
 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 674.038.1:620.179.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-135-150

Оценка точности метода измерения сопротивления сверлению древесины в дендрохронологических исследованиях


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>

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

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


И.Г. Гайсин, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; chernovvy@volgatech.net , SharapovES@volgatech.net,
GaisinIG@volgatech.net

Поступила в редакцию 05.09.22 / Одобрена после рецензирования 03.12.22 / Принята к печати 08.12.22

Аннотация. Одним из перспективных методов определения физико-механических свойств и строения древесины является метод, основанный на измерении сопротивления сверлению. Ограничения применения данного метода в дендрохронологических исследованиях связаны с рядом факторов, оказывающих значимое влияние на точность установления вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев: глубиной сверления, его направлением относительно волокон, скоростными параметрами процесса сверления. В целях оценки точности измерения радиального прироста древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) влажностью 6–8 % были использованы устройство ResistYX и стандартные тонкие буровые сверла. На основании сравнительного анализа радиальных приростов древесины, определенных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению, для получения точных данных о приросте с коэффициентом корреляции больше 0,7 рекомендовано измерять на одном образце не более 17 годичных слоев, что соответствует средней суммарной ширине годичных слоев 36,6 мм. Изучено влияние основных причин снижения точности определения радиального прироста методом измерения сопротивления сверлению: геометрических параметров режущей части тонкого бурового сверла, отклонения направления сверления от заданного, невозможности точного определения строго радиального направления сверления, пороков древесины, а также трения хвостовика сверла при повышении глубины просверливания. Для увеличения точности метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологических исследованиях предлагается: разработать методику, в том числе с применением специального или вновь разработанного инструмента, для более точного определения сердцевины и радиального просверливания дерева или круглого лесоматериала; повысить жесткость тонкого бурового сверла; обеспечить требуемую фиксацию тонкого бурового сверла в процессе его первоначального контакта с древесиной и внутри устройства.

© Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Гайсин И.Г., 2023

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Дальнейшие исследования в обозначенном направлении будут связаны с оценкой точности определения радиального прироста хвойных пород древесины по усилию подачи тонкого бурового сверла.

Ключевые слова: годовые слои древесины, дендрохронологические исследования, профиль сопротивления сверлению, оптический метод, тонкое буровое сверло, точность измерения, метод измерения сопротивления сверлению, ResistYX

Благодарности: Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-674/3) и за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

Для цитирования: Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Гайсин И.Г. Оценка точности метода измерения сопротивления сверлению древесины в дендрохронологических исследованиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 135–150. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-135-150>

Original article

Evaluation of the Accuracy of Wood Drilling Resistance Measurement Method in Dendrochronological Studies

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>

Evgenii S. Sharapov, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

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

Ischat G. Gaisin, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; chernovvy@volgatech.net[✉], SharapovES@volgatech.net, GaisinIG@volgatech.net

Received on September 5, 2022 / Approved after reviewing on December 3, 2022 / Accepted on December 8, 2022

Abstract. One of the promising methods for determining physical and mechanical properties and structure of wood is the method based on the measurement of drilling resistance. Limitations of application of the method of measuring drilling resistance in dendrochronological studies are related to a number of factors that have a significant impact on the accuracy of determining the variation of physical and mechanical properties of wood within annual layers: the depth of drilling, its direction relative to the fibers, and the speed parameters of the drilling process. In order to assess the accuracy of measuring the radial growth of pine wood (*Pinus sylvestris* L.) with moisture content of 6–8 %, the ResistYX device and standard thin drill bits were used. On the basis of comparative analysis of radial wood growth determined by the optical method and the method of measuring resistance to drilling, it was found that in order to obtain accurate data on growth with a correlation coefficient greater than 0.7, it is recommended to measure no more than 17 annual layers on one sample, which corresponds to an average total width of annual layers of 36.6 mm. The influence of the main reasons for the decrease in the accuracy of radial growth determination by the drilling resistance measurement method was studied: geometrical parameters of the cutting part of a thin drill bit, deviation of the



drilling direction from the specified one, impossibility of precise determination of the strictly radial drilling direction, wood flaws, as well as friction of the drill shank when the drilling depth increases. To increase the accuracy of the method of measuring drilling resistance in dendrochronological studies it is proposed to develop a method including the use of a special or newly developed tool for more accurate determination of the core and radial drilling of wood or round timber; to increase the rigidity of the thin drill bit; to provide the required fixation of the thin drill bit during its initial contact with wood and inside the device. Further studies in this direction will be associated with the assessment of measuring accuracy for the radial growth of coniferous wood by the feeding force for drill bit penetration.

Keywords: annual layers of wood, dendrochronological studies, drilling resistance profile, optical method, thin drill bit, measurement accuracy, drilling resistance measurement method, ResistYX

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant № 075-15-2021-674/3) and Core Facility Centre «Ecology, biotechnologies and processes for obtaining environmentally friendly energy carriers» of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola and by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

For citation: Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Gaisin I.G. Evaluation of the Accuracy of Wood Drilling Resistance Measurement Method in Dendrochronological Studies. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 135–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-135-150>

Введение

Дендрохронологические исследования направлены на изучение изменчивости годичного прироста древесины в целях датировки природных явлений, исторической и археологической древесины, реконструкции климатических и гидрологических условий, изучения динамики лесных экосистем и солнечной активности. Объектом дендрохронологических исследований могут являться различные характеристики годичного радиального прироста древесины: ширина годичного слоя, вариация физико-механических или химических свойств древесины в пределах годичного слоя, площадь годичного кольца [2, 7, 11, 14].

Для дендрохронологического анализа чаще всего используются бруски или круговые поперечные спилы древесины, керны, а также клиновидные выпилы и высечки, взятые, например, с растущих деревьев или элементов деревянных конструкций [7, 11, 14]. Выбор способа получения образцов будет зависеть от ряда факторов, связанных в первую очередь с допустимостью полного или частичного разрушения изучаемого объекта, транспортировки и подготовки образцов для измерения параметров радиального прироста древесины. Как отмечается исследователями [14], круговые поперечные спилы позволяют повысить точность измерений радиального прироста на основании возможного учета нарушений в формировании годичных слоев – выпавших и ложных годичных слоев. Широкое распространение получили методики сбора образцов, основанные на использовании ручных или электрических приростных буравов [1, 3, 23] и позволяющие снизить разрушающее воздействие на объект исследования. Применение специальных современных измерительных комплексов и

программ дает возможность автоматизировать процесс измерений и последующего анализа данных радиального прироста древесины. Вместе с тем следует отметить, что отбор кернов из древесины, особенно пораженной гнилью, весьма затруднителен, а последующие этапы хранения, сушки и подготовки кернов для работы характеризуются высокой трудоемкостью.

Из числа современных подходов, применяемых в области дендрохронологии, может быть рассмотрен метод исследования физико-механических свойств древесины, основанный на измерении сопротивления древесины сверлению [9, 12, 18, 19, 24, 25, 29–31]. Метод заключается в просверливании древесины тонкими буровыми сверлами (диаметром 3 мм), оперативном определении энергосиловых и скоростных параметров процесса сверления, коррелирующих с плотностью, деформативностью, механическими и технологическими свойствами древесины [9, 12]. Благодаря использованию тонких буровых сверл, незначительно воздействующих на дерево, описанный метод относится к группе малоинвазивных, или квазинеразрушающих, методов контроля. Трудоемкость, уровень разрушающего воздействия, а также затраты времени на получение временного ряда данных значительно ниже по сравнению с методом, основанным на получении и последующем анализе кернов.

В работах [24, 25] представлены результаты оценки корреляции некоторых параметров годичных слоев пихты (*Abies alba*), лиственницы (*Larix decidua*), ели (*Picea abies*), сосны (*Pinus cembra*), липы (*Tilia platyphyllos*) и тополя (*Populus* sp.), полученных методами измерения сопротивления сверлению и рентгенографической денситометрии. Авторами отмечается, что геометрические параметры режущей части тонкого бурового сверла являются лимитирующим фактором при определении параметров годичных слоев шириной до 0,5 мм.

Результаты исследований, направленных на установление тесноты связи ширины годичных слоев и вариации плотности в пределах годичных слоев пихты, представлены в работе [15]. При анализе параметров, характеризующих годичные слои древесины, методами измерения сопротивления сверлению и рентгенографии наибольшая степень взаимосвязи установлена для корреляции средней общей ширины годичных слоев ($r = 0,8$). Точное определение параметров годичных слоев древесины возможно для профилей сопротивления сверлению лишь первых 6–8 годичных слоев, следующих после коры.

Выводы по применению метода измерения сопротивления сверлению для определения размерных характеристик радиального прироста древесины представлены также в работах [16, 22, 31, 32]. В [16] показана высокая сходимость вариации ширины годичных слоев древесины при определении ширины годичных слоев сосны (*Pinus brutia*) с помощью буровых кернов и метода измерения сопротивления сверлению. При этом значимое влияние на полученные данные оказывали отклонение от радиального направления просверливания, пороки древесины, содержание смол. Также существенно воздействуют на точность метода глубина просверливания и связанное с ней уменьшение радиуса кривизны годичных колец при приближении к сердцевине [24, 25]: в годичных слоях малого радиуса режущие кромки сверла в процессе резания одновременно взаимодействуют с ранней и поздней древесиной, усредняя сопротивление сверлению и сглаживая вариацию плотности (механических свойств) в годичном слое.

Сравнительный анализ радиального прироста деревьев (*Quercus robur*, *Ulmus procera* и *Platanus × acerifolia*), данные о котором получены с помощью метода измерения сопротивления сверлению и при использовании буровых кернов, представлен в работе [22]. Обнаружена высокая степень корреляции ширины годичных слоев древесины, также измеренной представленными методами ($R^2 = 0,78-0,95$). Однако установлена недостаточная точность определения годичных слоев древесины шириной до 1 мм, метод не рекомендуется для дендрохронологических исследований. Схожие результаты приведены в [15]. Сравнительный анализ методик дендрохронологического анализа исторической древесины деревянных конструкций с помощью буров и устройств для измерения сопротивления сверлению установил сложность определения радиального прироста по профилям сопротивления древесины сверлению без дополнительного отбора кернов.

Направление сверления относительно направления волокон древесины является одним из ключевых факторов, влияющих на разрешающую способность определения вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев при использовании метода измерения сопротивления сверлению [16, 17, 24–26]. Скорость подачи тонкого бурового сверла также является одним из значимых параметров, воздействующих на точность определения вариации физико-механических свойств древесины [13, 24, 25, 28]. Снижение точности определения плотности древесины (вариации плотности) в годичных слоях при повышении глубины сверления может быть связано и с повышением трения хвостовика тонкого бурового сверла [20, 21, 27]. Существенную роль при использовании метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологии играют конструктивные особенности и технические характеристики устройств, основанных на нем. Представленные выше исследования выполнялись с помощью устройств Resistograph (Rinntech, г. Хайдельберг, Германия) и IML-Resi (IML, г. Моултонборо, США).

На основании анализа перечисленных работ можно утверждать, что ограничения применения метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологических исследованиях связаны с рядом факторов, оказывающих значимое влияние на точность определения вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев: глубиной сверления, направлением сверления относительно волокон, скоростными параметрами процесса сверления. Вместе с тем, учитывая явные преимущества метода измерения сопротивления сверлению по скорости измерений и общим трудозатратам в сравнении с использованием приростных буров (кернов), разработка рекомендаций по допустимой глубине просверливания и наибольшему числу просверленных годичных слоев, обеспечивающих допустимую точность измерения характеристик годичного прироста, является актуальной задачей.

Данная работа направлена на исследование точности метода измерения сопротивления сверлению при определении прироста древесины авторской разработкой – устройством ResistYX [9], а также на разработку методологических и конструкторских решений, способствующих повышению точности измерения вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев указанным методом.

Объекты и методы исследования

Образцы для исследований были изготовлены из элементов бревенчатой стены деревянной постройки, эксплуатируемой около 45 лет (рис. 1). Материал – сосна (*Pinus sylvestris* L.). После демонтажа сооружения взяты участки из различных частей бревен без видимых дефектов, из выбранных частей выпиливались чураки длиной 500 мм – 6 шт. Чураки раскраивались продольно с получением сердцевинной доски толщиной 50 мм (этап 1, рис. 1). Поскольку не представлялось возможным просверлить более широкие доски насквозь в радиальном направлении так, чтобы сверло вышло с противоположной кромки (сверло выходило на одну из пластей), доски шириной свыше 150 мм были поделены на 2 части примерно по сердцевине (этап 2, рис. 1). Полученные доски выдерживались в сухом, отапливаемом помещении до достижения равновесной влажности 6–8 %.

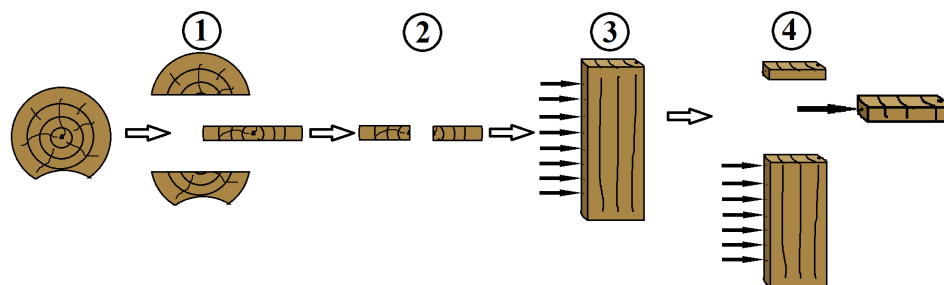


Рис. 1. Способ получения образцов из элементов бревенчатой стены деревянной конструкции: 1 – выпиливание центральной доски из чурака; 2 – деление сердцевинной доски по ширине на 2 части (для досок шириной свыше 150 мм); 3 – просверливание доски в радиальном направлении; 4 – получение образцов для измерения ширины годичных слоев

Fig. 1. Method for obtaining samples from log wall elements: 1 – cutting out the central board from a block; 2 – dividing the core board widthwise into 2 parts (for boards with width over 150 mm); 3 – drilling the board in radial direction; 4 – obtaining samples for measuring the width of annual layers

Каждая полученная сердцевинная доска просверливалась в радиальном направлении по длине с шагом 30 мм (этап 3, рис. 1). Для удобства определения радиального прироста и достижения более высокой сходимости результатов, полученных двумя методами, каждая из досок делилась поперечно в области сверления, как показано на рис. 1 (этап 4) и на рис. 2. Толщина полученных образцов составляла 6–8 мм. Исследуемая оптической методом поверхность образцов зашлифовывалась, на нее наносилась радиальная линия (рис. 2, справа), которая являлась номинальной траекторией сверления.



Рис. 2. Образцы древесины: с реальной (слева) и номинальной (справа) траекторией сверления

Fig. 2. Wood samples: with an actual drilling direction (left) and with a nominal drilling direction (right)

С помощью микроскопа МПБ-2 (Ижевский приборостроительный завод, УССР) с точностью 0,05 мм выполнялось измерение прироста годичных слоев древесины на каждом образце (рис. 2) по направлению сверления (подачи тонкого бурового сверла).

Измерение сопротивления сверлению осуществлялось с использованием устройства ResistYX [9, 10]. Устройство (рис. 3) имеет следующие основные технические характеристики: сопротивление сверлению древесины определяется по электрической мощности вращения и подачи тонкого бурового сверла; разрешающая способность при скорости подачи сверла 500 мм/мин не более 1/100 мм; абсолютная точность измерения плотности древесины (сосна) – $\pm 4 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, относительная – $\pm 1 \%$.

Рис. 3. Устройство для измерения сопротивления сверлению ResistYX

Fig. 3. Drilling resistance measuring device ResistYX



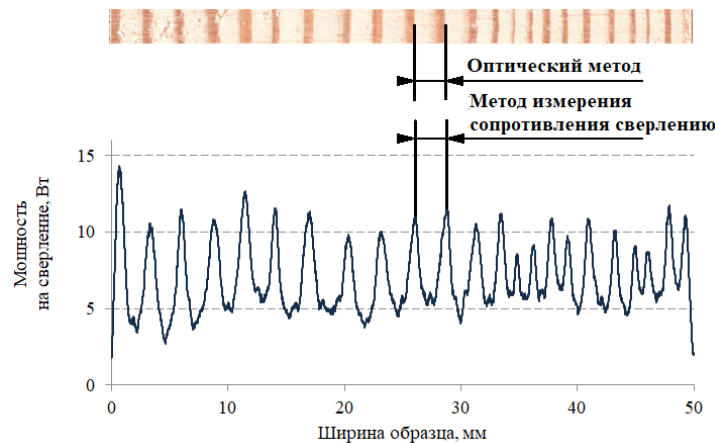
Сбор данных об электрической мощности сверления проводился с помощью разработанной программы для ЭВМ [8] в программной среде LabVIEW. Программа позволяет автоматизировать процесс исследования физико-механических свойств и внутреннего строения древесины на основе метода измерения сопротивления сверлению. Сведения о сопротивлении древесины сверлению выгружаются в файл Excel в виде динамических рядов данных.

Радиальный прирост древесины определялся по следующей методике (рис. 4): при использовании оптического измерительного прибора радиальный прирост находился как расстояние между переходными зонами ранней и поздней древесины соседних годичных слоев;

при использовании устройства для измерения сопротивления сверлению ResistYX – как расстояние между 2 соседними максимальными сопротивлениями сверлению, характеризующими участки поздней древесины соседних слоев с максимальной плотностью древесины.

Рис. 4. Торцевая поверхность образца древесины и профиль сопротивления сверлению

Fig. 4. End surface of the wood sample and drilling resistance profile



Ширина годичного слоя, измеренная с помощью оптического прибора, была принята в качестве действительного значения (независимая переменная), так как получена в результате прямых измерений, а ширина годичного слоя, определенная по профилю сопротивления древесины сверлению, – в качестве сопоставляемого значения (зависимая переменная).

Построение и обработка временных рядов данных осуществлялись по следующей методике:

1. Построение диаграмм прироста древесины в Excel по данным оптического метода и метода измерения сопротивления сверлению, их визуальный анализ. При этом на каждом образце были выявлены участки со схожей динамикой прироста.

2. Обработка массивов данных прироста древесины по всей ширине образца и по его отдельным наиболее схожим участкам методом кросс-корреляции в программе Statistica 10.

3. Обработка данных по ширине годичных слоев, полученных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению, статистическими методами, основанными на сглаживании данных [4]:

наименьших квадратов по М. Неслунду (OLS-H): $y = a + bx$ (y – расчетная ширина годичного слоя; a, b – коэффициенты тренда прироста годичных слоев; x – порядковый номер годичного слоя) – и по Б. Эклунду (OLS-Э): $1/y = -a + xb$;

простой скользящей средней с 3-, 5- и 11-летним сглаживанием (SMA-3, SMA-5, SMA-11 соответственно);

весовой 3-летней скользящей средней (метод Э. Шульмана). Метод относится к треугольной скользящей средней (ТМА), расчеты производятся по формуле

$$b_i = (c + 2d + e)/4,$$

где b_i – сглаженная ширина годичного слоя данного года; c, d, e – ширина годичного слоя предыдущего, данного и последующего годов соответственно.

4. Корреляционный анализ полученных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению (уровень доверительной вероятности $p = 0,05$) данных радиального прироста древесины по всей ширине образца и по его отдельным наиболее схожим участкам.

5. Определение обработанных статистическими методами в программе Statistica основных статистических параметров (среднее, минимальное, максимальное значения, среднеквадратическое отклонение) по данным с заметной ($r > 0,5$), высокой ($r > 0,7$) и очень высокой ($r > 0,9$) силой связи.

Результаты исследования и их обсуждение

Для повышения точности результатов сравнительного анализа временных рядов данных радиального прироста была выполнена кросс-корреляция, которая позволила наилучшим образом сопоставить данные по приросту, полученные обоими названными методами. Целью этой операции являлось исключение возможных ошибок, связанных со случайным нарушением последовательности учета годичных слоев при измерении прироста древесины оптическим методом.

Результаты обработки и корреляционного анализа данных, полученных методом сопротивления сверлению (без сглаживания и с 6 методами сглаживания) по отношению к фактическим данным – результату применения оптического метода – представлены в табл. 1 для всей ширины образца и для отдельных наиболее схожих участков.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции временных рядов данных радиального прироста, полученных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению

Correlation coefficients of the radial growth time series data obtained by optical and drilling resistance measurement methods

№ образца	Без сглаживания	С использованием статистических методов сглаживания данных						Число годовичных слоев	Суммарная ширина годовичных слоев, мм
		OLS-H	OLS-Э	SMA-3	SMA-5	SMA-11	TMA		
<i>Весь образец</i>									
1.1.2	0,13	1,00	0,59	0,17	0,15	0,11	0,22	76	151,2
1.1.6	0,27	0,49	0,47	0,45	0,54	0,69	0,43	80	155,7
1.2.4	0,48	0,49	0,51	0,67	0,75	0,85	0,64	70	156,3
1.2.6	0,25	0,55	0,57	0,43	0,54	0,67	0,44	69	154,1
2.1.7	0,16	1,00	0,40	0,21	0,28	0,64	0,04	53	148,4
2.2.4	0,01	1,00	0,70	0,32	0,39	0,58	0,32	65	113,0
2.2.5	0,32	0,44	0,46	0,68	0,81	0,87	0,66	72	162,2
3.1	0,08	1,00	0,97	0,28	0,44	0,79	0,26	31	89,4
3.2	0,13	1,00	0,99	0,18	0,20	0,29	0,17	64	95,4
3.4	0,12	1,00	0,96	0,45	0,60	0,83	0,41	20	44,6
5.1.9	0,42	1,00	1,00	0,62	0,72	0,94	0,68	47	102,2
5.2.10	0,04	1,00	0,97	0,05	0,17	0,38	0,04	56	82,0
<i>Отдельные наиболее схожие участки образца</i>									
1.1.2 (1)	0,68	1	1,00	0,96	–	–	0,98	7	18,0
1.2.4 (1)	0,48	1	1,00	0,77	0,82	0,58	0,71	39	70,5
1.2.6 (1)	0,81	1	1,00	0,93	0,89	–	0,96	12	33,1
1.2.6 (2)	0,62	1	1,00	0,87	0,88	0,93	0,80	32	57,7
2.1.7 (2)	0,97	1	1,00	0,98	–	–	0,97	5	8,2
2.1.7 (3)	0,75	1	0,83	0,83	0,77	–	0,91	8	15,5
2.1.7 (1)	0,67	1	0,92	0,82	0,67	–	0,77	11	19,9
2.2.5 (1)	0,41	1	1,00	0,48	0,52	0,71	0,46	40	96,3
2.2.5 (2)	0,91	1	1,00	0,97	0,99	0,97	0,96	18	32,8
3.2 (1)	0,07	1	0,99	0,03	0,47	0,51	0,04	20	45,2
3.2 (2)	0,76	1	0,73	0,89	0,91	0,90	0,88	24	64,9
3.4 (1)	0,38	1	0,99	0,40	0,18	0,44	0,40	14	39,4
5.2.10 (1)	0,21	1	0,99	0,19	0,61	0,58	0,08	20	38,9
5.2.10 (2)	0,53	1	1,00	0,57	0,50	0,16	0,55	24	62,1
5.2.7 (1)	0,73	1	1,00	0,66	0,68	0,97	0,67	16	47,3
5.2.7 (2)	0,43	1	0,99	0,67	0,82	0,76	0,64	23	67,9
5.2.7 (3)	0,50	1	1,00	0,74	0,58	0,50	0,74	17	45,9

По некоторым отдельным схожим участкам образцов не представлены коэффициенты корреляции SMA для данных с 11-летним сглаживанием. Это связано с тем, что в большинстве из групп SMA количество попавших годовичных слоев было меньше 11.

На основе полученных результатов корреляционного анализа данных рассчитаны основные статистические показатели, характеризующие точность метода измерения сопротивления сверлению при определении радиального прироста древесины (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета в зависимости от статистического метода сглаживания данных и от коэффициента корреляции
The results of calculating the annual rings number depending on the statistical method of data smoothing and on the correlation coefficient

Метод сглаживания	Коэффициент корреляции r	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
<i>Количество годовичных слоев</i>					
SMA-3	> 0,5	27	5	72	21
	> 0,7	17	5	39	11
	> 0,9	11	5	18	6
SMA-5	> 0,5	34	8	80	23
	> 0,7	35	8	72	23
	> 0,9	21	18	24	4
SMA-11	> 0,5	40	16	80	22
	> 0,7	36	16	72	20
	> 0,9	27	16	47	13
TMA	> 0,5	27	5	72	21
	> 0,7	17	5	39	11
	> 0,9	10	5	18	5
<i>Суммарная ширина годовичных слоев</i>					
SMA-3	> 0,5	60,3	8,2	162,2	45,9
	> 0,7	36,6	8,2	70,5	22,1
	> 0,9	23,0	8,2	33,1	12,1
SMA-5	> 0,5	75,1	15,5	162,2	48,7
	> 0,7	76,3	15,5	162,2	50,0
	> 0,9	48,8	32,8	64,9	22,7
SMA-11	> 0,5	89,1	32,8	162,2	46,2
	> 0,7	83,8	32,8	162,2	43,2
	> 0,9	61,0	32,8	102,2	26,0
TMA	> 0,5	60,3	8,2	162,2	45,9
	> 0,7	36,6	8,2	70,5	22,1
	> 0,9	21,5	8,2	33,1	11,0

Использование метода OLS – по Неслунду и Экслунду – показало достаточно высокую корреляцию результатов измерений как по всей ширине образцов, так и по отдельным участкам, что связано со схожей линейной регрессией.

При обработке данных с помощью SMA с 5-летним сглаживанием наблюдается незначительная обратная закономерность: с увеличением суммарной ширины годовых слоев коэффициент корреляции повышается, что может быть объяснено большей вариативностью полученных данных (более широкой областью рассеивания данных относительно среднего) и, как следствие, ростом стандартного отклонения.

SMA с 11-летним сглаживанием при исследовании методом сверления непригоден, потому что фактическое количество годовых слоев с минимально значимой корреляцией может быть меньше 11 (суммарной шириной 32,8 мм).

К наиболее жестким и точным статистическим методам обработки ширины годовых слоев относятся SMA с 3-летним сглаживанием и TMA, они имеют равные стандартные отклонения, которые являются наименьшими среди полученных всеми методами обработки данных, представленными в работе.

Высокая степень взаимосвязи независимых переменных соответствует коэффициенту корреляции $r > 0,7$. Исходя из вышеизложенного, выполнение дендрохронологических исследований и определение ширины (прироста) годовых слоев древесины сосны методом измерения сопротивления сверлению рекомендуется выполнять с учетом ограничений: максимальное количество годовых слоев в образце – 17 или максимальная суммарная ширина годовых слоев в образце – 36,6 мм.

Основными причинами снижения точности определения радиального прироста методом измерения сопротивления сверлению являются геометрические параметры режущей части тонкого бурового сверла и одновременное взаимодействие режущих кромок сверла с ранней и поздней древесиной в процессе сверления годовых слоев малого радиуса, неточность определения и задания радиального направления просверливания, пороки древесины и возможное трение хвостовика сверла, что согласуется с результатами исследований [20, 21, 24, 26]. В ходе выполнения работы установлено, что немаловажную роль в снижении точности измерения показателей радиального прироста играет также упругость тонкого бурового сверла.

В результате исследований наблюдалось неконтролируемое постепенное изменение траектории сверления с начального момента контакта сверла с поверхностью образца (рис. 5, *a*). Это связано с тем, что в начале процесса сверления происходит незначительное отклонение направления режущей части сверла в сторону, соответствующую направлению первоначального контакта главной режущей кромки сверла с древесиной (точка А на рис. 5, *a*). Фактическая траектория сверления может иметь закругленную форму (рис. 5, *a*). Таким образом, на широких образцах доски наблюдался выход сверла на одну из их пластей. При измерениях может также наблюдаться неконтролируемое изменение направления сверления в процессе просверливания заполненных или пустых полостей разного рода (трещины, смоляные карманы, грибные поражения и биологические повреждения) (рис. 5, *b*). Здесь существуют 2 вида отклонения траектории проникновения тонкого бурового сверла:

при небольшой неперпендикулярности поверхности контакта с направлением подачи, равной $5 \dots 10^\circ$, прослеживается закономерность изменения траектории по закону, описанному выше (рис. 5, *a*);

при значительных углах неперпендикулярности происходит проскальзывание сверла по стенке полости (рис. 5, б), сопровождающееся отклонением траектории в том же направлении, и чем размер полости в плоскости сверления больше, тем больше и сложнее для прогнозирования отклонения.

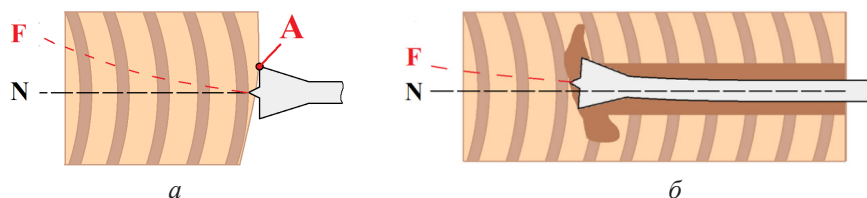


Рис. 5. Изменение направления сверла: *a* – в начальный момент сверления; *б* – при просверливании заполненных или пустых полостей (F – фактическое направление сверления; N – номинальное направление сверления)

Fig. 5. Changing the direction of the drill: *a* – at the initial moment of drilling; *б* – when drilling filled or empty cavities (F – actual drilling direction; N – nominal drilling direction)

Следует отметить упругие С- и S-образную деформации хвостовика сверла (рис. 6) под воздействием статической и динамической осевой нагрузок. Предполагается, что они не оказывают ощутимого влияния на траекторию сверления, поскольку на глубине свыше 10...15 мм отверстие достаточно плотно заполняется стружкой, что ограничивает изгиб хвостовика сверла. Однако в начале процесса сверления значительная часть тонкого бурового сверла находится в устройстве, а исходя из конструктивных особенностей механизмов стабилизации сверла [5, 6] при сверлении в радиальном направлении отмечаются значительные упругие динамические деформации. При этом чем выше скорость подачи, ширина ранних зон годичных слоев и их плотность, тем более заметна деформация тонкого бурового сверла. Деформации возникают вследствие последовательных процессов осевого сжатия и частичной релаксации тонкого бурового сверла при просверливании поздних и ранних зон годичных слоев соответственно. Такая работа сверла может добавлять инструментальную ошибку в результаты измерения сопротивления сверлению, а именно при фиксации сверла и последующем измерении радиального прироста.

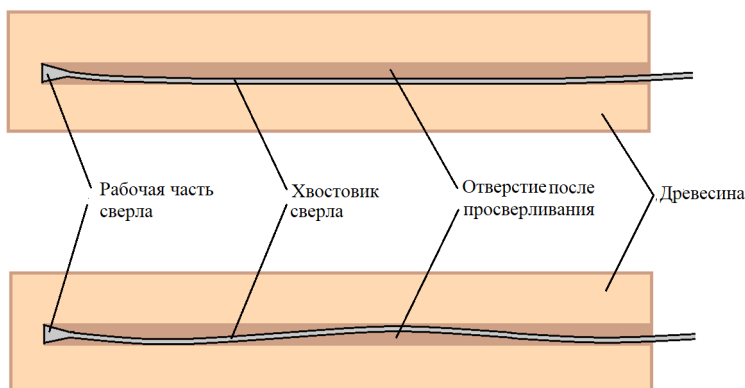


Рис. 6. Упругая деформация хвостовика тонкого бурового сверла: С- (сверху) и S-образная (снизу)

Fig. 6. Elastic deformation of a thin drill bit shank: C-shaped (top) and S-shaped (bottom)

Для повышения точности метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологических исследованиях предлагается:

разработать методику, в том числе с применением специального или вновь разработанного инструмента, для более точного определения сердцевин и радиального просверливания дерева или круглого лесоматериала;

повысить жесткость тонкого бурового сверла;

обеспечить требуемую фиксацию тонкого бурового сверла в процессе его первоначального контакта с древесиной и внутри устройства;

модернизировать устройство и исследовать точность метода, основываясь на прямом измерении усилия подачи сверла при определении ширины годичных слоев, например с помощью тензодатчика.

Заключение

Существенное влияние на точность метода измерения сопротивления сверлению при определении вариации свойств и прироста древесины оказывают технические причины, связанные с упругостью тонкого бурового сверла и конструкцией механизмов его стабилизации, а также невозможность оперативного определения сердцевин древесины для строго радиального направления просверливания.

По результатам выполнения дендрохронологических исследований с помощью устройства ResistYX для получения точных ($r > 0,7$) данных о приросте годичных слоев рекомендуется измерять на одном образце не более 17 годичных слоев, что соответствует средней суммарной ширине годичных слоев 36,6 мм. Ограничения установлены для современных устройств, снабженных упругими тонкими буровыми сверлами с постоянной скоростью подачи, работа которых основана на определении электрической мощности приводов вращения и подачи сверла.

Дальнейшие исследования в обозначенном направлении будут связаны с оценкой точности определения радиального прироста хвойных пород древесины по усилию подачи тонкого бурового сверла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алметов А.Н. Совершенствование конструкции бурава для извлечения кернов древесины из растущих деревьев различных пород: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2001. 174 с.

Almetov A.N. *Improving the Design of a Drill for Extracting Wood Cores from Growing Trees of Various Species*: Cand. Eng. Diss. Mari State Technical University. Yoshkar-Ola, 2001. 174 p. (In Russ.).

2. Демаков Ю.П., Нуреева Т.В. Групповая и индивидуальная изменчивость годичного прироста деревьев по высоте в культурах сосны Марийского Заволжья // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 3(43). С. 25–45.

Demakov J.P., Nureeva T.V. Group and Individual Variability of Annual Tree Height Growth in Pine Plantations of Mari Transvolga Region. *Volga State University of Technology Bulletin. Forest. Ecology. Nature Management*, 2019, no. 3, iss. 43, pp. 25–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.3.25>

3. Колесникова А.А. Исследование свойств древесины по кернам. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 178 с.

Kolesnikova A.A. *Research of Wood Properties by Increment Cores*. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University Publ., 2002. 178 p. (In Russ.).

4. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология / ВГЛТУ. 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 139 с.

Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrochronology*: Voronezh, Voronezh State Academy of Forestry Engineering Publ. 2013. 139 p. (In Russ.).

5. Патент № 95128 U1 РФ, МПК G01N 3/40 (2006.01), G01N 33/46 (2006.01), B23B 41/00 (2006.01). Устройство для измерения сопротивления сверлению: № 2010106686/22: заявл. 24.02.2010: опубл. 10.06.2010 / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов, Т.В. Бычкова.

Sharapov E.S., Chernov V.Yu., Bychkova T.V. *Device for Drilling Resistance Measurements*. Patent RF, no. RU 95128, 2010. (In Russ.).

6. Патент № 2607064 C2 РФ, МПК G01N 3/40 (2006.01), G01N 33/46 (2006.01), B23B 49/00 (2006.01). Устройство для измерения сопротивления исследуемого материала сверлению: № 2014140884: заявл. 09.10.2014: опубл. 10.01.2017 / В.Ю. Чернов, Е.С. Шарапов, Е.В. Смирнова, О.А. Соловьева.

Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Smirnova E.V., Solovieva O.A. *Device for Drilling Resistance Measurements*. Patent RF, no. RU 2607064, 2017. (In Russ.).

7. Румянцев Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 109 с.

Rumyantsev D.E. *History and Methodology of Silvicultural Dendrochronology*. Moscow, Moscow State Forest University Publ. 2010. 109 p. (In Russ.).

8. Свидетельство 2016662108 РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ ResistVIEW, 1.0: № 2016619406: заявл. 06.09.2016: зарег. 31.10.2016 / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов, Е.В. Смирнова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «ПГТУ».

Sharapov E.S., Chernov V.Yu., Smirnova E.V. *Certificate on State Registration of the Computer Program no. 2016662108 «ResistVIEW, 1.0»*, 2016. (In Russ.).

9. Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Торопов А.С. Определение плотности древесины методом измерения сопротивления сверлению: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. 200 с.

Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Toropov A.S. *Evaluation of Wood Density Using the Drilling Resistance Measurement Method*. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ. 2019. 200 p. (In Russ.).

10. Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Торопов А.С., Смирнова Е.В., Павлов Д.А. Точность определения плотности древесины методом измерения сопротивления сверлению // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. КГТУ. Кострома: КГТУ, 2015. С. 42–45.

Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Toropov A.S., Smirnova E.V., Pavlov D.A. The Accuracy of Wood Density Evaluation by Drilling Resistance Measurements. *Proceedings of the third International Conference "Current problems and prospects for the development of the timber industry"*, Kostroma State Technological University. Kostroma, Russian Federation, 2015, pp. 42–45. (In Russ.).

11. Черных Н.Б. Дендрохронология и археология. М.: Нох, 1996. 212 с.

Chernyh N.B. *Dendrochronology and Archeology*. Moscow, Nox Publ. 1996. 212 p. (In Russ.).

12. Шарапов Е.С. Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2019. 340 с.

Sharapov E.S. *Improvement of Methods and Tools for Quasi-nondestructive Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Wood and Wood materials*: Doc. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University, 2019. 340 p. (In Russ.).

13. Шарпов Е.С., Смирнова Е.В. Определение физико-механических свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению // Вестн. ПГТУ. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 4(12). С. 120–134.

Sharapov E.S., Smirnova E.V. Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Wood by the Drilling Resistance Measurement. *Volga State University of Technology Bulletin. Materials. Constructions. Technologies*, 2019, no. 4, iss. 12, pp. 120–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.4.120>.

14. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirduyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Hantemirov R.M. *Methods of Dendrochronology. Part 1. Fundamentals of Dendrochronology. Collecting and Obtaining Tree-ring Information*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University Publ., 2000. 80 p. (In Russ.).

15. Chantre G., Rozenberg P. Can Drill Resistance Profiles (Resistograph) Lead to Within-profile and Within-ring Density Parameters in Douglas-fir Wood? *Proceedings of CTIA – International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO). International Wood Quality Workshop: Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value*. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Québec, Canada, 1997, pp. 41–47.

16. Guller B., Guller A., Kazaz G. Is Resistograph an Appropriate Tool for the Annual Ring Measurement of Pinus Brutia? *Proceedings of the International Conference NDE Safety*. Czech Republic, 2012, pp. 89–94.

17. Kraler A., Beikircher W., Zingerl Ph. Suitability of Drill Resistance Measurements for Dendrochronological Determination. *World Conference on Timber Engineering, Strength and Serviceability – Extreme Events*. Aucklande, New Zealand, 2012, vol. 2. 302 p.

18. Kraler A., Beikircher W., Zingerl Ph. Strength Determination of Aged Wood, From 1250AD to Present, with Nondestructive and Semidestructive Test Methods. *World Conference on Timber Engineering, Strength and Serviceability – Extreme Events*. Aucklande, New Zealand, 2012, vol. 2, 188 p.

19. Mattheck C., Bethge K., Albrecht W. How to Read the Results of Resistograph M. *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*, 1997, vol. 21, iss. 4, pp. 331–346. <https://doi.org/10.1080/03071375.1997.9747179>

20. Nutto L., Biechele T. Drilling Resistance Measurement and the Effect of Shaft Friction – Using Feed Force Information for Improving Decay Identification on Hard Tropical Wood. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 239. *Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. 22–25 September 2015*, 2015, pp. 154–161.

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, iss. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058>

22. Orozco-Aguilar L., Nitschke C.R., Livesley S.J., Brack C., Johnstone D. Testing the Accuracy of Resistance Drilling to Assess Tree Growth Rate and the Relationship to Past Climatic Conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, vol. 36, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.09.010>

23. Pressler M.R. Der Forstliche Zuwachsbohrer [The forestry increment borer]. *Tharander Jahrbuch. Arnoldische Buchhandlung, Leipzig. Dritte Abtheilung III*, 1866, pp. 137–209. (In Germ).

24. Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E. Resistograph and X-ray Density Charts of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species. *Holzforschung*, 1996, vol. 50, iss. 4, pp. 303–311. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303>
25. Rinn F. Resistographic Visualization of Tree Ring Density Variations. *Proceedings of the International Conference Tree Rings and Environment*. Tucson, AZ, USA, Radiocarbon, 1996, pp. 871–878.
26. Sharapov E., Brischke C., Militz H. Effect of Grain Direction on Drilling Resistance Measurements in Wood. *International Journal of Architectural Heritage*, 2021, vol. 15, iss. 2, pp. 250–258. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1766158>
27. Sharapov E., Wang X., Smirnova E. Drill Bit Friction and its Effect on Resistance Drilling Measurements in Logs. *Proceedings of the 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 12–15 September 2017, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2017*, pp. 405–415.
28. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Prediction of Modulus of Elasticity in Static Bending and Density of Wood at Different Moisture Contents and Feed Rates by Drilling Resistance Measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, vol. 77, pp. 833–842. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2>
29. Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Bulcke J.V., Wang X. Non-destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us About Wood Property Variation. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 728. 50 p. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
30. Tannert T., Anthony R., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., Rinn F., Widmann R., Yamaguchi N. 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>
31. Wang S.Y., Chiu C.M., Lin C.J. Application of the Drilling Resistance Method for Annual Ring Characteristics: Evaluation of Taiwania (*Taiwania cryptomeribides*) Trees Grown with Different Thinning and Pruning Treatments. *Journal of Wood Science*, 2003, vol. 49, iss. 2, pp. 116–124. <https://doi.org/10.1007/s100860300018>
32. Wang S.Y., Lin C.J. Application of the Drill Resistance Method for Density Boundary Evaluation of Earlywood and Latewood of Taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hay.) Plantation Wood. *Taiwan Journal of Forest Science*, 2001, vol. 16, iss. 3, pp. 196–199.

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