

Научная статья

УДК 674.8;681.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-164-177

## Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретросооружений

**В.И. Федюков**<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID:* [ABC-7222-2021](https://orcid.org/0000-0003-4146-463X),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4146-463X>

**В.Ю. Чернов**, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID:* [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

**М.С. Чернова**, *аспирант*; *ResearcherID:* [X-4073-2019](https://orcid.org/0000-0002-0192-5158),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0192-5158>

**О.В. Цой**, *соискатель*; *ResearcherID:* [ABC-7278-2021](https://orcid.org/0000-0001-8028-2201),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8028-2201>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; [fiv48@mail.ru](mailto:fiv48@mail.ru)<sup>✉</sup>, [ChernovVY@volgatech.net](mailto:ChernovVY@volgatech.net), [ChernovaMS@volgatech.net](mailto:ChernovaMS@volgatech.net), [lelik-ka4@mail.ru](mailto:lelik-ka4@mail.ru)

*Поступила в редакцию 23.11.21 / Одобрена после рецензирования 24.02.22 / Принята к печати 25.02.22*

**Аннотация.** Исследование взаимосвязи акустических и колориметрических показателей ретродревесины хвойных пород имеет важное научное и практическое значение для разработки неразрушающих способов идентификации резонансного материала в элементах старых сооружений с целью выявления дополнительных источников сырья при ограниченности запасов резонансной древесины в лесах. Представлены результаты комплексных дендроакустических и колориметрических исследований древесины ели и сосны. Обнаружено, что уровни RGB для состаренной древесины в аддитивной цветовой модели ниже в среднем на 12 %, чем для свежезаготовленной древесины. Для всех групп образцов состаренной древесины взаимосвязь уровней RGB с акустической постоянной слабая. Также выяснилось, 39 % образцов ели и 23 % образцов заболонной сосны, отобранных из состаренной древесины, можно отнести к резонансной древесине. Таким образом, старые деревянные конструкции из древесины ели и заболони сосны, подлежащие сносу в связи с длительным сроком эксплуатации, представляют большой практический интерес как источник для получения резонансной древесины с уникальными дендроакустическими свойствами. Установлено, в пределах одной породы или части дерева (заболонь, ядро) цвет остается постоянным, а варьирует лишь его оттенок. Несмотря на то, что результаты изучения колориметрических свойств древесины и акустической константы не показали высокий уровень взаимосвязи, исследования в данном направлении являются актуальными. Подобный результат может быть связан с несовершенством методики определения цвета, а именно с необходимостью учета разного количества и параметров годичных слоев, попадающих в измерительное окно колориметра.

**Ключевые слова:** древесина ели, древесина сосны, плотность древесины, акустическая константа, модуль упругости, определение дендроакустических параметров, колориметрия, RGB аддитивная цветровая модель

*Для цитирования:* Федюков В.И., Чернов В.Ю., Чернова М.С., Цой О.В. Резонансные акустические и колориметрические характеристики древесины из ретросооружений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 164–177. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-164-177>

Original article

## Resonance Acoustic and Colorimetric Characteristics of Wood in Old Structures

*Vladimir I. Fedyukov*<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABC-7222-2021](https://orcid.org/0000-0003-4146-463X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4146-463X>

*Vasilii Yu. Chernov*, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

*Maria S. Chernova*, Postgraduate Student; ResearcherID: [X-4073-2019](https://orcid.org/0000-0002-0192-5158),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0192-5158>

*Olga V. Tsoy*, External PhD Student; ResearcherID: [ABC-7278-2021](https://orcid.org/0000-0001-8028-2201),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8028-2201>

Volga State University of Technology, pl. Lenin, 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation; [fiv48@mail.ru](mailto:fiv48@mail.ru)<sup>✉</sup>, [ChernovVY@volgatech.net](mailto:ChernovVY@volgatech.net), [ChernovaMS@volgatech.net](mailto:ChernovaMS@volgatech.net), [lelik-ka4@mail.ru](mailto:lelik-ka4@mail.ru)

Received on November 23, 2021 / Approved after reviewing on February 24, 2022 / Accepted on February 25, 2022

**Abstract.** The reserves of resonance wood in the forests of the planet are limited, and in many countries they are completely absent, since it is formed only under certain habitat conditions in some trees with genetically determined properties. Therefore, the investigation of correlation between acoustic and colorimetric parameters of coniferous wood retreads has scientific and practical importance for the development of non-destructive methods of resonance material identification in the elements of old structures to reveal additional sources of raw materials. The article presents the results of complex dendro-acoustic and colorimetric studies of spruce and pine wood. The RGB levels for seasoned wood in the additive color model were found to be on average 12 % lower than those for recently harvested wood. The analysis showed that the interrelation of RGB levels with acoustic constant (K) is weak ( $r^2 < 0.3$ ) for all groups of seasoned wood samples. It was also found out that 39 % of the spruce samples and 23 % of the pine sapwood samples selected from the seasoned wood can be attributed to resonance wood, since their  $K \geq 12 \text{ m}^4/\text{kgs}$ . Thus, old wooden structures made of spruce wood and pine sapwood to be slated for destruction due to the long term operation are of great practical interest as a source for producing resonance wood with unique dendro-acoustic properties. It was found that within the same wood species or part of a tree (sapwood, heartwood), the color remains constant, and only the tone varies. Although the results of the study of wood colorimetric properties and acoustic constant did not show a high level of correlation, the research in this area is still relevant. This result may be due to the imperfection of the color determination technique, namely the need to consider the different number and parameters of the annual rings that fall into the colorimeter measuring window. Overall, the results presented in this paper can be used in the development of new methods of express wood diagnostics in construction.

**Keywords:** spruce wood, pine wood, wood density, acoustic constant, modulus of elasticity, determination of dendroacoustic parameters, colorimetry, RGB additive color model



**For citation:** Fedyukov V.I., Chernov V.Yu., Chernova M.S., Tsoy O.V. Resonance Acoustic and Colorimetric Characteristics of Wood in Old Structures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 164–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-164-177>

### *Введение*

Еще в 60-х гг. прошлого века в некоторых странах проводились исследования, направленные на искусственное старение древесины с целью получения более ценного материала путем внедрения современных технологий: конвективной сушки, сушки в токах сверхвысоких частот и др. [14, 17, 20, 21].

В России также осуществлялись опыты искусственного старения древесины, в том числе резонансной ели как материала для изготовления музыкальных инструментов, например, путем выдерживания древесины при температуре 110–190 °С в течение 10–48 ч и дальнейшей обработки раствором пероксида водорода при концентрации 10–15 % в течение 12–15 ч [1]. Был разработан новый способ обработки древесины ели в токах сверхвысоких частот, позволяющий улучшить ее резонансные свойства [12]. Однако результаты этих исследований пока не нашли практического применения из-за высоких экономических затрат.

Использование выдержанной древесины в старых сооружениях после нормативного срока их эксплуатации сопряжено с меньшими трудозатратами и, как следствие, значительно эффективнее, чем получение сортиментов путем традиционной технологии лесозаготовки и деревообработки, включая сушку, хранение и т. д.

Выдержанная в естественных условиях древесина особенно ценится в производстве музыкальных инструментов. Например, Амати, Страдивари, Гварнери и другие мастера староитальянской школы, а также французские мастера при изготовлении музыкальных инструментов (скрипок) использовали выдержанную в течение не менее 14 лет древесину ели для верхней деки; при отборе этого материала большое значение имел цвет древесины не только как важная эстетическая характеристика, но и как признак акустического качества [3, 12, 18].

Сегодня острый дефицит в резонансной древесине наблюдается, кроме как в производстве музыкальных инструментов, при изготовлении акустических панелей для обшивки внутренних стен зрительных залов театров и консерваторий [13]. Например, по оценке ЮНЕСКО Большой театр в Москве благодаря внутренней акустике вошел в перечень выдающихся творений мирового зодчества. Основная заслуга здесь принадлежит петербургскому архитектору А.К. Кавосу. При проектировании объемной формы зрительного зала он применил принцип устройства скрипки, а для обшивки стен использовал резонансную древесину ели с соответствующими дендроакустическими показателями [5].

Таким образом, исследование акустических и колориметрических показателей древесины имеет не только теоретическое, но и важное практическое значение для устранения дефицита материала при изготовлении музыкальных инструментов и акустических панелей путем разработки неразрушающего способа экспресс-диагностики и отбора резонансного материала в старых сооружениях, подлежащих сносу.

В последние годы появляются научные работы, направленные на выявление технического ресурса ретродревесины хвойных пород в элементах деревянных конструкций для использования и в других областях производства [7].

Резонансная древесина формируется в определенных условиях местопрорастания у некоторых деревьев, что обусловлено их генетикой. Как следствие, запасы такой древесины в лесах планеты ограничены, а во многих странах отсутствуют [12, 15, 16, 19]. В России до 1911 г. музыкальные фабрики использовали в основном заграничное сырье, т. к. считалось, что резонансная древесина формируется только в еловых насаждениях Европы, на территории горных лесов Карпат, Тиролевских и Баварских Альп, в суровых условиях возвышенности и на северных склонах с бедной каменистой почвой. Однако благодаря научным изысканиям профессора Лесного института Н.А. Филиппова было доказано наличие резонансной ели в отечественных лесах [8]. В дальнейшем это было обосновано академиком И.С. Мелеховым тем, что не только горные, но и равнинные типы леса и лесорастительные условия формируют физико-механические, в том числе резонансные, свойства древесины [6].

Более поздние исследования, выполненные в лесах Волжско-Камского региона России, подтвердили эти выводы и уточнили: в наших лесах лучшими условиями для формирования резонансной древесины являются ельники черничные, где произрастают спелые и даже перестойные древостои ели II–III классов бонитета, а в отдельных случаях – ельники травяно-болотные низинного типа увлажнения, включая объекты давней гидролесомелиорации [12].

Физико-механические показатели древесины, включая ее резонансные свойства, во многом предопределены содержанием органических веществ [11, 12]. В отличие от элементного химического состава, относительное содержание органических веществ в древесине одной породы не остается неизменным. Кроме породы на него влияют местоположение исследуемой части древесины в стволе, возраст и условия произрастания дерева [4]. Долгое выдерживание древесины в естественных условиях также оказывает существенное влияние на относительное содержание органических веществ, что вызывает изменение ее физико-механических и акустических свойств [9, 10].

Исследования выдержанной в течение 5–20 лет древесины пород, произрастающих на территории России, выявили небольшое отличие по цветовому тону, т. е. длина волны отражаемого спектра лежит в пределах 578–585 нм, что соответствует желтому участку спектра. Однако наблюдается большое колебание по чистоте и светлоте цвета. Первый показатель изменяется в пределах 30–50 %, а второй в еще большей амплитуде – 20–70 % [11].

Пригодность материала для изготовления деки – основной звукоизлучающей детали струнных и струнно-щипковых музыкальных инструментов – многие мастера оценивают субъективным определением цвета [3]. Поэтому пока нет единого мнения о цвете древесины как визуальном диагностическом признаке акустических свойств: одни мастера предпочитают для деки древесину ели более светлых, белых, а другие – желтых тонов [3, 15].

Даже официальные стандарты предъявляют разные требования к цвету резонансного материала. Например, ТУ 205 РФ 08.866–89 (взамен ГОСТ 6900–83) допускают «желтый приемлемый» цвет древесины ели, а стандарт Польши Р-63 095071 для этой же породы и пихты – «белый»; действующий стандарт ТСИ 15799/12 (Германия) – «однотонно светлый».

Возможно, существующие противоречивые взгляды среди ученых и специалистов музыкального производства вызваны тем, что пока нет объективных научных подтверждений в пользу того или иного цвета резонансной древесины, т. е. не проведено специальных исследований по установлению взаимосвязи между колориметрическими и акустическими параметрами данного материала.

К современным работам в области старения древесины следует отнести исследования швейцарского профессора P. Navi, который изучал древесину хвойных пород, преимущественно ели [17]. Он пришел к выводу, что возможно прогнозировать и контролировать изменения свойств древесины, если рассматривать процесс ее старения как структурные изменения, соответствующие нестабильному стеклообразному состоянию, на основе параметров температуры и давления окружающей среды, а также механических нагрузок и внутренних напряжений. Все эти факторы воздействуют на строительные конструкции из древесины.

После длительной эксплуатации в сооружениях за счет изменения соотношения органических веществ физико-механические свойства древесины стабилизируются, повышаются модуль упругости [9, 10] и резонансные свойства: увеличивается доля лигнина и уменьшается содержание гемицеллюлозной фракции (пентозанов). В то же время состаренная древесина имеет меньшую плотность по сравнению со свежезаготовленной, даже хорошо высушенной древесиной. Главное преимущество музыкальных инструментов, изготовленных из выдержанной в естественных условиях древесины, заключается в обеспечении стабильности издаваемых звуковых спектров при изменении условий внешней среды [11].

Цель работы – получение данных о взаимосвязи акустических и колориметрических показателей выдержанной древесины ели и сосны, которые могут послужить основой для разработки новых методов и устройств неразрушающей экспресс-диагностики резонансных свойств древесины.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследования проводились в условиях Камско-Волжского региона России. Данный регион входит в зону таежных лесов, где еще сохранились запасы резонансной древесины [12].

В качестве объекта исследования выбран бревенчатый дом (рис. 1, *а*), который построен примерно 70 лет назад из древесины ели (*Picea*) и сосны (*Pinus*), в настоящее время он не эксплуатируется. Проведение исследований на одном объекте обусловлено тем, что цель работы заключалась в апробации методик экспресс-диагностики и подтверждении предположения о возможности использования цвета древесины как диагностического признака резонансных свойств ретродревесины.

С четырех сторон дома были выпилены фрагменты (части бревна) длиной по 600 мм (рис. 1, *б*). Из данных фрагментов изготовлены образцы для колориметрических и ультразвуковых исследований (рис. 2). В момент испытаний древесина имела комнатно-сухую влажность, которая определялась стандартным методом (ГОСТ 16483.7–71).





а

б

Рис. 1. Объект исследования (а) и стена после взятия фрагментов для изготовления опытных образцов (б)

Fig. 1. The study object (a) and the wall after removing fragments to make samples (b)



Рис. 2. Последовательность изготовления образцов

Fig. 2. Sequence of samples preparation

*Определение колориметрических показателей древесины.* Подготовленные образцы исследовались на изменение цвета с помощью RGB-модели. Данная модель основана на измерении уровней красного, зеленого и синего цвета как составляющих любого цвета в природе. Ее универсальность заключается в возможности применения как специальных, так и простых компьютерных программ, например MS Paint, для визуализации, обработки, измерения и прогнозирования цвета (колориметрических показателей) поверхностей исследуемых объектов.

Для определения RGB-уровней – уровней красного (R), зеленого (G) и синего (B), составляющих цвета древесины, – использовался колориметр PCE-RGB 2 (PCE Group Co KG, г. Мешед, Германия) (рис. 3).

Рис. 3. Колориметр PCE-RGB 2

Fig. 3. PCE-RGB 2 colorimeter



Измерение проводилось на той стороне образцов, где годовые кольца располагались в радиальном направлении. Разрешающая способность PCE-RGB 2 – 1/1000. На рис. 4 для сравнения приведены фотографии образцов, изготовленных из выдержанной и свежезаготовленной древесины.



Рис. 4. Сопоставление дощечек выдержанной (сверху) и свежей (снизу) древесины ели

Fig. 4. Color comparison of seasoned spruce wood (top) versus recently harvested spruce wood (bottom)

Образцы выдержанной и свежезаготовленной древесины исследовались в одинаковых условиях. Для получения наиболее точных результатов механическая обработка поверхности образцов осуществлялась непосредственно перед исследованием, чтобы исключить случайный фактор – изменение цвета при хранении. Было изготовлено по 15 образцов выдержанной и свежезаготовленной древесины.

Под воздействием внешних факторов (свет, в том числе ультрафиолетовый спектр; температура; ветровой режим; влажность) древесина изменяет свой цвет в первую очередь на поверхности. Поэтому непосредственно перед измерением осуществлялась неглубокая шлифовка измеряемого участка, а для достижения точности и репрезентативности результатов измерения уровней RGB дублировались в 3 точках (рис. 5). Полученные цветовые уровни по каждому образцу усреднялись.

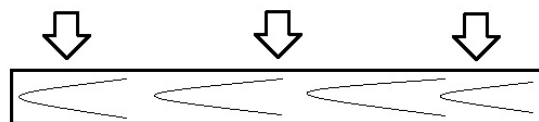


Рис. 5. Схема измерения цвета древесины

Fig. 5. Wood color measurement scheme

Обработка результатов исследований выполнялась методами статистического и регрессионного анализа с помощью программ Statistica и TableCurve 2D.

*Дендроакустические исследования.* Резонансные показатели древесного материала определяются по формуле академика Н.Н. Андреева через акустическую константу [2]:

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} = \frac{c}{\rho},$$

где  $E$  – динамический модуль упругости, МПа;  $\rho$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука в древесине, м/с.

Исследования выполнялись ультразвуковым способом с помощью прибора УК-14 П по стандартной методике, которая заключается в предварительном кондиционировании древесины до влажности 12 % и последующем определении ее плотности стереометрическим методом (ГОСТ 16483.1–84). Схема ультразвуковых исследований стандартных образцов представлена в работе [12].

*Результаты исследования и их обсуждение*

Средние расчетные значения акустической константы и уровней RGB по каждой группе образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Соотнесение результатов исследования колориметрических характеристик и акустической константы выдержанной и свежезаготовленной древесины**  
**The research results of colorimetric characteristics (RGB) and acoustic constant (K) of seasoned and recently harvested wood**

Образец древесины	R	G	B	K, м <sup>4</sup> /(кг · с)
Выдержанная ель	0,866	0,766	0,616	11,527
Свежезаготовленная ель	0,951	0,858	0,714	9,500
Выдержанная заболонная сосна	0,839	0,747	0,578	10,486
Свежезаготовленная заболонная сосна	0,866	0,740	0,572	10,080
Выдержанная ядровая сосна	0,751	0,621	0,474	9,963
Свежезаготовленная ядровая сосна	0,834	0,709	0,546	10,340

Статистические показатели результатов исследования акустической константы представлены в табл. 2 и на рис. 6, а составляющих уровней цветов (RGB) – в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 2

**Статистические показатели результатов исследования акустической константы**  
**Main statistics on acoustic constant**

Образец древесины	Объем выборки, шт.	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
Выдержанная ель	15	11,60	11,39	10,42	13,23	0,614	0,784
Свежезаготовленная ель	5	9,51	9,50	9,23	9,80	0,059	0,244
Выдержанная заболонная сосна	15	10,49	10,89	7,70	12,20	2,223	1,491
Свежезаготовленная заболонная сосна	5	10,10	10,00	9,89	10,52	0,064	0,253
Выдержанная ядровая сосна	30	10,00	10,30	7,73	11,77	1,442	1,201
Свежезаготовленная ядровая сосна	5	10,32	10,21	9,86	10,81	0,163	0,403

Наличие резонансных свойств у ретродревеси́ны сосны закономерно, так как и в свежезаготовленном состоянии она обладает, наравне с древеси́ной ели, достаточно высокой скоростью звукопроводимости вдоль волокон древесины: 5360 и 5630 м/с в среднем для сосны и ели соответственно [11]. Подтверждением резонансных свойств древесины сосны является и тот исторический факт, что в числе первых сделанных Страдивари скрипок есть образцы не только из древесины ели, но и из древесины сосны [3].



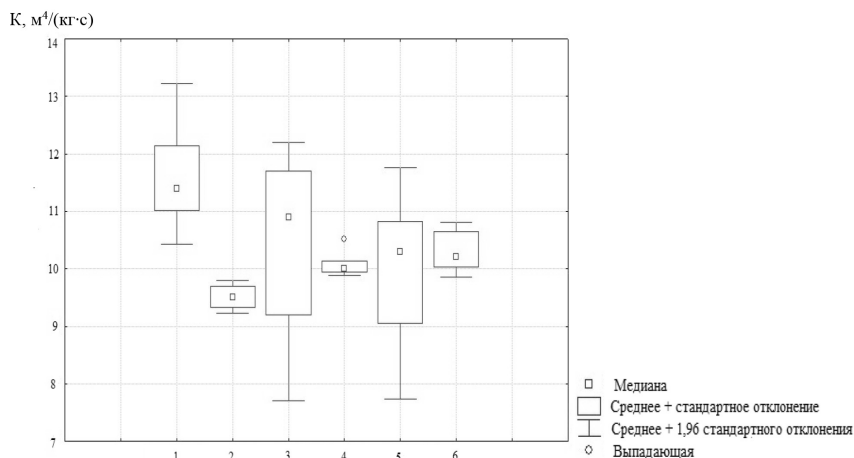


Рис. 6. Диаграмма размаха акустической константы (1, 2 – выдержанная и свежезаготовленная древесина ели соответственно; 3, 4, 5, 6 – выдержанная заболонная, свежезаготовленная заболонная, выдержанная ядровая и свежезаготовленная ядровая древесина сосны соответственно)

Fig. 6. Acoustic constant box-plot: 1 – seasoned spruce wood; 2 – recently harvested spruce wood; 3 – seasoned pine sapwood; 4 – recently harvested pine sapwood; 5 – seasoned pine heartwood; 6 – recently harvested pine heartwood

Таблица 3

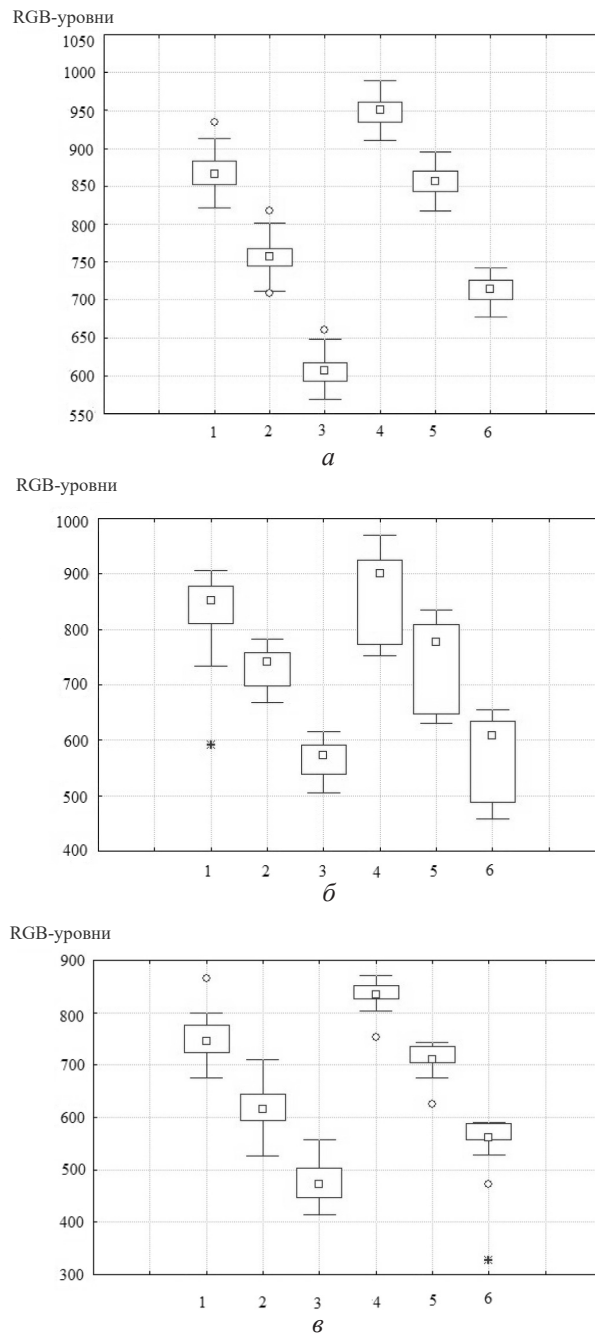
**Статистические показатели результатов исследования составляющих цветов (RGB-уровней)**

**Main statistics on RGB levels**

Образец древесины	Составляющая цвета	Объем выборки, шт.	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
Выдержанная ель	Красная	39	0,868	0,867	0,822	0,934	0,641	25
	Зеленая		0,757	0,757	0,709	0,818	0,627	25
	Синяя		0,606	0,606	0,569	0,661	0,471	22
Свежезаготовленная ель	Красная	15	0,951	0,951	0,910	0,990	0,568	24
	Зеленая		0,858	0,856	0,818	0,896	0,539	23
	Синяя		0,714	0,714	0,678	0,743	0,386	20
Выдержанная заболонная сосна	Красная	39	0,839	0,852	0,591	0,907	3,083	56
	Зеленая		0,730	0,741	0,669	0,782	1,198	35
	Синяя		0,569	0,573	0,506	0,616	0,993	32
Свежезаготовленная заболонная сосна	Красная	15	0,866	0,900	0,752	0,970	5,749	76
	Зеленая		0,740	0,778	0,630	0,836	5,966	77
	Синяя		0,572	0,609	0,458	0,655	5,588	75
Выдержанная ядровая сосна	Красная	90	0,749	0,746	0,675	0,865	1,121	34
	Зеленая		0,618	0,616	0,526	0,711	1,183	34
	Синяя		0,473	0,472	0,414	0,557	1,130	34
Свежезаготовленная ядровая сосна	Красная	15	0,834	0,835	0,754	0,871	0,896	30
	Зеленая		0,709	0,710	0,626	0,744	0,925	30
	Синяя		0,546	0,561	0,328	0,591	4,560	68

Рис. 7. Диаграмма размаха уровней RGB: *a* – для выдержанной и свежезаготовленной древесины ели; *b* – для выдержанной и свежезаготовленной заболонной древесины сосны; *в* – для выдержанной и свежезаготовленной ядровой древесины сосны,  $\times 10^{-3}$  (1, 2, 3 – красная, зеленая и синяя составляющие цвета выдержанной древесины соответственно; 4, 5, 6 – красная, зеленая и синяя составляющие цвета свежезаготовленной древесины). Условные обозначения – см. рис. 6

Fig. 7. RGB levels box-plot: *a* – for seasoned and recently harvested spruce wood; *b* – for seasoned and recently harvested pine sapwood; *в* – for seasoned and recently harvested pine heartwood,  $\times 10^{-3}$  (1, 2, 3 – red, green and blue color components of seasoned wood, respectively; 4, 5, 6 – red, green and blue color components of recently harvested wood, respectively). For the legend, see fig. 6



Из табл. 3 видна существенно более высокая вариативность и, как следствие, большее стандартное отклонение измеренных RGB-уровней свежезаготовленной заболонной древесины сосны по сравнению с выдержанной и остальными образцами. Исследования проводились при одних и тех же условиях, по одной методике и одним средством измерения, поэтому вариативность цвета свежезаготовленной древесины в заболонной части следует отнести к природным факторам (место произрастания, грибное поражение и т. д.). Возможно, на это также оказало влияние различие во времени заготовки и в сроке складирования (хранения) лесоматериалов, из которых были получены об-

разцы. Для установления истинных причин вариативности цвета необходимо проведение отдельных исследований, например работ, подобных проведенной нами, в других регионах с дальнейшим сравнением полученных результатов при учете основных природно-климатических факторов. Кроме того, возможно изучение выдержанной древесины из разных стен сооружения, испытывающих неодинаковое систематическое влияние ветрового, температурно-влажностного режимов и солнечной радиации в зависимости от расположения относительно сторон света.

Измерения цвета выполнены на чистых образцах. Однако известно, что в процессе эксплуатации поверхностные слои древесины меняют цвет. Во-первых, на это влияют естественные факторы (ультрафиолетовые лучи, влага и т. д.). Для установления здесь точных закономерностей необходимо в первую очередь выполнить широкие исследования по установлению степени влияния различных естественных факторов на цвет свежезаготовленной древесины, так как цвета, приобретенные выдержанной древесиной в процессе эксплуатации, базируются на цветовых показателях свежезаготовленной древесины и изменяются относительно их. Во-вторых, изменение цвета древесины происходит вследствие ее дополнительной обработки (покраска, пропитка, облицовка и т. д.) для увеличения срока эксплуатации деревянных конструкций и придания им эстетических свойств. В этом случае проблема экспресс-измерения цвета может быть решена путем отбора образца из деревянного конструктивного элемента или – при необходимости неразрушающего контроля – локального снятия поверхностного слоя древесины определенной толщины ручными или электрическими инструментами.

*Акустическая константа.* Все образцы выдержанной древесины имеют слабую связь ( $r^2 < 0,3$ ) акустической константы с RGB-уровнями. Для свежезаготовленной древесины уровень корреляции между этими показателями выше и лежит в интервале  $r^2 = 0,35 \dots 0,5$ .

При установлении цвета образцов в измерительное окно прибора попадало несколько ранних и поздних зон годичных слоев. Следовательно, результаты измерений RGB-уровней представляют усредненные величины по ранней и поздней зонам годичных слоев древесины. Для подтверждения этого предположения на специально подготовленных образцах были проведены исследования цвета отдельно поздней и ранней зон годичных слоев. Например, для одного из образцов содержание составляющих цвета (R/G/B) по ранней зоне годичных слоев составляет 0,812/0,710/0,570, по поздней – 0,692/0,568/ 0,414; а среднее по образцу – 0,740/0,630/0,478. К резонансной древесине ( $K \geq 12 \text{ м}^4/(\text{кг} \cdot \text{с})$ ) было отнесено 5 из 13 (39 %) образцов ели, 3 из 13 (23 %) образцов заболонной части сосны. Остальные образцы показали значительно меньшие значения акустической константы.

Анализируя результаты исследования выдержанной древесины ели, заболонной и ядровой древесины сосны, можно сделать вывод, что древесина ели имеет более высокие значения акустической константы. Меньшие значения у заболонной части древесины сосны и самые низкие – ядровая часть древесины сосны. Для свежезаготовленной древесины прослеживается обратная относительно представленной выше закономерность.

*Колориметрические показатели.* RGB-уровни для всех исследованных образцов выдержанной древесины ниже по сравнению со свежезаготовленной (рис. 7). В табл. 4 представлена разница по RGB-составляющим цвета для образцов из выдержанной древесины.

Таблица 4

**Анализ составляющих цвета выдержанной древесины ели и сосны**  
**Analysis of the color components of seasoned spruce and pine wood**

Образец	R	G	B	Среднее
	% от максимального значения			
Древесина ели	91	88	85	88
Заболонная древесина сосны	97	99	100	99
Ядровая древесина сосны	90	87	87	88

Таким образом, с течением времени исследованная древесина ели и сосны стала темнее, а уровни составляющих цвета уменьшились примерно на 12 %.

Изменение RGB-уровней образцов (рис. 7) происходит практически равномерно и одинаково, поэтому можно утверждать, что с течением времени цвет остается тем же, меняется только оттенок – от светлого до темного. Это связано с уменьшением в процессе старения древесины количества целлюлозосодержащих веществ белого цвета, их распадом с образованием гуминовых темноокрашивающих веществ [10]. Схожие процессы протекают при термической модификации древесины [14, 15].

Существенный по величине разброс экспериментальных колориметрических данных свежезаготовленной древесины может свидетельствовать о высокой градации уровней RGB аддитивной цветовой модели у разных образцов, связанной с особенностями биологического и экологического происхождения самой древесины.

#### *Заключение*

В данной работе было экспериментально подтверждено, что ретродревесина хвойных пород в элементах древесной конструкции, находящейся на территории Приволжья, отличается от свежезаготовленной древесины лучшими дендроакустическими свойствами.

Выявлена природная вариативность акустических показателей. Не вся древесина ели и сосны, задействованная в старом сооружении, имеет резонансные свойства. По исследуемому объекту лишь 39 % образцов древесины ели и 23 % образцов древесины сосны заболонной части ствола в соответствии с выявленной акустической константой отнесены к резонансной древесине. Следовательно, долгое выдерживание древесины в сооружениях, расположенных на территории Приволжья, способствует сохранению и улучшению резонансных свойств (повышение жесткости и стабильности физико-механических свойств) части древесины.

Колориметрические исследования позволили установить, что цвет древесины вне зависимости от выдержки в рамках одной породы или части дерева (заболонь, ядро) остается постоянным, варьируется лишь его оттенок. У старой ели и ядровой части сосны оттенок древесины темнее вследствие естественных химических процессов, проходящих во время ее эксплуатации. Уровни RGB аддитивной цветовой модели выдержанной древесины ниже в среднем на 12 %, чем у свежезаготовленной.

Полученные данные о корреляции акустической константы и цветовых показателей выдержанной древесины ( $r^2 < 0,3$ ) говорят о слабой взаимосвязи акустических и колориметрических показателей выдержанной древесины. Таким образом, колориметрический метод, применяемый путем прямых измерений на поверхности древесины, является недостаточно точным, особенно в качестве косвенного способа определения резонансных свойств древесины. Однако данное утверждение требует дополнительной проверки посредством углубленных исследований большего количества сооружений, совершенствования методики оценки цветовых показателей отдельно по годичным слоям древесины, использования и других способов определения ее акустических свойств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 719870 СССР, МПК7 В27К5/06. Способ ускоренного старения древесины: № 2605906/29-015: заявл.: 18.04.1978: опубл. 08.03.1980 / И.И. Пищик, А.А. Кудря, Б.А. Янковский, А.И. Расев, С.Я. Шинаев, Г.Д. Коликов, А.П. Колупаев, А.М. Горлов, Ю.М. Яковлев, Б.С. Ремизов.  
Pishchik I.I., Kudrya A.A., Yankovskij V.A., Rasev A.I., Shinaev S.Ya., Kolikov G.D., Kolupaev A.P., Gorlov A.M., Yakovlev Yu.M., Remizov B.S. *Method of Accelerated Ageing of Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 719870 A1, 1980. (In Russ.).
2. Андреев Н.Н. О дереве для музыкальных инструментов // Сб. тр. НИИМЦ. 1938. Вып. 1. С. 11–18.  
Andreev N.N. Wood for Musical Instruments. *Sbornik trudov NIIMTs*, 1938, iss. 1, pp. 11–18. (In Russ.).
3. Витачек Е.Ф. Очерки по истории изготовления смычковых инструментов. М.: Музыка, 1964. 341 с.  
Vitachek E.F. *Essays on the History of Manufacture of Bowed String Instruments*. Moscow, Muzyka Publ., 1964. 341 p. (In Russ.).
4. Кальнини А.И. Связь свойств древесины с условиями произрастания // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1949. Т. 1У. С. 98–101.  
Kal'ninsh A.I. Relation of Wood Properties to Growing Conditions. *Trudy Instituta lesa AN SSSR*, 1949, vol. 1U, pp. 98–101. (In Russ.).
5. Ковальчук Л.М., Успенская Н.А., Пьянов А.Н. Восстановление деревянных конструкций зрительного зала Большого театра страны // Деревообраб. пром-сть. 2007. № 3. С. 23–25.  
Koval'chuk L.M., Uspenskaya N.A., P'yanov A.N. Restoration of Wooden Structures of the Bolshoi Theater Auditorium. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'* = Woodworking industry, 2007, no. 3, pp. 23–25. (In Russ.).
6. Мелехов И.С. Значение типов леса и лесорастительных условий в изучении строения древесины и ее физико-механических свойств // Тр. Ин-та леса АН СССР. 1949. Т. IV. С. 11–21.  
Melekhov I.S. Significance of Forest Types and Forest Site Conditions in the Study of Wood Structure and Its Physical and Mechanical Properties. *Trudy Instituta lesa AN SSSR*, 1949, vol. IV, pp. 11–21. (In Russ.).
7. Никитина Т.А. Технический ресурс ретродревеси́ны хвойных пород в элементах древесных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2021. 146 с.  
Nikitina T.A. *Operation Life of Coniferous Wood of Old Structures in the Elements of Wood Structures*: Cand. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2021. 146 p. (In Russ.).
8. Пахарь Г.А. О пригодности русской ели для выработки резонаторов // Лесопромышленник: еженед. журн. лесн. пром-сти и торговли. 1911. № 1, вып. 2. С. 129–131.



Pakhar' G.A. On the Suitability of Russian Spruce for the Production of Resonators. *Lesopromyshlennik*, 1911, no. 1, iss. 2, pp. 129–131. (In Russ.).

9. Пищик И.И. Исследование свойств древесины длительной выдержки как материала для музыкальных инструментов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 222 с.

Pishchik I.I. *Study of the Properties of Long-Aged Wood as a Material for Musical Instruments*: Cand. Eng. Sci. Diss. Moscow, 1973. 222 p. (In Russ.).

10. Пищик И.И. Датирование древесины длительной выдержки неразрушающими методами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 32 с.

Pishchik I.I. *Non-Destructive Dating of Long-Aged Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2005. 32 p. (In Russ.).

11. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. 5-е изд., перераб. и доп. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Wood Science and Forest Commodity Science*. Moscow, MGUL, 2007. 351 p. (In Russ.).

12. Федюков В.И. Ель резонансная: отбор на корню, выращивание, целевое использование: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. 256 с.

Fedyukov V.I. *Resonance Spruce: Selection on the Root, Cultivation, Target Use*: Monograph. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2016. 256 p. (In Russ.).

13. Федюков В.И., Салдаева Е.Ю. Резонансная ель для реконструкции Большого театра России // Лесн. хоз-во. 2011. № 2. С. 13–14.

Fedyukov V.I., Saldaeva E.Yu. Resonance Spruce for the Reconstruction of the Bolshoi Theater. *Lesnoye khozyaystvo*, 2011, no. 2, pp. 13–14. (In Russ.).

14. Altgen M. *Impact of Process Conditions in Open and Closed Reactor Systems on the Properties of Thermally Modified Wood*. PhD Dissertation. Göttingen, 2016. 146 p.

15. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Springer, Berlin, 2006. 394 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

16. Fedyukov V.I., Saldaeva E.Y., Chernova M.S., Chernov V.Y. Biomorphology of Spruce Trees as a Diagnostic Attribute for Non-Destructive Selection of Resonant Wood in a Forest. *South-East European Forestry*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 147–153. <https://doi.org/10.15177/seefer.18-11>

17. Froidevaux J., Navi P. Ageing Law of Spruce Wood. *Wood Material Science and Engineering*, vol. 8, iss. 1, pp. 46–52. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.725427>

18. Huber F. *Definition de caracteristiques simples decrivant les arbres et le bois de l'epicea commun (Picea excelsa Link.) et pouvant etre prises en flite pour l'evaluation de la ressource en bois de resonance (station de iherches sur la gualite des bois)*. Champenoux, INRA, CNRF Centre National de Recherches Forestières, 1989. 38 p. (In Fra.).

19. Ille R. Rezonaromi diavo smrku pro mistrovskfl housle. *Drevo*, 1979, no. 4, pp. 303–304. (In Czech).

20. Kránitz K., Deublein M., Niemz P. Determination of Dynamic Elastic Moduli and Shear Moduli of Aged Wood by Means of Ultrasonic Devices. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 925–936. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>

21. Noguchi T., Obataya E., Ando K. Effects of Aging on the Vibrational Properties of Wood. *Journal of Cultural Heritage*, 2012, vol. 13, iss. 3, suppl., pp. S21–S25. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.008>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

---

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article