

Научная статья

УДК 691.113, 620.178.151.6, 620.179

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-122-132

## Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) методами ударного импульса и упругого отскока

*А.С. Королев*<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

*Е.С. Шарапов*, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

*А.О. Быков*, науч. сотр.; ResearcherID: [KFR-1574-2024](https://orcid.org/0009-0006-3429-5902),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

*П.Г. Тимаков*, инженер; ResearcherID: [MGB-0595-2025](https://orcid.org/0009-0004-1590-5029),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1590-5029>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; korolevas@volgatech.net<sup>✉</sup>, sharapoves@volgatech.net, anton\_bykov02@mail.ru, pavel.timakov.99@mail.ru

---

Поступила в редакцию 03.07.25 / Одобрена после рецензирования 27.09.25 / Принята к печати 29.09.25

---

**Аннотация.** Неразрушающий контроль широко применяется для определения технического качества, строения и внутреннего состояния древесных материалов и древесины в растущих деревьях и элементах деревянных конструкций. В число перспективных направлений для оценки физико-механических свойств конструкционных материалов входят методы упругого отскока и ударного импульса. Цель работы – апробирование использования данных методов для косвенного определения плотности, статической твердости и динамического модуля упругости древесины. Исследования проведены на 67 бездефектных образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с нормализованной влажностью и размерами 50×50×50 мм<sup>3</sup> с использованием мобильных приборов «Оникс 2.6» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) и Silver Schmidt (Proceq SA, Шверценбах, Швейцария). Оценена изменчивость измеряемых параметров, получены регрессионные модели взаимосвязи параметров упругого отскока и ударного импульса с физико-механическими свойствами древесины. Наибольшие коэффициенты вариации соответствуют параметрам ударного импульса по радиальной и тангенциальной поверхностям образцов и статической твердости радиальной поверхности образцов. Установлена умеренная взаимосвязь плотности ( $R^2 = 0,49$ ) и динамического модуля упругости вдоль волокон ( $R^2 = 0,39$ ) с упругим отскоком от радиальной поверхности образцов. Невысокие коэффициенты детерминации моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины сосны являются следствием недостаточного диапазона варьирования плотности образцов, а также локальности оценки свойств данными методами, что ограничивает их применение для оперативной оценки свойств древесины у растущих деревьев, пиломатериалов и в элементах деревянных конструкций. Методы могут быть использованы для ориентировочной оценки древесины или определения участков, пораженных гнилями. Повышение качества моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины методами ударного импульса и упругого отскока может быть достигнуто за счет использования инденторов с большей площадью контакта, а также расши-

рения диапазона изменчивости свойств образцов для одной или нескольких пород древесины, что и будет являться целью дальнейших изысканий.

**Ключевые слова:** склерометр, неразрушающий контроль, упругий отскок, ударный импульс, плотность древесины, сосна, *Pinus sylvestris* L., статическая твердость, динамический модуль упругости

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта РНФ № 23-16-00220,

<https://rscf.ru/project/23-16-00220/>.

**Для цитирования:** Королев А.С., Шарапов Е.С., Быков А.О., Тимаков П.Г. Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) методами ударного импульса и упругого отскока // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 122–132. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-122-132>

Original article

## Evaluation of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Mechanical and Physical Properties Using the Impact Pulse and Elastic Rebound Methods

*Aleksandr S. Korolev*<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;  
ResearcherID: JKI-0714-2023, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

*Evgenii S. Sharapov*, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: B-8151-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

*Anton O. Bykov*, Research Scientist; ResearcherID: KFR-1574-2024,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

*Pavel G. Timakov*, Engineer; ResearcherID: MGB-0595-2025,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1590-5029>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Russia, 424000;

korolevas@volgatech.net<sup>✉</sup>, sharapoves@volgatech.net, anton\_bykov02@mail.ru,

pavel.timakov.99@mail.ru

---

Received on July 3, 2025 / Approved after reviewing on September 27, 2025 / Accepted on September 29, 2025

---

**Abstract.** Nondestructive testing is widely used for determining the technical quality, structure and internal condition of wood-based materials and wood in growing trees and elements of wood structures. The elastic rebound and impact pulse method belong to the most promising methods for evaluation of the physical and mechanical properties of construction materials. The paper aims at testing the application of these methods for indirect determination of wood density, static hardness and dynamic modulus of elasticity. The study used 67 non-defective specimens of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood with a normalized moisture content and dimensions of 50×50×50 mm<sup>3</sup> with the use of applied portative devices such as Oniks 2.6 (Interpribor, Chelyabinsk, Russia) and Silver Schmidt (Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland). We assessed variability of the measured parameters and obtained regression models of the relationship between the parameters of elastic rebound/impact pulse and the mechanical and physical properties of wood. The highest variation coefficients were obtained for the impact pulse on the radial and tangential surfaces of the specimens as well as for the static hardness of the radial surface of the specimens. A moderate correlation was found

between the density ( $R^2 = 0.49$ ) / dynamic modulus of elasticity along the fibers ( $R^2 = 0.39$ ) and the elastic rebound from the radial surface of the specimens. The low determination coefficients of the models for predicting the mechanical and physical properties of pine wood are due to the limited range of variation in the specimen density, as well as the local nature of the property evaluation with these methods. All this limits their application for the operational assessment of the properties of standing trees, lumber, and wooden construction elements. These methods are useful for estimating the wood quality or identifying areas affected by rot. The improved quality of models for predicting the mechanical and physical properties of wood by means of the impact pulse and elastic rebound methods may be achieved by using indenters with a larger contact area, as well as by expanding the range of variability in specimen properties for one or more wood species. This will be the focus of our further research.

**Keywords:** sclerometer, non-destructive testing, elastic rebound, impact pulse, wood density, pine, *Pinus sylvestris* L., static hardness, dynamic modulus of elasticity

**Funding:** The research was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-16-00220, <https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/>.

**For citation:** Korolev A.S., Sharapov E.S., Bykov A.O., Timakov P.G. Evaluation of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Mechanical and Physical Properties Using the Impact Pulse and Elastic Rebound Methods. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 122–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-122-132>

### Введение

Методы неразрушающего контроля широко применяются исследователями и специалистами для определения технического качества, строения и внутреннего состояния древесных материалов и древесины в растущих деревьях и элементах деревянных конструкций [14, 19, 22, 24]. Для решения наиболее распространенных задач, таких как оценка упругих свойств конструкционных материалов, плотности древесины в растущих деревьях, а также обследование живых деревьев и деревянных строительных конструкций, используются акустические [6, 9, 10, 16, 28] и механические методы неразрушающего контроля [1, 7, 12, 15, 18, 21]. Каждый из методов имеет свои преимущества и ограничения, например, параметры прохождения в акустических методах слабо коррелируют с плотностью древесины [23, 27], приборы для измерения сопротивления сверлению [1, 7, 21] характеризуются высокой стоимостью. Методы, основанные на анализе глубины проникновения в материал металлических штифтов или игл [12, 13, 15, 26], малоинформативны и неточны. Актуальность решаемых задач подталкивает ученых как к совершенствованию существующих, так и к разработке новых методов и средств неразрушающего контроля.

Опубликованы одни из первых результатов использования для прогнозирования свойств древесины известных методов неразрушающей оценки прочностных свойств материалов – ударного импульса и упругого отскока, основанных на измерении силовых и скоростных параметров при соударении инденторов с поверхностью материалов. Преимуществами данных методов являются простота использования, малые габариты и стоимость приборов. Исследователями из Бразилии установлена корреляционная взаимосвязь ( $R = 0,31–0,93$ ) между упругим отскоком и статической твердостью древесины для 4 лиственных пород [19]. При этом наибольшая сопряженность данных параметров была получена при измерениях на торцевой поверхности образ-

цов древесины. Результаты изучения взаимосвязи плотности древесины тропических пород с широким диапазоном варьирования (от 400 до 1200 кг·м<sup>-3</sup>) с упругим отскоком ( $R^2 > 0,7$ ) представлены в работе [24]. Эффективность применения метода также обоснована в работе [25], результатом которой являются модели прогнозирования прочностных свойств древесины эвкалипта ( $R^2$  до 0,92). Использование метода упругого отскока апробировано и на растущих деревьях [17]. Перспективы применения метода для оценки технического качества древесины в элементах деревянных конструкций изучены в работе [11], направленной на исследование влияния напряженно-деформированного состояния деревянных балок на результаты измерений.

При неразрушающей оценке упругих свойств древесины у растущих деревьев, в конструкционных пиломатериалах или элементах деревянных конструкций акустическими методами плотность древесины может быть определена косвенно или на образцах незначительного размера, что усложняет процесс измерений. В связи с этим поиск альтернативных методов прогнозирования плотности древесины также является актуальным.

Целью данной работы стало апробирование методов упругого отскока и ударного импульса для косвенного определения плотности, статической твердости и динамического модуля древесины сосны как одной из основных пород, используемых для изготовления конструкционных пиломатериалов.

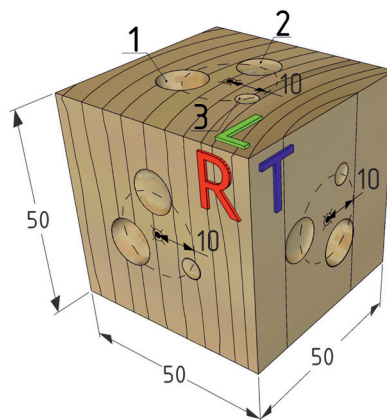
#### Объекты и методы исследования

Лабораторные измерения проведены на 67 прямослойных, бездефектных образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) размерами 50×50×50 мм<sup>3</sup> (рис. 1), изготовленных из заболонной и ядровой частей сердцевинной доски и кондиционированных в климатической комнате при 20 °C/65 % RH до достижения постоянной массы (ГОСТ 16483.0–89). Торцовая, радиальная и тангенциальная поверхности образцов были обработаны шлифовальной шкуркой на тканевой основе с зернистостью 12-Н (P100) на ленточном плоскошлифовальном станке. Плотность древесины определяли стереометрическим методом: измеряли массу образцов на лабораторных весах Vibra ALE-623 (Shinko Denshi Co., Ltd., Токио, Япония) и их геометрические размеры с помощью электронного штангенциркуля. Плотность рассчитывали как отношение массы к объему.

Рис. 1. Образец и схематическое изображение участков измерений (отпечатков) на торцовой (*L*), радиальной (*R*) и тангенциальной (*T*) поверхностях:

- 1 – участок контакта полусферического пуансона оснастки испытательной машины (радиус – 5,64 мм);
- 2 – участок контакта индентора прибора Silver Schmidt, тип L;
- 3 – участок контакта индентора прибора «Оникс 2.6»

Fig. 1. Specimen and schematic illustration of the measurement areas (dents) on the end (*L*), radial (*R*), and tangential (*T*) surfaces: 1 – contact area of the hemispherical punch of the testing machine (radius – 5.64 mm); 2 – contact area of the Silver Schmidt indenter, L type; 3 – contact area of the Onyx 2.6 indenter



В последующем определяли скорость прохождения ультразвуковых колебаний через изготовленные образцы древесины вдоль и поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях с расчетом динамического модуля упругости. Скорость ультразвуковых колебаний рассчитывали по времени их прохождения через образец с использованием прибора «Пульсар 2.2» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) с номинальной частотой ультразвуковых преобразователей 60 кГц. Измерения проводили посредством сухого акустического контакта по переднему фронту сигнала с расположением приемника и передатчика друг напротив друга (рис. 2, а).

Динамический модуль упругости (МПа) древесины для каждого направления анизотропии определяли без учета коэффициентов поперечной деформации [10, 20] по выражению:

$$E_{\text{дин}} = \rho_{12} V^2,$$

где  $\rho_{12}$  – плотность при нормализованной влажности,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $V$  – скорость ультразвуковых колебаний,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Статическую твердость древесины определяли на тангенциальной, радиальной и торцовой поверхностях образцов по ГОСТ 16483.17–81 на универсальной испытательной машине УТС-111.2-100-62 (ООО «Тестсистемы», Иваново, Россия).

Для фиксации ударного импульса использовали прибор «Оникс 2.6» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия). Принцип работы прибора основан на измерении и анализе электрического напряжения, возникающего на выходе пьезоэлектрической пластины при соударении индентора прибора с поверхностью образца [8]. Ударный импульс ( $\text{мВ}\cdot\text{мс}$ ) при этом определяется по выражению [2]:

$$S = \int_0^{\tau} U dt \text{ или } S = U_{\text{ср}} \tau,$$

где  $U$  – выходное напряжение пьезоэлектрического датчика, мВ;  $dt$  – переменная интегрирования;  $U_{\text{ср}}$  – среднее выходное напряжение пьезоэлектрического датчика, мВ;  $\tau$  – продолжительность соударения, мкс.

Упругий отскок определялся прибором Silver Schmidt, тип L, анализирующим скорости индентора (плунжера) до и после его соударения с поверхностью образца. Выражение для определения упругого отскока (%) [4]:

$$Q = \frac{V_{\text{после}}}{V_{\text{до}}} 100\%,$$

где  $V_{\text{после}}$  и  $V_{\text{до}}$  – скорость индентора прибора после и до соударения с поверхностью образца соответственно,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Измерение ударного импульса и упругого отскока осуществляли в вертикальном направлении, перпендикулярно торцовой, радиальной и тангенциальной поверхностям образцов, установленным на опорной плите универсальной испытательной машины (рис. 2, б, в).

Максимальную глубину отпечатков (остаточных деформаций) после соударения инденторов приборов с торцовой, радиальной и тангенциальной поверхностями образцов древесины определяли с помощью электронного индикатора на магнитной стойке с точностью 0,01 мм.

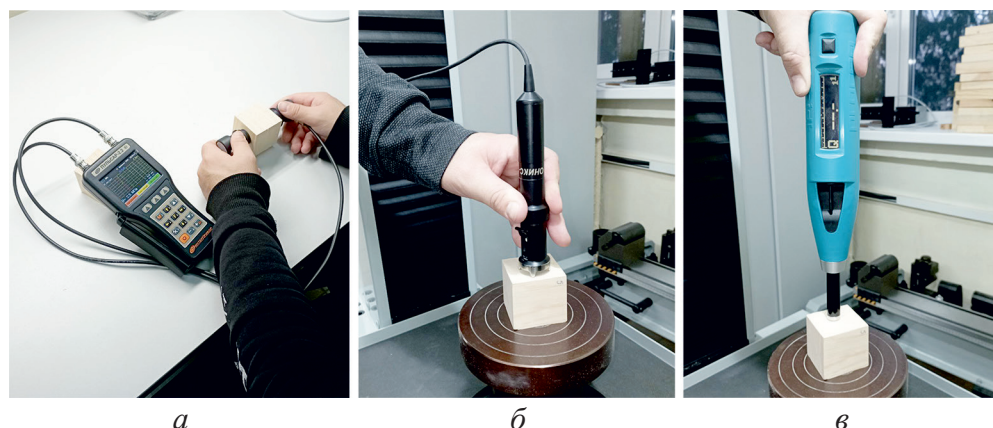


Рис. 2. Определение скорости прохождения ультразвуковых колебаний через образец (а) и ударного импульса (б) и упругого отскока (в)

Fig. 2. Measurement of the speed of ultrasonic vibrations passing through a specimen (a) and the impact pulse (b) and elastic rebound (c) values

Статистическую обработку результатов измерений и расчетов проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США), SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США) и Statgraphics 19 (Statpoint Technologies Inc., Плейнс, Вирджиния, США).

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

При взаимодействии инденторов приборов с поверхностями образцов древесина деформировалась, при этом размеры оставленных отпечатков (остаточной деформации древесины) значительно зависели (тест Тьюки) от типа прибора и видов разрезов. Средняя максимальная глубина отпечатков при использовании прибора «Оникс 2.6» составила 0,31 (CV = 34,6 %), 0,43 (CV = 38,8 %) и 0,31 (CV = 24,2 %) мм для торцевой, тангенциальной и радиальной поверхностей образцов соответственно. Меньшие глубины отпечатков установлены прибором Silver Schmidt – 0,26 (CV = 46,5 %), 0,38 (CV = 27,6 %) и 0,25 (CV = 24,6 %) мм.

Также показано, что основные оцениваемые параметры имели свои пределы изменения и особенности распределения в оцениваемой выборке (табл. 1). Наиболее значительно варьировал ударный импульс от радиальной и тангенциальной поверхностей, а также статическая твердость радиальной поверхности образцов. Плотность древесины, динамический модуль упругости поперек волокон в радиальном направлении и упругий отскок от торцевой поверхности древесины изменялись значительно слабее.

Таблица 1

#### **Вариабельность оцениваемых параметров в исследованной выборке образцов Variability of the evaluated parameters in the studied sample set**

| Параметр    | M±m        | X <sub>min</sub> | X <sub>max</sub> | S <sub>x</sub> | CV  | A <sub>ст</sub> | E <sub>ст</sub> |
|-------------|------------|------------------|------------------|----------------|-----|-----------------|-----------------|
| $\rho_{12}$ | 396,1±2,6  | 354,9            | 430,8            | 21,5           | 5,4 | 0,18            | -2,04           |
| $H_L$       | 29,27±0,27 | 25,3             | 36,0             | 2,2            | 7,5 | 2,07            | 0,8             |
| $H_T$       | 13,12±0,15 | 10,9             | 15,5             | 1,2            | 9,2 | 0,73            | -1,12           |

Окончание табл. 1

| Параметр           | $M \pm m$  | $X_{\min}$ | $X_{\max}$ | $S_x$ | CV   | $A_{\text{ст}}$ | $E_{\text{ст}}$ |
|--------------------|------------|------------|------------|-------|------|-----------------|-----------------|
| $H_R$              | 13,14±0,19 | 10,1       | 16,6       | 1,6   | 12,2 | 0,93            | -0,49           |
| $E_{\text{дин}}^L$ | 10367±117  | 7995       | 12256      | 960,9 | 9,2  | -1,65           | -0,39           |
| $E_{\text{дин}}^T$ | 999,0±11,3 | 834,0      | 1284,0     | 92,1  | 9,2  | 2,47            | 1,13            |
| $E_{\text{дин}}^R$ | 1665,0±9,7 | 1513,0     | 1897,0     | 79,8  | 4,8  | 1,35            | 0,77            |
| $S_L$              | 14,10±0,17 | 11,2       | 17,9       | 1,4   | 10,1 | 1,18            | 0,33            |
| $S_T$              | 6,09±0,11  | 3,2        | 7,8        | 0,9   | 14,4 | -3,10           | 2,97            |
| $S_R$              | 6,22±0,11  | 4,2        | 8,4        | 0,9   | 14,2 | 0,80            | -0,27           |
| $Q_L$              | 37,66±0,27 | 34,5       | 48,0       | 2,2   | 5,9  | 6,69            | 10,77           |
| $Q_T$              | 31,43±0,41 | 23,0       | 40,0       | 3,4   | 10,7 | 0,22            | 0,36            |
| $Q_R$              | 39,24±0,43 | 32,0       | 44,5       | 3,5   | 8,9  | -1,45           | -1,22           |

Примечание:  $M \pm m$  – среднее значение и его ошибка;  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – минимальное и максимальное значения;  $S_x$  – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации, %;  $A_{\text{ст}}$  – стандартизованная величина асимметрии;  $E_{\text{ст}}$  – стандартизованная величина эксцесса;  $H$  – статическая твердость, Н·мм<sup>-2</sup>.

Для оценки возможности прогнозирования физико-механических свойств древесины сосны методами ударного импульса и упругого отскока в табл. 2 представлены коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи плотности, статической твердости тангенциальной, радиальной и торцевой поверхностей образцов древесины с ударным импульсом и упругим отскоком.

Таблица 2

**Коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи плотности, статической твердости и динамического модуля упругости с ударным импульсом и упругим отскоком от торцевой, радиальной и тангенциальной поверхностей**  
**Determination coefficients for the linear models of the relationship between density/static hardness/dynamic modulus of elasticity and the values of impact pulse and elastic rebound from the end, radial, and tangential surfaces**

|                    | $S_L$ | $S_T$ | $S_R$ | $Q_L$ | $Q_T$ | $Q_R$ |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $H_L$              | 0,01  | 0,01  | 0,02  | 0,01  | 0,01  | 0,07  |
| $H_T$              | 0,03  | 0,05  | 0,03  | 0,01  | 0,01  | 0,03  |
| $H_R$              | 0,03  | 0,01  | 0,02  | 0,03  | 0,01  | 0,12  |
| $\rho_{12}$        | 0,01  | 0,03  | 0,10  | 0,02  | 0,04  | 0,49  |
| $E_{\text{дин}}^L$ | 0,01  | 0,01  | 0,16  | 0,13  | 0,10  | 0,39  |
| $E_{\text{дин}}^T$ | 0,01  | 0,01  | 0,03  | 0,01  | 0,02  | 0,27  |
| $E_{\text{дин}}^R$ | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,03  | 0,01  | 0,02  |

Согласно полученным результатам, сопряженность ударного импульса от торцевой, радиальной и тангенциальной поверхностей образцов с плотностью и статической твердостью древесины отсутствует. При этом установлена умеренная взаимосвязь плотности ( $R^2 = 0,49$ ) и динамического модуля упругости вдоль волокон ( $R^2 = 0,39$ ) с упругим отскоком от радиальной поверхности образцов древесины.

Полученный результат обусловлен несколькими причинами. Во-первых, конструктивными особенностями используемых приборов. Так, индентор при-

бора Silver Schmidt имеет значительно больший радиус закругления, равный 25 мм. При этом радиус закругления индентора прибора «Оникс 2.6» составляет 6 мм. За счет этого площадь поверхности контакта индентора с древесиной у прибора Silver Schmidt значительно выше и номинально индентор взаимодействует с большим количеством годовичных слоев древесины, в т. ч. ранней и поздней древесины, снижая размах измеряемого параметра.

Во-вторых, влияет тип поверхности образца, что также связано с варьированием физико-механических свойств древесины сосны в пределах годовичного слоя – изменение в 2–3 раза [3, 5]. Например, при измерениях на тангенциальной поверхности соударение индентора с древесиной может быть только по ранней или поздней древесине, что значимо повлияет на результаты измерений, но не будет отражать свойств древесины всего образца.

Результаты регрессионного анализа взаимосвязи плотности и динамического модуля упругости вдоль волокон с упругим отскоком от радиальной поверхности образца древесины, имеющие максимальные коэффициенты детерминации, представлены на рис. 3.

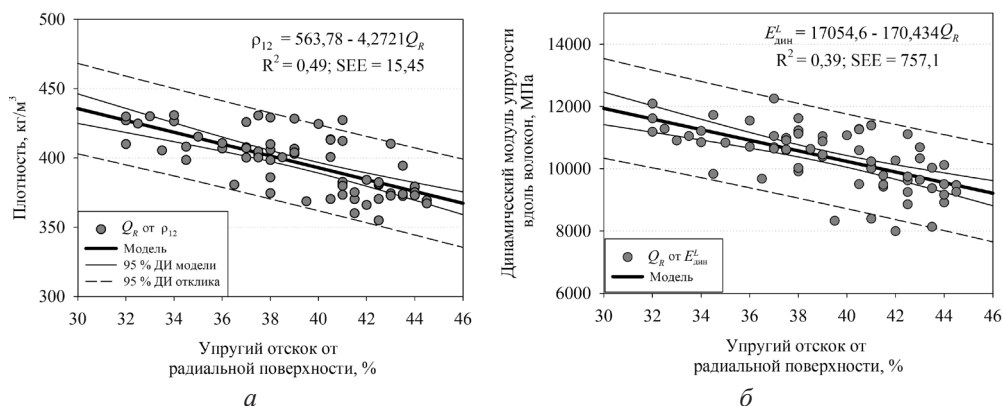


Рис. 3. Регрессионные модели взаимосвязи плотности (а) и динамического модуля упругости вдоль волокон (б) с упругим отскоком от радиальной поверхности образца:

ДИ – доверительный интервал для модели и отклика соответственно;

$R^2$  – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации

Fig. 3. Regression models of the relationship between density (a) and dynamic modulus of elasticity along the fibers (b) with elastic rebound from the radial surface of the specimen: ДИ – a confidence interval for the model and the response, respectively,  $R^2$  – coefficient of determination, SEE – standard error of approximation

Результаты обратной регрессии прогнозирования плотности древесины (рис. 3, а) не согласуются с опубликованными ранее моделями прямой регрессии с более высокими коэффициентами детерминации для 3 направлений анизотропии древесины  $R^2 = 0,69–0,76$  [24]. Это связано в первую очередь с диапазоном варьирования плотности древесины сосны, который в нашем случае составил 355–431 кг·м<sup>-3</sup>, что значительно уступало диапазону плотностей древесины образцов различных пород, используемых в работе [24] – 400–1200 кг·м<sup>-3</sup>.

Недостаточные коэффициенты детерминации моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины сосны ограничивают применение методов упругого отскока и ударного импульса для оперативной оценки свойств древесины у растущих деревьев, пиломатериалов и в элементах деревянных конструкций. Данные методы могут быть использованы лишь для ориентиро-

вочной оценки свойств древесины или определения участков древесины, пораженных гнилями, в т. ч. с опорой на информацию о диапазонах упругого отскока или ударного импульса, полученных для бездефектных образцов сосны в ходе данной работы.

### Заключение

Развитие приборной базы, а также простота использования методов ударного импульса и упругого отскока обуславливают их перспективность для неразрушающей оценки свойств древесины и древесных материалов. Вместе с тем данные методы основаны на локальных измерениях свойств в зоне контакта индентора с древесиной и не рекомендуются для косвенной неразрушающей оценки статической твердости древесины сосны. Полученные регрессионные модели для упругого отскока от радиальной поверхности образцов могут быть применены только для ориентировочной оценки плотности ( $R^2 = 0,49$ ) и динамического модуля упругости ( $R^2 = 0,39$ ) древесины сосны ввиду недостаточной степени взаимосвязи данных параметров. Повышение качества моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины методами ударного импульса и упругого отскока может быть достигнуто за счет использования инденторов с большей площадью контакта и расширения диапазона изменчивости плотности образцов одной или нескольких пород древесины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Королев А.С., Шаранов Е.С., Попов В.А. Оценка внутреннего состояния древесины в балках перекрытий методом измерения сопротивления сверлению // Вестн. гражданск. инж. 2023. № 5(100). С. 21–30.

Korolev A.S., Sharapov E.S., Popov V.A. Assessment of Internal Condition of Wood in Inter-Floor Covering Beams by Drilling Resistance Measurement Method. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* = Bulletin of Civil Engineers, 2023, no. 5(100), pp. 21–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-21-30>

2. Курс теоретической механики / ред.: В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин, К.С. Колесников, В.А. Космодемьянский, Б.П. Назаренко, А.А. Панкратов, П.Г. Русанов, Ю.С. Саратов, Ю.М. Степанчук, Г.М. Тушева, П.М. Шкапов. 4-е изд., испр. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 758 с.

*Course of Theoretical Mechanics: Textbook for Universities*. Ed. by V.I. Drong, V.V. Dubinin, M.M. Il'in, et al. Moscow, BMSTU Publ., 2011. 758 p. (In Russ.).

3. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.  
Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russ.).

4. Стихановский Б.Н., Скобликова М.В. Определение твердости и дефектов поверхности методом упругого отскока // Совр. науч. исслед. и инновации. 2011. № 7. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2011/11/5286> (дата обращения: 05.06.25).

Stihanovskiy B.N., Skoblikova M.V. Hardness and Surface Defects by Rebound. *Modern scientific researches and innovations*, 2011, no. 7. 12 p. (In Russ.).

5. 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 Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

6. Федяев А.А., Чубинский А.Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб.: Галаника, 2022. 118 с.

Fedyaev A.A., Chubinsky A.N. *Nondestructive Testing Methods for Wood Product Properties*. Saint Petersburg, GALANIKA Publ., 2022. 118 p. (In Russ.).

7. Шаранов Е.С. Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2020. 340 с.

Sharapov E.S. *Improvement of Methods and Means of Quasi-non-Destructive Testing of Physical and Mechanical Properties of Wood and Wood-Based Materials*: Dr. Engin. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2020. 340 p. (In Russ.).

8. Ямпольский Д.З. О возможности определения энергии ударного импульса методом индикаторных диаграмм // Вестн. науч.-техн. развития. 2024. № 2(173). С. 9–15.

Yampolsky D.Z. About the Possibility of Determining Energy of the Shock Pulse by the Method of Indicator Diagrams. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* = Bulletin of Science and Technical Development, 2024, no. 2(173), pp. 9–15. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18411/vntr2024-173-2>

9. Arriaga F., Osuna-Sequera C., Bobadilla I., Esteban M. Prediction of the Mechanical Properties of Timber Members in Existing Structures Using the Dynamic Modulus of Elasticity and Visual Grading Parameters. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 322, art. 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>

10. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Ed. by T.E. Timell, R. Wimmer. Berlin, Springer, 2006. 393 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

11. Da Veiga N.S., Soriano J. Sclerometric Index Evaluated Along the Depth of Cross-Section of Timber Beams. *Scientia Forestalis*, vol. 47, no. 122, pp. 359–373. (In Portuguese). <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.19>

12. Jaskowska-Lemańska J., Wałach D., Górka-Stańczyk M. Correction Factors for Sclerometric Test Results in the Technical Assessment of Timber Structural Elements Under Diverse Conditions. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 24, art. 7582.

<https://doi.org/10.3390/ma16247582>

13. Karlinasari L., Fredisa Y., Adzkie U., Fauziyyah S., Dwiyantri F., Siregar I.Z. Use of a Pin-Penetration Wood Density Meter to Determine the Density of 25 Indonesian Species. *BioResources*, 2021, vol. 16, iss. 2, pp. 3032–3045.

<https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3032-3045>

14. Kloiber M., Drdácý M., Machado J.S., Piazza M., Yamaguchi N. Prediction of Mechanical Properties by Means of Semi-Destructive Methods: A Review. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 101, part 2, pp. 1215–1234.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.134>

15. Kloiber M., Drdácý M., Tippner J., Hrivnák J. Conventional Compressive Strength Parallel to the Grain and Mechanical Resistance of Wood Against Pin Penetration and Microdrilling Established by *in-situ* Semidestructive Devices. *Materials and Structures*, 2015, vol. 48, pp. 3217–3229. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0392-6>

16. Llana D.F., Short I., Harte A.M. Use of Non-Destructive Test Methods on Irish Hardwood Standing Trees and Small-Diameter Round Timber for Prediction of Mechanical Properties. *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, iss. 3, art. 62.

<https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>

17. Lorensani R.G.M., Gonçalves R. Machine Learning Algorithms and Nondestructive Methods for Estimating Wood Density in Planted Forest Trees. *Forests*, 2025, vol. 16, no. 2, art. 376. <https://doi.org/10.3390/f16020376>

18. Mäkipää R., Linkosalo T. A Non-Destructive Field Method for Measuring Wood Density of Decaying Logs. *Silva Fennica*, 2011, vol. 45, no. 5, art. 91.

<https://doi.org/10.14214/sf.91>

19. Martins I.Z., Deldotti L.R., Soriano J., Faria D.L. Janka Hardness of Hardwood Species Evaluated by the Nondestructive Sclerometric Method. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, art. 227. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02064-x>

20. Mora C.R., Schimleck L.R., Isik F., Mahon J.M., Clark A., Daniels R.F. Relationship Between Acoustic Variables and Different Measures of Stiffness in Standing *Pinus taeda* Trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 39, no. 8, pp. 1421–1429. <https://doi.org/10.1139/X09-062>

21. Oliveira J.T.S., Wang X., Vidaurre G. Assessing Specific Gravity of Young *Eucalyptus* Plantation Trees Using a Resistance Drilling Technique. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, no. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058>

22. Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., et al. Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us About Wood Property Variation. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 9, art. 728. <https://doi.org/10.3390/f10090728>

23. Sharapov E., Demakov Yu., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*, 2024, vol. 15, iss. 2, art. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>

24. Soriano J., da Veiga N.S., Martins I.Z. Wood Density Estimation Using the Sclerometric Method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2015, vol. 73, pp. 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0948-3>

25. Soriano J., Gonçalves R., Bertoldo C., Trinca A.J. Application of Esclerometric Test Method in Pieces of *Eucalyptus saligna*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2011, vol. 15(3), pp. 322–328. (In Portuguese). <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300015>

26. Tannert T., Anthony R.W., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., et al. *In situ* Assessment of Structural Timber Using Semi-Destructive Techniques. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 767–785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>

27. Tippner J., Hrivnák J., Kloiber M. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood Using Acoustic Methods. *BioResources*, 2016, vol. 11, iss. 1, pp. 503–518. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>

28. Wang X., Ross R.J., McClellan M., Barbour J., Erickson J.R., Forsman J.W., et al. *Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique*. Research Paper FPL, RP–585. USDA Forest Service, 2000. 9 p.

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

---

**Вклад авторов:** Методология: Королев А.С. и Шарапов Е.С.; проведение измерений: Быков А.О. и Тимаков П.Г.; обработка результатов и графическое представление данных: Королев А.С. и Шарапов Е.С.; подготовка и редактирование рукописи Королев А.С., Шарапов Е.С. и Быков А.О.; научное руководство: Шарапов Е.С.

**Authors' Contribution:** Conceptualization and methodology by Korolev A.S. and Sharapov E.S.; laboratory tests by Bykov A.O. and Timakov P.G.; processing of results and graphical presentation by Korolev A.S. and Sharapov E.S.; review writing and editing by Korolev A.S., Sharapov E.S. and Bykov A.O.; supervision by Sharapov E.S.