2^\circ\text{C}$ и взвешивали. По разнице массы чистого фильтра и фильтра с лигнином определяли массу последнего.

ИК-спектроскопия. ИК-спектры (разрешение 4 см^{-1} , число сканирований 32) записывали при комнатной температуре в диапазоне частот $450 \dots 4000\text{ см}^{-1}$ на ИК-Фурье-спектрометре Perkin-Elmer Spectrum Two (Waltham, MA, США) с приставкой ATR.

Результаты и обсуждение

Оптические фотографии шпона. На рис. 1 представлен шпон бука толщиной 0,6 мм и композит из четырех осветленных и пропитанных эпоксидной смолой шпонов, сложенных стопкой так, чтобы придать композиту максимальную жесткость. Здесь композит достаточно прозрачный — можно прочесть текст на бумаге под композитом. Два внутренних листа шпона можно пропитывать стеарином или воском, для которых характерен переход из твердого в жидкое состояние с большой скрытой теплотой. Такая конструкция будет надежной гарантией от вытекания материала с фазовым переходом при переходе его в жидкое состояние.

Опишем результаты исследования превращений, которые происходят со шпоном на этапе осветления.

На рис. 2 представлены образцы шпонов бука, дуба, клена и ясеня до и после осветления.

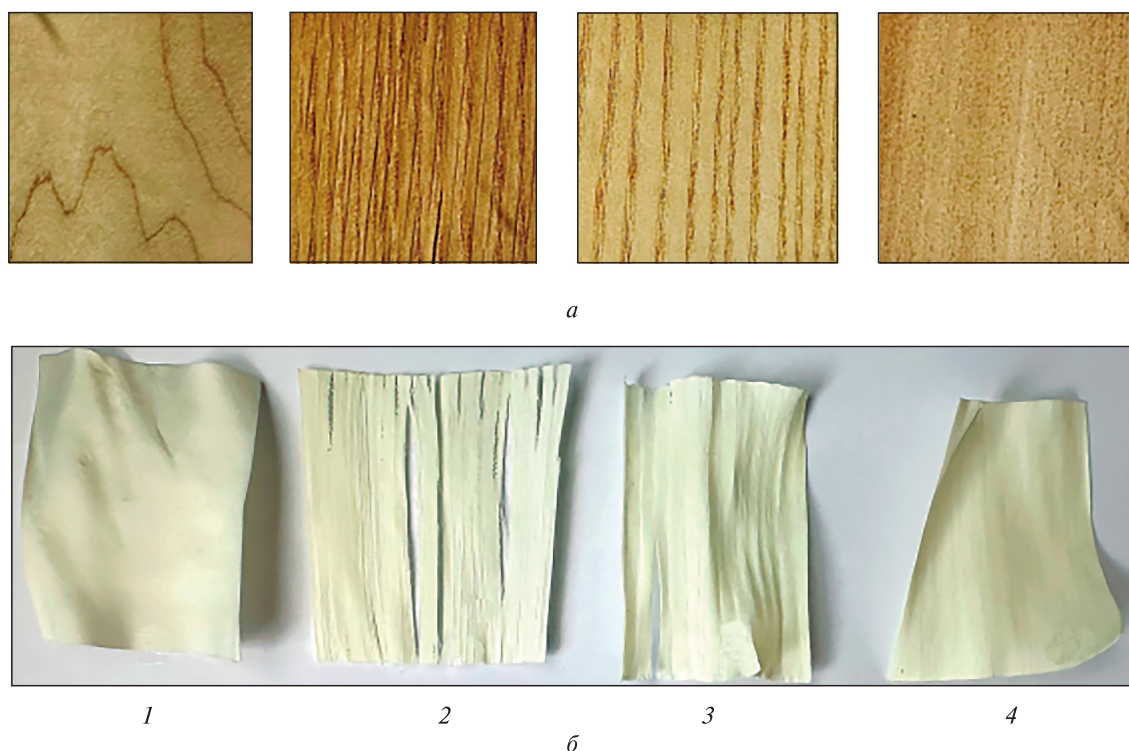


Рис. 2. Шпоны клена (1), дуба (2), ясеня (3) и бука (4) до (а) и после процедуры осветления промывки водой и сушки на расположенной горизонтально стеклянной подложке при температуре 50 °С (б)

Fig. 2. Photographs of maple (1), oak (2), ash (3) and beech (4) veneers before (a) and after the bleaching procedure, water washing and drying on a horizontal glass substrate at 50°C (б)

Видно, что после осветления высушенные образцы шпонов действительно стали более светлыми. Образцы шпона дуба и клена после осветления расслаиваются вдоль направления роста, причем в случае дуба это расслоение выражено наиболее ярко. Для всех образцов после осветления и сушки происходит уменьшение размера (усадка) в направлении, перпендикулярном направлению роста. В процессе сушки все образцы также изгибаются, что создает дополнительные трудности для их дальнейшей переработки.

ИК-спектры. ИК-спектры исследуемых образцов до и после осветления представлены на рис. 3–6. Поскольку ИК-спектры древесины описаны во многих публикациях [22–24], отнесение некоторых полос поглощения не вызывает никаких сомнений.

Например, широкая полоса поглощения в диапазоне 3700...2960 cm^{-1} обусловлена в основном валентными колебаниями связей О-Н. Обычно форму этой полосы поглощения в публикациях, посвященных технологическим процессам, не анализируют. Однако из сравнения формы этой полосы поглощения до и после обработки однозначно следует вывод, о том, что в процессе осветления из шпонов удаляются компоненты со слабыми водородными связями.

Это следует из данных, представленных на рис. 7, где видно, что в результате осветления центр тяжести полосы поглощения смещается в сторону более низких волновых чисел.

Другой очевидный эффект осветления — это уменьшение в шпоне концентрации древесных компонент, имеющих в составе карбонильные группы, которые проявляются в ИК-спектре в виде полос поглощения с максимумом в диапазоне 1743...1733 cm^{-1} . Проявление этого эффекта представлено на врезках (см. рис. 3 и 5). Из литературы [25–35] известно, что вклад в интенсивность этой полосы поглощения могут давать такие компоненты древесины, как алкиловые эфиры (1750...1758 cm^{-1}), ароматические эфиры (1722...1742 cm^{-1}), полилактонная кислота (1706...1714 cm^{-1}), сопряженные кетоны (1680...1683 cm^{-1}) и *p*-замещенные α -ароматические кетоны (1661...1670 cm^{-1}). Декомпозиция фрагмента спектра в обсуждаемом диапазоне волновых чисел по алгоритму, предложенному в работе [25], показала, что все указанные фрагменты имеются в необработанных образцах древесины. Декомпозиции спектров изображены на рис. 8, 9. В табл. 1 приведены результаты декомпозиции обозначенного участка для спектров шпонов четырех типов древесины, откуда видно, что максималь-

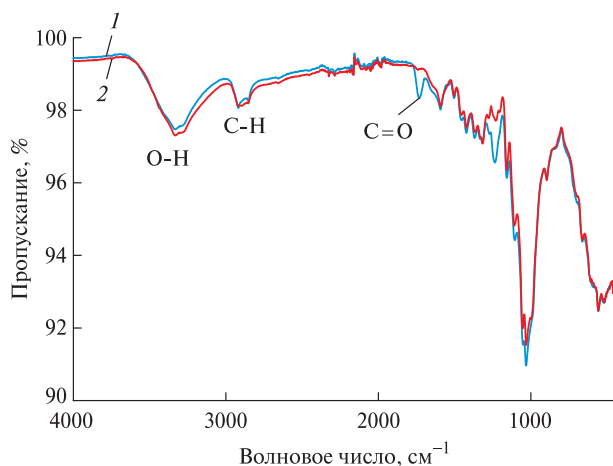


Рис. 3. ИК-спектры шпона бука до (1) и после осветления (2) в диапазоне 4000...500 cm^{-1}

Fig. 3. IR spectra of beech veneer before (1) and after bleaching (2) in the range of 4000...500 cm^{-1}

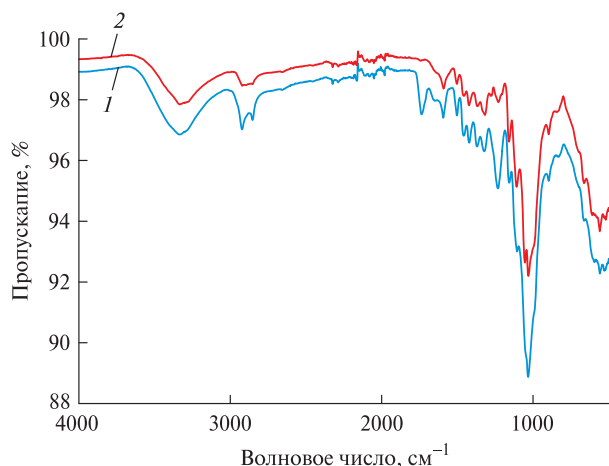


Рис. 5. ИК-спектры шпона клена до (1) и после осветления (2)

Fig. 5. IR spectra of maple veneer before (1) and after bleaching (2)

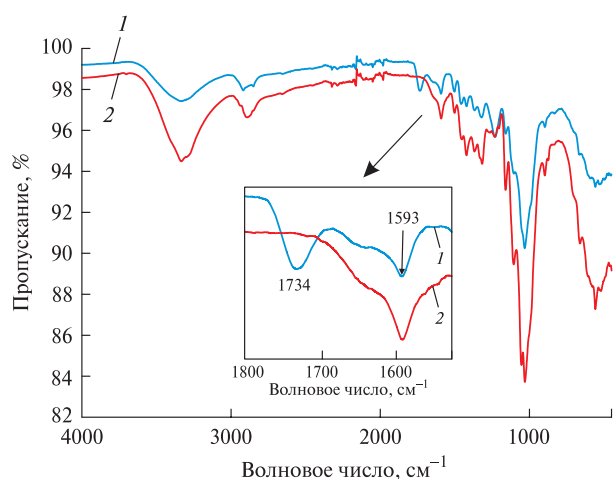


Рис. 4. ИК-спектры шпона дуба до (1) и после осветления (2) (на врезке фрагмент спектров в диапазоне частот 1805...1525 cm^{-1})

Fig. 4. IR spectra of oak veneer before (1) and after bleaching (2) (the inset shows a fragment of the spectra in the range of 1805...1525 cm^{-1})

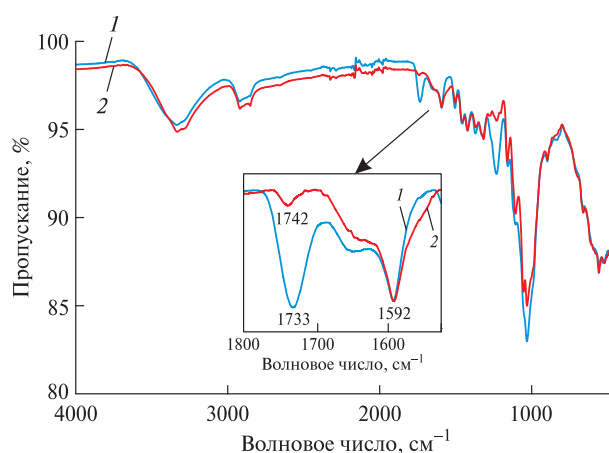


Рис. 6. ИК-спектры шпона ясеня до (1) и после осветления (2) (на врезке фрагмент спектров в диапазоне частот 1805...1525 cm^{-1} , нормированный на интенсивность пика при 1592 cm^{-1})

Fig. 6. IR spectra of ash veneer before (1) and after bleaching (2) (the inset shows a fragment of the spectra in the range of 1805...1525 cm^{-1} , normalized to the intensity of the peak at 1592 cm^{-1})

ную интенсивность в спектрах всех четырех образцов имеет пик 1, а минимальную — пик 5 (для дуба, клена и ясеня) или пик 4 (для бука). После обработки концентрация карбонилсодержащих компонентов резко уменьшается — в основном благодаря компонентам, которые в ИК-спектрах проявляются при частотах выше 1700 cm^{-1} . В осветленном дубовом шпоне эфирные и кислотные карбонилсодержащие компоненты практически полностью исчезают. В тех случаях, где эти компоненты сохраняются, относительные вклады карбонильных групп

разных сортов изменяются (см. табл. 1). Расположение компонент было зафиксировано при таких волновых числах, как 1754 (1), 1732 (2), 1710 (3), 1681 (4) и 1666 (5) cm^{-1} (см. текст). В круглых скобках указан номер пика, соответствующий номеру пика на рис. 8, декомпозиции выполнена согласно методике [25].

В работе [36] предложена методика оценки содержания лигнина в древесине с использованием отношения интенсивностей полос поглощения приблизительно при частотах 1505 и 1157 cm^{-1} согласно уравнению

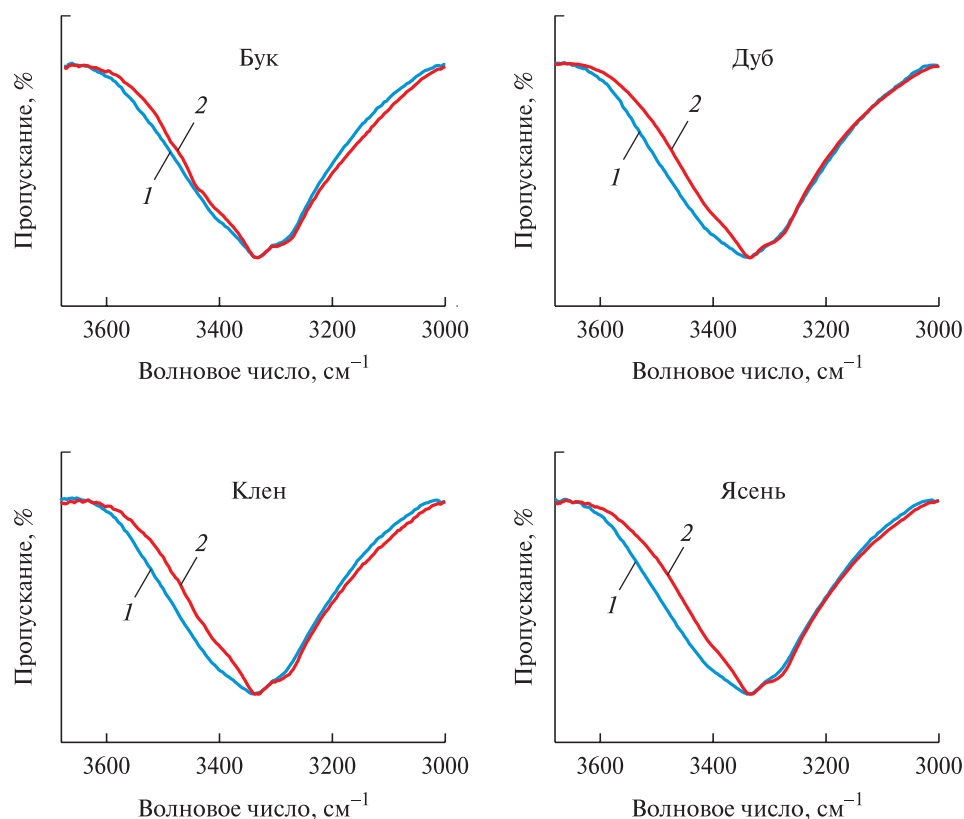


Рис. 7. Полосы поглощения, обусловленные валентными колебаниями связей О-Н, на ИК-спектрах бука, дуба, клена и ясеня до (1) и после (2) процедуры осветления

Fig. 7. Absorption bands due to stretching vibrations of O-H bonds in the IR spectra of beech, oak, maple and ash before (1) and after (2) the bleaching procedure

Т а б л и ц а 1

**Относительные интенсивности (в процентах)
компонент Гаусса — Лоренца**

Relative intensities (in per cent) of Gauss — Lorentz components

Образец шпона	Пик 1	Пик 2	Пик 3	Пик 4	Пик 5
Бук исходный	29,3	28,6	21,6	9,8	10,8
Дуб исходный	37,9	24,6	16,8	11,6	9,1
Клен исходный	36,5	24,0	19,4	10,1	9,9
Ясень исходный	37,7	26,2	15,9	10,8	9,4
Бук после обработки	1,6	9,0	0,1	8,0	81,3
Дуб после обработки	2,7	0,1	0,0	6,5	90,7
Клен после обработки	7,9	2,5	0,2	8,7	80,6
Ясень после обработки	12,3	3,0	0,3	6,9	77,6

$$\text{Lignin} = 10,7 + 76,3 (I_{1505}/I_{1157}),$$

где Lignin — содержание лигнина в процентах;

I_{1505} — интенсивность полосы поглощения на частоте 1505 см⁻¹;

I_{1157} — интенсивность полосы поглощения на частоте 1157 см⁻¹.

В случае исходных образцов такая оценка дает несколько завышенные результаты (табл. 2), если судить по общепринятым представлениям о том, что содержание лигнина в древесине составляет 15...20 % [37]. Однако оценка указывает однозначно на то, что описанная процедура осветления приводит к уменьшению

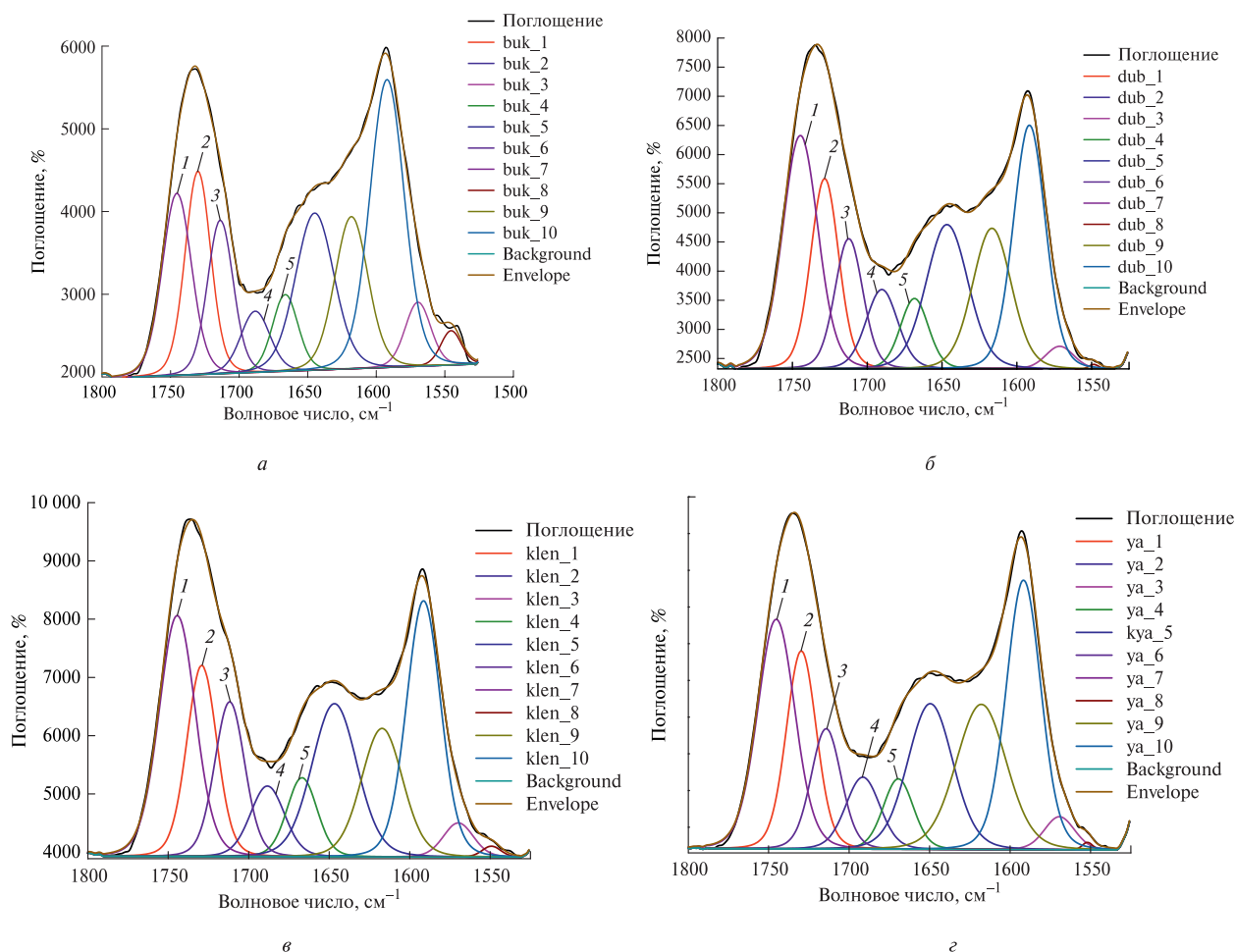


Рис. 8. Декомпозиции фрагмента ИК-спектров исследуемых образцов до осветляющей процедуры в области валентных колебаний связей C=O, проведенный по методике, предложенной в работе [25] (см табл. 1). Спектры представлены после вычитания фона в режиме «Поглощение»: *а* — бук; *б* — дуб; *в* — клен; *г* — ясень

Fig. 8. Decomposition of a fragment of IR spectra of the studied samples before the brightening procedure in the valence vibrations of C=O bonds, carried out according to the technique proposed in [25] (see Table 1). The spectra are presented after background subtraction in the «Absorption» mode: *a* — beech; *б* — oak; *в* — maple; *г* — ash

содержания лигнина в древесине. Более того, она соответствует другим оценкам, согласно которым максимальная потеря лигнина происходит у шпона из дуба, а минимальна — у шпона из ясеня.

Интересно было сравнить оценку из ИК-спектров с результатами определения остаточного лигнина по Класону [38–39], которая была проведена для букового шпона согласно ГОСТ 11960–79 «Полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения лигнина». Она оказалась равной 3,75 %. Оценки практически совпали (см. табл. 2). Следовательно, оценка из ИК-спектров правильно отражает тенденцию делигнификации, а вследствие своей простоты может быть рекомендована для широкого использования.

Данные табл. 2 позволяют сделать вывод о том, что предложенная методика оценки содержания лигнина с использованием ИК-спектроскопии достаточно точная и надежная. В частности, с ее помощью появляется возможность быстро и эффективно оценить степень удаления лигнина из древесины без проведения сложных химических анализов, что особенно важно при разработке новых методов обработки древесины, таких как отбеливание или химическая модификация, где требуется контроль содержания лигнина на различных этапах процесса.

Кроме того, полученные результаты подтверждают эффективность применения данной методики для оценки качества древесины различного происхождения, включая такие твердые породы, как дуб и бук, а также мягкие, как, ясень.

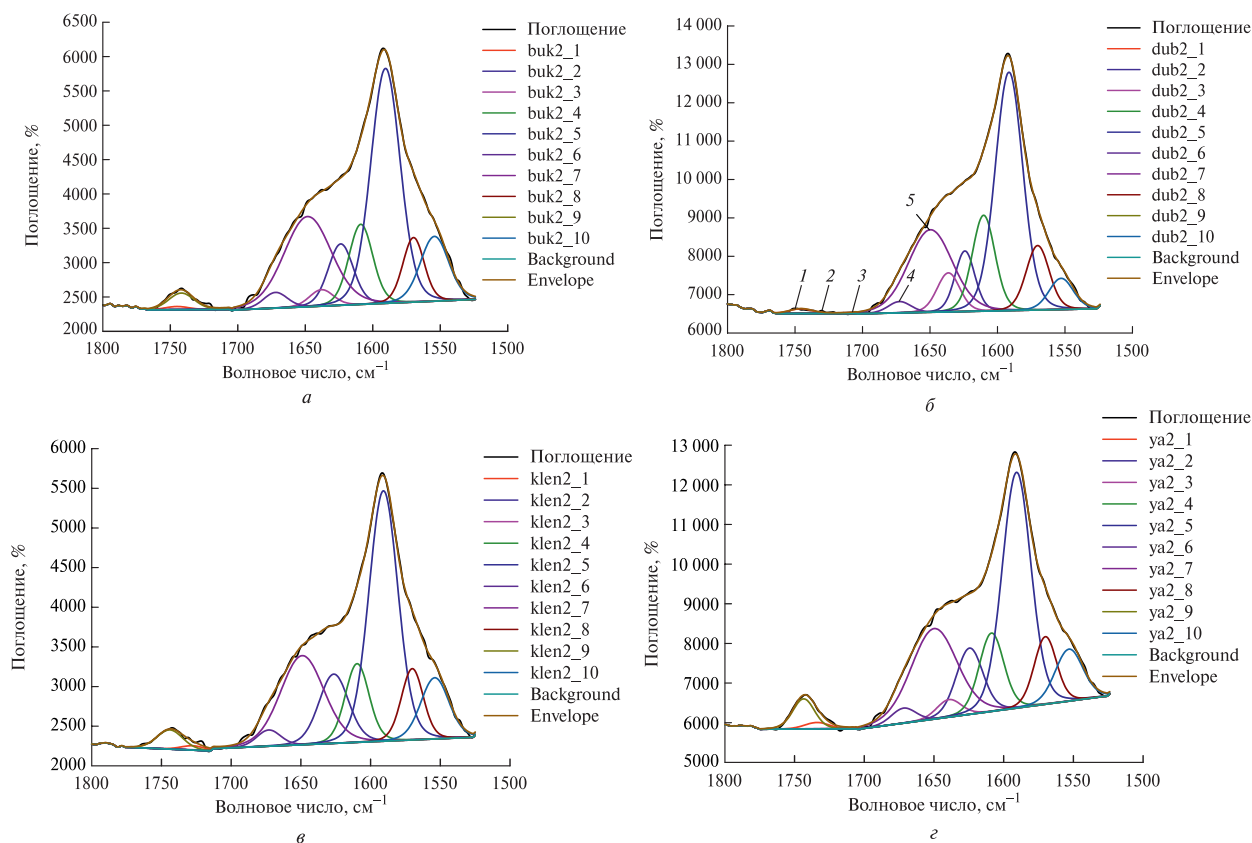


Рис. 9. Декомпозиции фрагмента ИК-спектров исследуемых образцов после осветляющей процедуры в области валентных колебаний связей C=O, проведенный по методике, предложенной в работе [25] (см табл. 1). Спектры представлены после вычитания фона в режиме «Поглощение». Нумерация компонент на всех спектрах такая же как на спектре дуба: *а* — бук; *б* — дуб; *в* — клен; *г* — ясень

Fig. 9. Decomposition of the fragment of IR spectra of the studied samples after the brightening procedure in the valence vibrations of C=O bonds, carried out according to the technique proposed in [25] (see Table 1). The spectra are presented after background subtraction in the «Absorption» mode. The numbering of components in all spectra is the same as in the spectrum of oak: *a* — beech; *б* — oak; *в* — maple; *г* — ash

Т а б л и ц а 2

Положение и интенсивности полос поглощения при частотах приблизительно 1505 и 1157 см⁻¹ в ИК-спектрах исследуемых образцов и содержание лигнина

Position and intensity of absorption bands at approximately 1505 and 1157 cm⁻¹ in the IR spectra of the studied samples and lignin content

Шпон	Этапы осветления	1505 см ⁻¹	1157 см ⁻¹	I ₁₅₀₅ /I ₁₁₅₇	Лигнин, %
Бук	I	1503	1159	0,179	24,4
	II	1503	1159	0,130	20,6
Дуб	I	1502	1160	0,474	46,9
	II	1502	1160	0,062	15,4
Клен	I	1503	1158	0,378	39,5
	II	1503	1159	0,167	23,4
Ясень	I	1505	1158	0,414	42,3
	II	1503	1160	0,146	21,8
Примечание. I — до осветления; II — после осветления.					

Таким образом, данная методика может найти широкое применение в деревообрабатывающей промышленности, позволяя оптимизировать процессы обработки древесины и улучшать качество конечной продукции.

Выводы

Описанный процесс осветления существенно изменяет ИК-спектры шпонов бука, дуба, клена и ясеня. В результате осветления центр тяжести полосы поглощения, обусловленной валентными колебаниями связей О-Н, смещается в сторону более низких волновых чисел. Это означает, что при осветлении из шпона удаляются компоненты со слабыми водородными связями. Подтвержден известный из литературы эффект уменьшения в осветленной древесине концентрации компонент, имеющих в своем составе карбонильные группы, которые проявляются в ИК-спектре в виде полос поглощения с максимумом при частотах $1743 \dots 1733 \text{ см}^{-1}$. Проведена декомпозиция этой полосы поглощения на компоненты, связанные с ароматическими и алифатическими эфирами, полилактуроновой кислотой, сопряженными и *p*-замещенными α -ароматическими кетонами, с определением относительных долей этих компонент как в исходном, так и в осветленном состоянии для четырех типов шпонов. С использованием интенсивностей отдельных полос поглощения проведены оценки содержания лигнина в древесине. Установлено, что оценка выделившегося лигнина при описанном способе осветления по Класону практически совпадает с такой, проведенной на основе измерения интенсивности пиков при частотах 1505 и 1157 см^{-1} в ИК-спектрах.

Прозрачная древесина не уступает по показателям прозрачности, экологичности и токсичности оргстеклу, поливинилхлориду, поликарбонату/пропилену. Прозрачная древесина при этом уступает стеклу в прозрачности, а ее производство отличается дороговизной. Тем не менее многофункциональность прозрачной древесины, ее теплозащитные и энергосберегающие свойства, вызывают проведение дальнейших работ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (номера государственной регистрации 124013000757-0, 124013000692-4 и 124020800013-7) с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования Федерального исследовательского

центра ПХФ и МХ РАН и Федерального исследовательского центра физики твердого тела РАН в Черноголовке.

Список литературы / References

- [1] Li Y., Fu Q., Yang X., Berglund L. Transparent wood for functional and structural applications // *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2018, v. 376, p. 20170182.
- [2] Li Y., Vasileva E., Sychugov I., Popov S., Berglund L. Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges // *Adv. Opt. Mater.*, 2018, v. 6, p. 1800059.
- [3] Zhu S., Kumar Biswas S., Qiu Z., Yue Y., Fu Q., Jiang F., Han J. Transparent wood-based functional materials via a top-down approach // *Prog. Mater. Sci.*, 2023, v. 132, p. 101025.
- [4] Kumar A., Jyske T., Petrič M. Delignified Wood from Understanding the Hierarchically Aligned Cellulosic Structures to Creating Novel Functional Materials: A Review // *Adv. Sustain. Syst.*, 2021, v. 5, p. 2000251.
- [5] Hu X. Fabrication, Functionalities and Applications of Transparent Wood: A Review // *Adv. Funct. Mater.*, 2023, v. 33, p. 2303278.
- [6] Wan C., Liu X., Huang Q., Cheng W., Su J., Wu Y. A Brief Review of Transparent Wood: Synthetic Strategy, Functionalization and Applications // *Curr. Org. Synth.*, 2021, v. 18, pp. 615–623.
- [7] Pandit K.H., Goswami A.D., Holkar C.R., Pinjari D.V. A review on recent developments in transparent wood: sustainable alternative to glass // *Biomass Conversion and Biorefinery*. Published by Springer Nature, 2024. DOI: 0.1007/s13399-024-05523-3
- [8] Jele T.B., Andrew J., John M. Sithole Engineered transparent wood composites: a review // *Cellulose*, 2023, v. 30, pp. 5447–5471.
- [9] Mariani A., Malucelli G. Transparent Wood-Based Materials: Current State-of-the-Art and Future Perspectives // *Materials*, 2022, v. 15, p. 9069. DOI: 10.3390/ma15249069
- [10] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Хвалько Д.Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I // *Лесной вестник/Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 3. С. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Khval'ko D.D. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. V. Drevesnaya tsellyuloza kak prirodnnoe polimernoe syr'e. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [11] Fink S. Transparent wood – A new approach in the functional study of wood structure // *Holzforschung*, 1992, v. 46, no. 5, pp. 403–408. DOI: 10.1515/hfsg.1992.46.5.403
- [12] Jia C., Li T., Chen C., Dai J., Kierzewski I. M., Song J. Scalable, anisotropic transparent paper directly from wood for light management in solar cells // *Nano Energy*, 2017, v. 36, pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.04.059

- [13] Tang Q., Fang L., Wang Y., Zou M., Guo W. Anisotropic flexible transparent films from remaining wood microstructures for screen protection and AgNW conductive substrate // *Nanoscale*, 2018, v. 10, pp. 4344–4353. DOI: 10.1039/c7nr08367j
- [14] Vasileva E., Li Y., Sychugov I., Mensi M., Berglund L., Popov S. Lasing from organic dye molecules embedded in transparent wood. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, v. 5, p. 1700057. DOI: 10.1002/adom.201700057
- [15] Gan W., Xiao S., Gao L., Gao R., Li J., Zhan, X. Luminescent and transparent wood composites fabricated by poly(methyl methacrylate) and γ -Fe₂O₃@YVO₄:Eu³⁺ nanoparticle impregnation // *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2017, v. 5, pp. 3855–3862. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02985
- [16] Yu Z., Yao Y., Yao J., Zhang L., Chen Z., Gao Y. Transparent wood containing CsxWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications // *J. Mater. Chem. A*, 2017, v. 5, pp. 6019–6024. DOI: 10.1039/C7TA00261K
- [17] Li T., Zhu M., Yang Z., Song J., Dai J., Yao Y. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation // *Adv. Energy Mater.*, 2016, v. 6, p. 1601122. DOI: 10.1002/aenm.201601122
- [18] Xinping Ouyang, Xiangzhen Huang, Tao Ruan, Xueqing Qiu. Microwave-assisted oxidative digestion of lignin with hydrogen peroxide for TOC and color removal. *Water Science & Technology*, 2015, v. 71, no. 3, pp. 390–398. DOI: 10.2166/wst.2014.535
- [19] Liu Y., Chen G., Zhu J., Chen W., Hu W., Liu Y., Fang Z. Preparation, structure and properties of strong, transparent cellulose materials // *Chem. J. Chin. Univ.*, 2018, v. 39, pp. 196–201.
- [20] Wu Y., Wu J., Yang F., Tang C., Huang Q. Effect of H₂O₂ Bleaching Treatment on the Properties of Finished Transparent Wood // *Polymers*, 2019, v. 11, p. 776. DOI: 10.3390/polym11050776
- [21] Chen X., Ge-Zhang S., Han Y., Yang H., Ou-Yang W., Zhu H., Hao J., Wang J. Ultraviolet-Assisted Modified Delignified Wood with High Transparency // *Appl. Sci.*, 2022, v. 12, p. 7406. DOI: 10.3390/app12157406
- [22] Moore A.K., Owen N.L. Infrared Spectroscopic Studies of Solid Wood // *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2001, v. 36, pp. 65–86.
- [23] Moosavinejad S.M., Madhoushi M., Vakili M., Rasouli D. Evaluation of degradation in chemical compounds of wood in historical buildings using FT-IR and FT-Raman vibrational spectroscopy // *Maderas-Cienc. Tecnol.*, 2019, v. 21.
- [24] Le D.M., Nielsen A.D., Sørensen H.R., Meyer A.S. Characterisation of Authentic Lignin Biorefinery Samples by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Determination of the Chemical Formula for Lignin // *Bioenergy Res.*, 2017, v. 10, pp. 1025–1035.
- [25] Pappas C., Rodis P., Tarantilis P.A., Polissiou, M. Prediction of the pH in Wood by Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy // *App. Spectroscopy*, 1999, v. 53, pp. 805–809.
- [26] Evans P.A. Differentiating «hard» from «soft» woods using Fourier transform infrared and Fourier transform spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 1991, v. 47(9–10), pp. 1441–1447. DOI: 10.1016/0584-8539(91)80235-b
- [27] Sene C., McCann M.C., Wilson R.H., Grinter R. Fourier-Transform Raman and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (An Investigation of Five Higher Plant Cell Walls and Their Components) // *Plant Physiology*, 1994, v. 106(4), pp. 1623–1631. DOI: 10.1104/pp.106.4.1623
- [28] Costantino H.R., Griebenow K., Langer R., Klibanov A.M. On the pH memory of lyophilized compounds containing protein functional groups. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, v. 53(3), pp. 345–348. DOI: 10.1002/(sici)1097-0290(19970205)53:3<345::aid-bit14>3.0.co;2-j
- [29] Chatjigakis A.K., Pappas C., Proxenia N., Kalantzi O., Rodis P., Polissiou M. FT-IR spectroscopic determination of the degree of esterification of cell wall pectins from stored peaches and correlation to textural changes. *Carbohydrate Polymers*, 1998, v. 37(4), pp. 395–408. DOI: 10.1016/s0144-8617(98)00057-5
- [30] Broda M., Popescu C.-M. The natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes — An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, v. 209, pp. 280–287. DOI: 10.1016/j.saa.2018.10.057
- [31] Durmaz S., Özgenç Ö., Boyacı İ. H., Yıldız Ü.C., Erişir E. Examination of the chemical changes in spruce wood degraded by brown-rot fungi using FT-IR and FT-Raman spectroscopy // *Vibrational Spectroscopy*, 2016, v. 85, pp. 202–207. DOI: 10.1016/j.vibspec.2016.04.020
- [32] Åkerholm M., Salmén L. Interactions between wood polymers studied by dynamic FT-IR spectroscopy // *Polymer*, 2001, v. 42(3), pp. 963–969. DOI: 10.1016/s0032-3861(00)00434-1
- [33] Popescu C., Jones D., Kržišnik D., Humar M. Determination of the effectiveness of a combined thermal/chemical wood modification by the use of FT-IR spectroscopy and chemometric methods // *J. of Molecular Structure*, 2019, p. 127133. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.127133
- [34] Bouramdane Y., Fellak S., El Mansouri F., Boukir A. Impact of Natural Degradation on the Aged Lignocellulose Fibers of Moroccan Cedar Softwood: Structural Elucidation by Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) and X-ray Diffraction (XRD). *Fermentation*, 2022, v. 8, p. 698. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120698>
- [35] Yang W., Ma W., Liu X. Evaluation of Deterioration Degree of Archaeological Wood from Luoyang Canal No. 1 Ancient Ship // *Forests*, 2024, v. 15, p. 963. <https://doi.org/10.3390/fl15060963>
- [36] Rodrigues J., Faix O., Pereira H. Determination of lignin content of Eucalyptus globulus wood using FTIR spectroscopy // *Holzforschung*, 1998, v. 52, pp. 46–50.
- [37] Sikora A., Kačík F., Gaff M., Vondrová V., Bubeníková T., Kubovský I. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood // *J. of Wood Science*, 2018, v. 64, pp. 406–416.
- [38] Daniel J. Nicholson, Aaron T. Leavitt, Raymond C. Francis. A three-stage klason method for more accurate determinations of hardwood lignin content // *Cellulose Chem. Technol.*, 2014, v. 48, pp. 53–59.
- [39] Abdelrahman N.S., Galiwango E. Klason Method: An Effective Method for Isolation of Lignin Fractions from Date Palm Biomass Waste // *J. of Food Process Engineering*, 2018, v. 57, pp. 46–58.

Сведения об авторах

Баскаков Сергей Алексеевич — канд. хим. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», sabaskakov@gmail.com

Баскакова Юлия Владимировна — канд. хим. наук, мл. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», yuvl@icp.ac.ru

Жарковская Анастасия Вадимовна — инженер, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук»

Красникова Светлана Сергеевна — канд. хим. наук, науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук»

Кабачков Евгений Николаевич — науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», ФГБУН «Федеральный исследовательский центр физики твердого тела Российской академии наук», Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), kabachkov@issp.ac.ru

Шульга Юрий Макарович — канд. хим. наук, вед. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», yshulga@gmail.com

Поступила в редакцию 03.06.2024.

Одобрено после рецензирования 22.11.2024.

Принята к публикации 17.02.2025.

BLEACHING PROCEDURE OF BEECH, OAK, MAPLE AND ASH VENEERS AND ITS EFFECT ON IR SPECTRA

S.A. Baskakov¹✉, Yu.V. Baskakova¹, A.V. Zharkovskaya¹,
S.S. Krasnikova¹, E.N. Kabachkov^{1, 2}, Yu.M. Shulga¹

¹Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Semenova av., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

²Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, 2, Academician Osipyan st., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

sabaskakov@gmail.com

Bleached or transparent wood can ideally be used to replace window glass, as it has greater impact strength, sufficient transparency and low specific gravity. There are also reports of the decorative appeal of bleached wood. Usually, bleaching is carried out using chemical reagents containing chlorites or sulfites. In this work, we used a more environmentally friendly reagent for bleaching such as hydrogen peroxide. The bleaching procedure was carried out for beech, oak, maple and ash veneers. The procedures for impregnating the veneer with epoxy resin and determining the Klason lignin are also described. For all the samples studied, it was found that after bleaching and drying, a decrease in size (shrinkage) occurs in the direction perpendicular to the growth direction. For the first time, using IR spectroscopy, it was found that such bleaching removes components with weak hydrogen bonds from the veneer. Using the decomposition of the IR spectrum fragment in the region of 1800...1500 cm⁻¹, the absorption bands of the stretching vibrations of C=O bonds were isolated and the effect of reducing the concentration of components containing carbonyl groups in the bleached wood was confirmed. It was shown that the efficiency of lignin removal depends significantly on the wood type.

Keywords: veneer, transparent wood, IR spectra, beech, oak, maple, ash

Suggested citation: Baskakov S.A., Baskakova Yu.V., Zharkovskaya A.V., Krasnikova S.S., Kabachkov E.N., Shul'ga Yu.M. *Protседura osvetleniya bukovogo, dubovogo, klenovogo i yasenevogo shponov i ee vliyanie na IK-spektry* [Bleaching procedure of beech, oak, maple and ash veneers and its effect on IR spectra]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 82–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-82-93

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment (state registration numbers 124013000757-0, 124013000692-4 and 124020800013-7) using the equipment of the Analytical Centre for Collective Use of the Federal Research Centre of PCF and MH RAS and the Federal Research Centre for Solid State Physics RAS in Chernogolovka.

Authors' information

Baskakov Sergey Alekseevich✉ — Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, sabaskakov@gmail.com

Baskakova Yuliya Vladimirovna — Cand. Sci. (Chem.), Junior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, ybaskakova@yandex.ru

Zharkovskaya Anastasiya Vadimovna — Engineer, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, alperovich.av@phystech.edu

Krasnikova Svetlana Sergeevna — Cand. Sci. (Chem.), Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, skras27@mail.ru

Kabachkov Evgeny Nikolaevich — Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, kabachkov@issp.ac.ru

Shulga Yuri Makarovich — Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, yshulga@gmail.com

Received 03.06.2024.

Approved after review 22.11.2024.

Accepted for publication 17.02.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest