

## ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

---

УДК 630\*52:674.038.15

### КВАЛИМЕТРИЯ ЛЕСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ

#### 1. ОБЗОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

**В. А. Усольцев**

*Уральский государственный лесотехнический университет  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37*

---

E-mail: Usoltsev50@mail.ru

*Поступила в редакцию 25.05.2020 г.*

При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов биомассы необходимо знать закономерности динамики плотности древесины растущих деревьев как их ключевой экологической характеристики, требующей применения неразрушающих методов. Пилодин-метод как один из наиболее простых и доступных востребован в селекционных программах, однако отбор по показателю плотности, получаемому пилодин-тестером, оказался эффективным не для всех древесных видов, а изменчивость плотности, объясняемая этим методом, варьирует от 27 до 92 %. Квалиметрия методом сопротивления бурению древесины на базе резистографа как более чувствительного прибора по сравнению с пилодин-тестером также нашла широкое применение в селекционных программах, но оба метода основаны на локальном зондировании, и его экстраполяция на все дерево дает смещения оценок. Применение ригидрометр-конструкции лишено недостатка, присущего двум вышеупомянутым методам, но он оказался сравнительно трудоемким для выполнения множественных замеров. Акустический метод оценки модуля упругости и плотности древесины чувствителен к наличию пороков древесины и позволяет снять противоречие целевых установок селекции, направленных одновременно на повышение скорости роста и плотности древесины. Радиационные методы успешно регистрируют внутрикольцевую плотность, но требуют применения дорогого оборудования. Преимущество NIR-спектроскопии (ближнего инфракрасного спектра) перед всеми остальными методами состоит в возможности оценивать химию древесины и выход целлюлозы, но она не дает прямой оценки и требует специальной калибровки. Таким образом, любая техника имеет свои ограничения, и краткий ее анализ может способствовать выбору варианта, наиболее пригодного для того или иного метода неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** *квалиметрия древесины, растущие деревья, пилодин-тестер, резистограф, ригидрометр, акустические и радиационные методы, NIR-спектроскопия.*

DOI: 10.15372/SJFS20250108

**Электронное приложение** «Квалиметрия лесных деревьев. 1. Обзор методов неразрушающего контроля» см. по ссылке: [www.sibran.ru/journals/Usoltsev.pdf](http://www.sibran.ru/journals/Usoltsev.pdf)

## ВВЕДЕНИЕ

Прогнозируемые изменения климата, вызванные выбросами парниковых газов, изменяют ландшафтные и экологические условия, увеличивают нестабильность во многих экосистемах и повышают глобальную роль лесного покрова (Malavasi et al., 2016). В условиях непрерывно возрастающей биосферной роли лесов становится все более актуальной оценка их биологической продуктивности и углерод депонирующей способности. При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов биомассы необходимо знать закономерности изменения не только количественных, но и качественных их характеристик с возрастом, а также под влиянием экологических и других факторов (прежде всего плотности древесины и коры биомассы деревьев). Их исследования связаны с областью квалитметрии, или науки о количественной оценке качества (Азгальдов, Райхман, 1973). Поскольку многие из квалитметрических характеристик лесных деревьев трудно измерить, наши знания об их изменении часто недостаточны, как и наше понимание их реакции на селекционные и лесоводственные мероприятия. Наиболее востребованы неразрушающие методы, позволяющие автоматизировать процесс контроля названных характеристик и, как следствие, повысить его эффективность (Симоненко, 2014).

В июне 2010 г. в Москве состоялась 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю (10 ЕКНК), где обсуждались современные методы неразрушающего контроля в различных областях науки и техники: магнитный, электромагнитный, ультразвуковой, радиационный, акустический, капиллярный, оптический, инфракрасный, микроволновый и др. (Proceedings..., 2011). В сентябре 2017 г. в США прошел Международный симпозиум по неразрушающей оценке и тестированию растущих деревьев, круглых сортиментов, пиломатериалов и деревянных конструкций, что свидетельствует об актуальности проблемы неразрушающего контроля, в том числе квалитметрии растущих деревьев (Wang et al., 2017).

В зависимости от принципа работы контрольных средств виды неразрушающего контроля подразделяются на магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический и различаются по характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом, по первичным информативным параметрам и

по способам получения первичной информации (ГОСТ 23829-85..., 1986; ГОСТ 18353-79..., 1987; ГОСТ 16483.7-71..., 2006; Каневский, Сальникова, 2007).

Для оптимального использования российских лесных ресурсов необходимы детальные знания об изменениях квалитметрических показателей лесной биомассы и их влиянии на стоимость конечного продукта. Например, результаты исследования квалитметрии стволов тонкомерных древостоев сосны желтой (*Pinus ponderosa* P. Lawson & C. Lawson) в северных районах штата Аризона (США) позволили существенно повысить их потребительную стоимость (Ruggirello, 2017). Современные методики неразрушающей оценки открывают возможности для значительного углубления наших знаний о лесных ресурсах, вплоть до их биоакустики, например «подслушивания» звуков, издаваемых короедами в поврежденных деревьях (Allison, 2017). Однако любая техника имеет свои ограничения и важно суметь выбрать наиболее пригодную для того или иного применения (Schimleck et al., 2019).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже будут рассмотрены методы неразрушающего контроля, апробированные на растущих деревьях и не требующие спиливания дерева, хотя некоторые из них, использующих, например, пилотин-тестер или резистограф, предполагают локальное незначительное повреждение древесины ствола. Наибольшее распространение получили две разновидности методов неразрушающего контроля: для работы в полевых условиях (с сохранением целостности дерева) – это акустические, пилотин-резистограф- и ригидо-метр-методы, а для работы в лабораторных условиях (с сохранением целостности образца) – это компьютерная томография, инструментарий DiscBot, ближняя инфракрасная спектроскопия, зондирование дисков ствола в радиальном направлении (микроденситометрия) и технология SilviScan (Polge, 1966; Rudnicki et al., 2017; Senalik et al., 2017; Tiitta, Tomppo, 2017; Schimleck et al., 2019). Основное внимание будет уделено методам неразрушающего контроля, применяемым в полевых условиях, главным образом плотности и влажности древесины, а также связанным с ними модулям упругости и разрыва.

Использование возрастного (приростного) бурава для взятия образцов (кernов) древесины у растущих деревьев получило развитие в Гер-

мании в середине XIX столетия (Pressler, 1866) с целью определения прироста ствола без его спиливания. Метод получил широкое распространение в дендрохронологии (Шиятов и др., 2000; Schweingruber, 2001). Создание безвинтового бурава расширило возможности его применения (Алметов, 1999, 2001). Взятые керны часто используются для определения базисной плотности древесины. Однако они дают лишь локальные значения плотности, в то время как внутри данного дерева можно наблюдать ее значительное варьирование (Zobel, Jett, 1995). На принципе механического внедрения того или иного тестера в древесину растущего ствола и сегодня основаны некоторые методы неразрушающего контроля древесины.

Традиционные методы оценки качественных характеристик древесины растущего дерева, таких как ее плотность, угол микроволокон целлюлозы и модули упругости и разрыва, являются наиболее важными механическими характеристиками древесины (Полубояринов, 1976а; Успенский, 1980; Zobel, Jett, 1995; Hannrup et al., 2004; Aichholzer et al., 2018) и необходимы при селекции деревьев, направленной на улучшение качества конечного продукта (Роне, 1970; Ivković et al., 2006). Однако традиционные измерения этих характеристик либо дорогостоящи, либо разрушают объект, поэтому следует разработать методы быстрого сканирования растущих деревьев (Matheson et al., 2008). Прежние программы селекции древесных видов были ориентированы только на увеличение прироста и приводили к сокращению оборота рубки для плантационных древесных пород. У деревьев повышалась доля ювенильной древесины, обладающей более низкой плотностью, более высоким углом микроволокон и более низким модулем упругости, что снижало стоимость конечных продуктов (Amishev, Murphy, 2008; Wu

et al., 2008; Fundova, 2012). В связи с этим важно количественно оценить генетическую изменчивость и генетическую корреляцию между ростовыми характеристиками и качественными признаками древесины, в частности ее плотностью (Armstrong et al., 1984; Zhang, 1995; Мелехов и др., 2003; Chen et al., 2015), а для этого необходимы точные и недорогие методы неразрушающего контроля.

### Пилодин-метод

**Общие положения.** Пилодин-тестер разработан в Швейцарии и первоначально предназначался для определения степени поражения телефонных столбов мягкой гнилью (Cown, 1978, 1982; Hansen, 2000). Для применения в лесном хозяйстве рекомендуются модели Pilodyn 6J Bark и Pilodyn 6J Forest, работающие по одному и тому же основному принципу и с одинаковой точностью. Основное различие этих моделей заключается в более совершенном спусковом механизме на последнем из них. Pilodyn производится компанией PROCEQ в Швейцарии и распространяется по всему миру компанией Kai R. Spangenberg (Дания) (Hansen, 2000).

**Применение пилодин-метода в селекционных программах.** Пилодин-тестер является перспективным инструментом для быстрой и экономичной оценки относительной плотности древесины в селекционных программах, когда требуются многочисленные и достаточно точные измерения. Метод основан на внедрении в древесину подпружиненного ударного штифта диаметром 2.5–3.0 мм при стабильной силе удара. Глубина, на которую проникает штифт, указана на приборе, и она обратно пропорциональна плотности древесины (рис. 1). Основные преимущества связаны с быстротой и простотой метода и с неразрушающим отбором проб.



Рис. 1. Принцип работы (а) и схема пилодин-тестера (б).

Пилодин-тестер дает оценку не фактической, а относительной плотности древесины, которая может быть использована для ранжирования различных генетических «единиц» (например, клонов, семейств, провени, в частности в Зимбабве были выделены более 20 провениенций сосны островной (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon) в диапазоне глубин проникновения штифта от 20.2 до 24.6 мм) по данному показателю.

Сопоставление значений плотности древесины, полученных по извлекаемым ядрам и по калибровочным показателям пилодина, свидетельствует о возможности использования метода для ранжирования провениенций и семейств, применение его для дифференциации объектов в пределах семейства по плотности древесины путем отбора проб у отдельных деревьев более неопределенно, поскольку не все исследования подтверждают такую возможность (Hansen, 2000).

На примере 12 клонов криптомерии японской (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don) установлен коэффициент детерминации связи между глубиной проникновения штифта и плотностью древесины, равный 0.77. Косвенная селекция с использованием пилодин-тестера обеспечила 87 % генетического выигрыша, полученного прямой селекцией по плотности древесины. Сделан вывод, что пилодин-метод полезен для генетического улучшения криптомерии по показателю плотности древесины (Fukatsu et al., 2011).

Использование пилодин-тестера в селекционной программе сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) позволило выявить наличие тесной генетической корреляции на уровне наследуемости 84 % (Sprague et al., 1983). Пилодин-метод для оценки плотности древесины в селекционных программах был рекомендован несколькими исследователями (King et al., 1988; Yanchuk, Kiss, 1993; Greaves et al., 1996). В частности, в селекционных программах в Нью-Брансуике выявлена возможность применения пилодин-метода для сосны (Villeneuve et al., 1987).

Однако значимой корреляции между плотностью древесины и глубиной проникновения иглы пилодин-тестера не выявлено у 24-летней ели ситхинской (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) (Livingston et al., 2004), у 8–15-летней е. черной (*P. mariana* (Mill.) Britton, Sterns & Poggenb.) (Villeneuve et al., 1987), у 12–14-летних деревьев сосны приморской (*Pinus pinaster* Aiton) (Pot et al., 2002; Aguiar et al., 2003). Сделан вывод, что пилодин-тест не является надежным инструмен-

том для оценки плотности древесины у молодых деревьев некоторых хвойных видов.

**Связь фактической плотности древесины с показаниями пилодин-тестера.** Определение фактической плотности древесины требует параллельного извлечения ядер с помощью возрастного (приростного) бурава Пресслера, по измерению массы и объема которых в лабораторных условиях определяется их плотность. В экспериментах, проведенных Р. Hoffmeyer (1978) на деревьях пихты белой (*Abies alba* Mill.), получен коэффициент детерминации при оценке плотности древесины извлекаемого ядра по глубине проникновения иглы, равный 0.50. Подобный эксперимент на стволах 10- и 30-летних деревьев сосны замечательной (*Pinus radiata* D. Don) показал коэффициент детерминации соответственно 0.92 и 0.74 (Cown, 1978, 1982), у ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) – 0.81, туи гигантской (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) – 0.72, сосны веймутовой (*Pinus strobus* L.) – 0.71, лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) – 0.69 (Gao et al., 2017), сосны ладанной – 0.66 (Taylor, 1981), ели сизой (*Picea glauca* (Moench) Voss) – 0.67 (Micko et al., 1982), у трех видов сосен в Испании – от 0.48 до 0.50 (Maldonado et al., 2007), у 10-летней сосны скрученной (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon) – 0.27 (Wang et al., 1999), у 34-летних деревьев сосны приморской разных провениенций – 0.53 (Notivol et al., 1992) и у 20-летней сосны ладанной (Sprague et al., 1983), 12-летней дугласии (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) (King et al., 1988), 15-летней ели Энгельмана (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm.) (Yanchuk, Kiss, 1993) и у 7-летнего эвкалипта блестящего (*Eucalyptus nitens* (H. Deane & Maiden) Maiden) – от 0.41 до 0.81 (Greaves et al., 1996), у ели европейской в Германии – 0.83 (Görlacher, 1987), у сосны Эллиота (*Pinus elliottii* Engelm.) на уровне дерева – 0.45 и на уровне семейства – 0.75 (Gough, Barnes, 1984). При одной и той же глубине проникновения штифта (13 мм) плотность древесины сосны замечательной в возрасте 10, 20 и 30 лет была равна соответственно 370, 400 и 420 кг/м<sup>3</sup> (Cown, 1982).

В практических целях важна плотность не столько древесины извлекаемого ядра, сколько древесины всего ствола. Коэффициент детерминации уравнения линейной связи плотности древесины сосны замечательной с глубиной проникновения штифта оказался выше при анализе плотности древесины всего ствола по сравнению с плотностью, определенной на вы-

соте груди (0.85 и 0.81 соответственно), а стандартная ошибка уравнения была соответственно ниже (7 и 13 кг/м<sup>3</sup>). Более высокое значение коэффициента детерминации в первом случае объясняется тем, что в регрессионный анализ были включены усредненные, а не исходные эмпирические значения, как это было во втором случае.

Сделан вывод, что этот быстрый, неразрушающий метод оценки плотности может использоваться, когда нет времени и средств для применения более сложных методов (Cown, 1982). Однако метод требует учета влажности древесины, поскольку она оказывает существенное влияние на глубину проникновения штифта. При снижении влажности ниже точки насыщения волокон глубина проникновения штифта уменьшается, что смещает оценку квалиметрических показателей. При измерении плотности древесины выше точки насыщения волокон влияния влажности не обнаружено (Smith, Morrell, 1986; Llana et al., 2015, 2018).

Как уже отмечалось, существующий пилодин-метод позволяет измерить плотность не на всем сечении ствола, а только на его периферийной части, что влияет на точность определения ее среднего значения. Применявшийся до сих пор тестер, основанный на принципе вдавливания штифта в древесину, был усовершенствован, что позволило внедрять штифт диаметром 3 мм до сердцевины ствола. Штифт совмещен со специальным кондуктором, крепящим его к универсальной тест-конструкции. С ее помощью сила, необходимая для вдавливания штифта, измерялась при постоянной скорости перемещения. На примере ели европейской показано, что механическая работа, необходимая для вдавливания штифта, прямо пропорциональна плотности древесины по всей глубине его проникновения, и эта связь характеризуется коэффициентом детерминации 0.75 (Kloiber et al., 2009).

**Базисная плотность и удельный вес древесины.** Базисная плотность древесины (basic density) представляет собой отношение массы абсолютно сухого образца к его объему при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок. Показатели базисной плотности наиболее точны, сопоставимы и могут быть непосредственно использованы для преобразования объема свежей древесины в биомассу. Деревья с меньшей плотностью древесины имеют больше внутренних пустот и меньше лигнина в клетках древесины, что обычно соответствует широким годичным кольцам и быстрорастущим видам (Donegan et al., 2014).

Наряду с базисной плотностью широко применяется понятие удельного веса древесины (*wood specific gravity*). Плотность древесины – это ее масса, приходящаяся на единицу объема, а удельный вес древесины – это безразмерное отношение плотности древесины к плотности воды. Поскольку плотность воды обычно составляет 1 г/см<sup>3</sup>, названные два показателя имеют одно и то же значение, если измеряются при одинаковом содержании влаги (Glas, Zelinka, 2010; Williamson, Wiemann, 2010; Donegan et al., 2014). Предполагается, что при исследовании квалиметрии древесины растущих деревьев предпочтение оказывается «кажущейся» плотности, т. е. плотности в свежем состоянии (Gao et al., 2017). Показатель базисной плотности значительно повышает точность оценок углеродного запаса и изменений углеродного баланса и считается вторым по значимости предиктором биомассы в тропических лесах после диаметра ствола на уровне груди (Chave et al., 2005). Поскольку с помощью пилодин-тестера плотность древесины может быть косвенно измерена при относительно низких затратах, метод получил широкое распространение в лесоводственных исследованиях (Sprague et al., 1983; Villeneuve et al., 1987; Chantre et al., 1992; Adams et al., 1993; Schermann, 1994; Rozenberg, Van de Sype, 1996).

### Квалиметрия методом сопротивления бурению древесины

**Общие положения.** Наряду с пилодин-методом широкое распространение получила квалиметрия методом сопротивления бурению древесины, в частности резистограф-метод (Rinn et al., 1996; Chantre, Rozenberg, 1997; Лавров, 2015) и торсиометр-метод (Polge, Keller, 1970; Nicholls, Roget, 1977; Nepveu, 1979). Резистограф представляет собой устройство, предназначенное для измерения мощности, необходимой для бурения отверстия в древесине ствола, а торсиометр-метод основан на измерении крутящего момента на приростном бураве с помощью прикрепленной к нему калибровочной шкалы (рис. 2–4).

**Резистограф-метод.** В первом варианте бура с замером сопротивления бурению использован пружинный регистрирующий механизм. Затем было установлено, что электронное регулирование и электронная запись потребляемой двигателем энергии могут обеспечить гораздо более надежные и воспроизводимые кольцевые резистивные профили, чем подпружиненный меха-

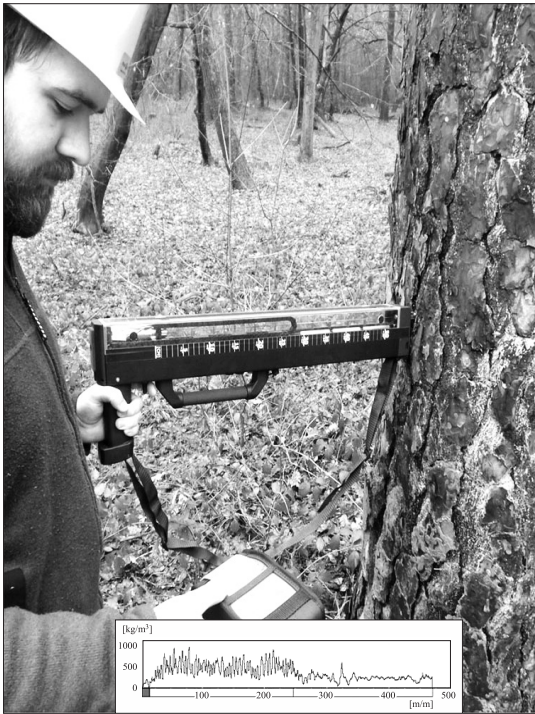


Рис. 2. Электронно регулируемое резистивное сверление растущего дерева с помощью инструмента Resistograph® (Gao et al., 2017).

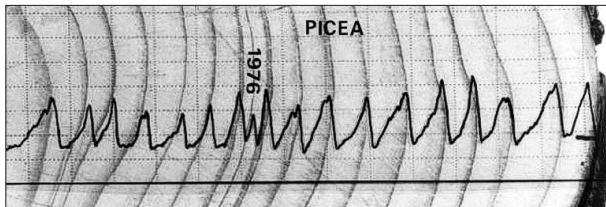


Рис. 3. Профилограмма изменения плотности внутри древесных колец, полученная путем резистивного бурения ствола ели европейской (Gao et al., 2017).



Рис. 4. Торсиометр, прикрепленный к возрастному бурову (Cown, 1978).

низ (Rinn, 2012). После тысяч испытаний стало ясно, что вал диаметром 1.5 мм и наконечником шириной 3 мм – хороший компромисс между минимизацией повреждений и максимизацией информации в профилях (Rinn, 1989, 2012). В России В. И. Федюковым с соавт. (2016) разработано устройство УНДПС-1 для неразрушающей диагностики физико-механических свойств древесины по сопротивлению сверлению непосредственно в лесных условиях с одновременным извлечением керна для дальнейших исследований.

Благодаря новым электронным усовершенствованиям инструмент Resistograph может одновременно измерять, отображать и записывать относительный резистивный профиль посредством прямого измерения потребляемой электроэнергии. Это система резистивного бурения, которая измеряет профиль относительной плотности древесины, когда вращающийся бур входит в древесину с постоянной скоростью, и предполагается, что сопротивление бурению (крутящий момент) напрямую связано с плотностью древесины (Rinn, 1989; Rinn et al., 1996). В процессе измерения характеристик бурения относительное сопротивление бурению, усилие и скорость подачи могут непрерывно измеряться в зависимости от траектории бурения (Matthesck et al., 1997). По мере того как бур продвигается в древесину, измеряется и регистрируется сопротивление его проникновению вдоль траектории. Данные относительного сопротивления записываются на дисплее в цифровом формате и могут передаваться на интерфейсный вход персонального компьютера (Gao et al., 2017).

В процессе квалитетических исследований на основе резистивного бурения установлено наличие тесной линейной корреляция между сопротивлением сверлению и плотностью древесины (Görlacher, Hättich, 1990; Rinn et al., 1996). Дальнейшие исследования структурных элементов древесины показали умеренную или тесную связь между измеренными значениями сопротивления бурению и плотностью древесины с коэффициентами детерминации 0.67 (Ceraldi et al., 2001), 0.44 (Zhang et al., 2009), 0.89 (Park et al., 2006), 0.93 (Bouffier et al., 2008) и 0.62–0.78 (Шарапов, Чернов, 2014).

Растет интерес к использованию метода резистивного бурения в селекционных программах. В программе генетического улучшения потомств сосны ладанной с использованием инструмента Resistograph® исследована относительная плотность древесины растущих де-

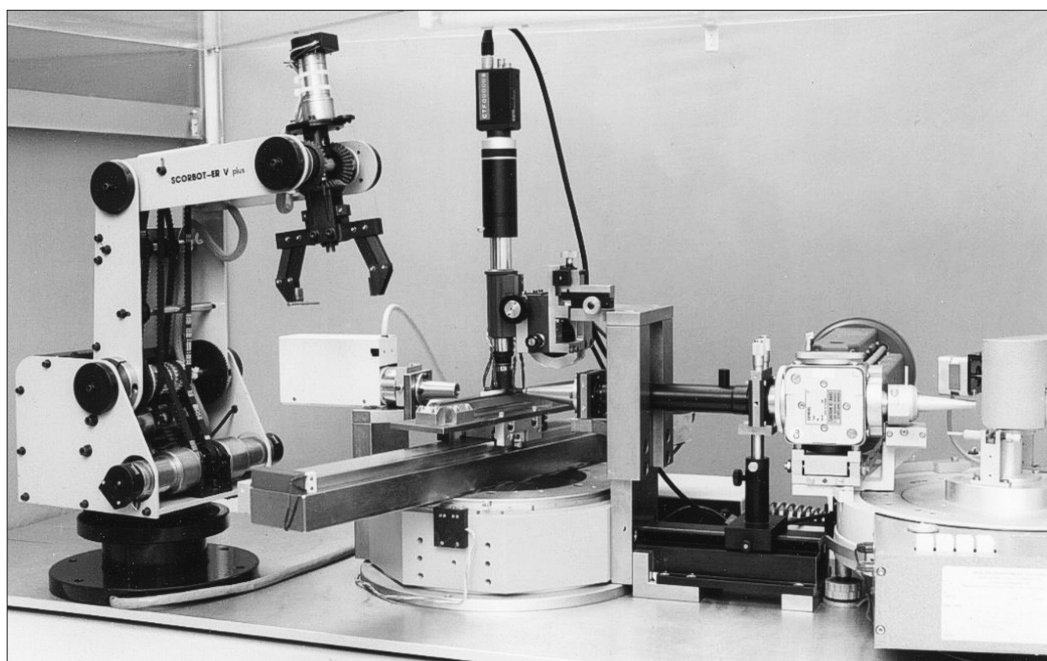


Рис. 5. Общий вид установки SilviScan (Schimleck et al., 2019).

ревьев. Установлена тесная корреляция между средними значениями сопротивления бурению и плотностью древесины со значимым генетическим контролем на уровне семейства. Однако индивидуальные фенотипические корреляции оказались относительно слабыми (Isik, Li, 2003). Полученные результаты подтверждены другими исследователями (Gantz, 2002; Charette et al., 2008; Gwaze, Stevenson, 2008; Eckard et al., 2010).

Применение резистивного бурения при оценке удельного веса древесины на клональных плантациях молодых эвкалиптов показало, что глубина проникновения бура оказывает существенное влияние на зависимость между средней амплитудой сопротивления и удельным весом древесины (Oliveira et al., 2017). Наблюдается четкая тенденция ослабления корреляции по мере увеличения глубины проникновения сверла вследствие того, что накапливающаяся в буровом канале щепка вызывает трение на вращающемся валу бура (Rinn, 2012). Трение вала о щепку было минимальным при сверлении древесины хвойных пород (Rinn et al., 1996), но обнаружено значительное смещение результата при бурении древесины некоторых тропических видов (Nutto, Biechele, 2015; Oliveira et al., 2017). Для оценки удельного веса древесины эвкалиптовых деревьев рекомендовано использовать среднюю амплитуду сопротивления при бурении ствола лишь от коры до сердцевины, но не по всему диаметру (Oliveira et al., 2017).

При реализации французской селекционной программы установлено, что пилотин-тестер не является надежным инструментом для оценки плотности древесины у молодых деревьев сосны приморской (Bouffier et al., 2008). Был применен инструментарий на основе резистографа F-300S, показания которого и плотность древесины кернов были ограничены внешним слоем 5 см. Авторы хотели, чтобы по показаниям резистографа и связанной с ними плотностью древесины оценить возможность селекции сосны приморской на ювенильной стадии, результаты которой можно ожидать к возрасту спелости. Была обнаружена высокая корреляция между данными резистографа и плотностью древесины ( $R^2 = 0.93$ ), и сделан вывод, что плотность древесины, оцененная с помощью резистографа, может стать новым критерием отбора в селекционных программах (Bouffier et al., 2008).

На основе данных 622 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) выполнена сравнительная оценка пилотин-тестирования и метода резистографа IML-RESI PD300 при определении плотности древесины. В качестве эталона использованы данные по плотности древесины, полученные на стационарной базе SilviScan (рис. 5).

Для устранения завышения результата, вызванного трением бура о щепку, профили данных сверления были скорректированы. Аддитивные генетические корреляции эталонных данных со скорректированными результатами сверления и

результатами пиллодин-метода составили 0.96 и 0.71 соответственно. Тем самым показано, что для оценки плотности древесины сосны обыкновенной резистограф – более надежный инструмент по сравнению с пиллодин-тестированием (Fundova et al., 2018).

В другом исследовании на примере елей сизой и Энгельмана с применением резистографа IML F300, ультразвукового устройства ST300TM, пиллодин-тестера 6J Forest и системы SilviScan были оценены узконаправленные наследуемости, а также фенотипические и генетические корреляции для показателей роста и качественных характеристик древесины. Ростовые признаки были отрицательно связаны с плотностью древесины, но не с динамическим модулем упругости. Отбор елей по показателю быстрого роста приводит к снижению плотности древесины, в то время как модуль упругости остается неизменным. Резистограф обеспечил достоверную оценку плотности древесины всего сечения с корреляцией от 0.59 до 0.84, а также первых 15 колец с корреляцией от 0.60 до 0.95, что свидетельствует о его пригодности для тестирования молодых деревьев. Сделан вывод, что резистограф – надежный неразрушающий инструмент для оценки плотности древесины ели *in situ* (Fundova, 2012).

Независимо от рассматриваемой методики, полученные данные основаны на чрезвычайно локализованных измерениях. Именно поэтому средняя плотность отдельного керна (или его эквивалента) иногда слабо связана с механическими свойствами выпиленных из ствола дисков (Zobel, van Buijtenen, 1989; Mamdy, 1995; Mamdy et al., 1999).

Влажность древесины в радиальном градиенте ствола, сопоставленная с результатами резистивного бурения, исследована у деревьев молодой эвкалиптовой плантации в Бразилии (Silva Oliveira et al., 2017). Полученные результаты связаны с возрастом плантаций. Коэффициенты корреляции между резистивным сопротивлением и влажностью древесины были низкими или незначимыми у 34-месячных деревьев и значимыми у 62-месячных. В 5-миллиметровом периферийном слое ствола при объединении деревьев двух возрастов наилучший коэффициент корреляции между амплитудой и влажностью древесины составил –0.75. Более тесные связи исследуемых показателей выявлены у 64-месячных деревьев.

**Торсиометр-метод**, основанный на модифицированном возрастном буре, активно при-

менялся в исследованиях квалиметрии древесины в 1970-х годах (Polge, Keller, 1970; Nicholls, Roget, 1977; Nepveu, 1979), пока не были предложены более совершенные технологии. Сравнительный анализ торсиометр-метода и пиллодин-метода в 10- и 30-летних клонах сосны замечательной показал существенное преимущество пиллодин-метода. Коэффициент корреляции между показателями крутящего момента и плотностью древесины керна в 10- и 30-летних клонах составил 0.78 и 0.79 соответственно, а между глубиной проникновения пиллодин-тестера и плотностью древесины –0.96 и –0.86. Объединенные данные пиллодин-тестера по двум экспериментам показали наличие коэффициента корреляции –0.97 между исследуемыми показателями, и сделан вывод, что общая линия регрессии может быть применима в широком диапазоне возрастов сосны замечательной. Тем не менее для ситуаций, в которых представляют интерес абсолютные значения плотности, было бы целесообразно периодически сверять результаты с данными кернов.

Сегодня торсиометр-метод потерял актуальность, а резистивное бурение стало перспективным методом эффективного и экономичного сбора информации о плотности древесины растущих деревьев. Метод резистивного бурения имеет значительные преимущества, в частности перед пиллодин-методом, вследствие более высокой чувствительности измерений.

**Ригидометр-метод.** Упругость древесины обычно анализируется с помощью чисто механических испытаний, которые заключаются в измерении деформаций, вызванных калиброванным усилием, приложенным в определенных точках ствола растущего дерева. Согласно одному из способов, на стволе крепили консольобразную конструкцию, к концу которой подвешивали груз, измеряли прогиб оси ствола под действием изгибающего момента и определяли соответствующий модуль упругости (Koizumi, 1987; Mamdy, 1995):

$$E = \frac{8 \cdot F_0 \cdot L \cdot l_0^2}{\pi \cdot d^4 \cdot de}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости древесины ствола, МПа;  $F_0$  – сила, приложенная к стволу, н;  $L$  – длина консоли, равная 1000 мм;  $l_0$  – длина держателя устройства для измерения прогиба, равная 800 мм;  $d$  – диаметр ствола в коре на высоте груди, мм;  $de$  – регистрируемый прогиб, мм (рис. 6).



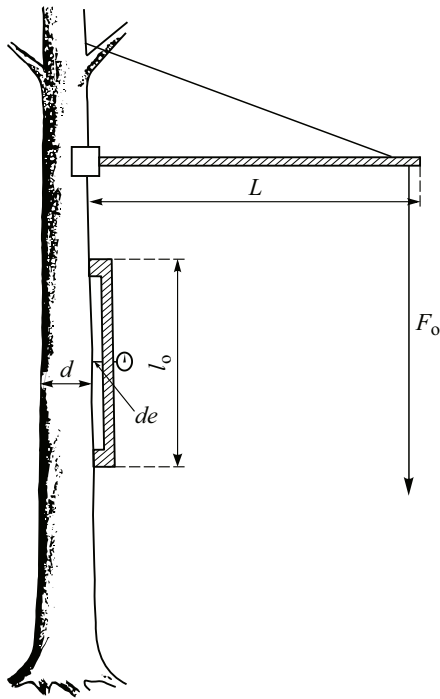


Рис. 6. Схема ригидометр-конструкции (Mamdy et al., 1999).

Согласно схеме эксперимента с 20 деревьями дугласии во Франции (5 клонов, по 4 дерева в каждом), выполнены все необходимые измерения на растущих деревьях и затем на выпиленных из этих же деревьев образцах получены значения модуля упругости в свежем состоянии древесины и высушенной до влажности 12 %, а также плотность годичных колец, определенная в процессе рентгеновского микроплотностного анализа (X-ray method). Установлены удовлетворительные или хорошие взаимосвязи между модулями упругости растущего ствола и выпиленных образцов ( $R^2 = 0.37-0.42$ ). Связь модуля упругости с плотностью древесины, измеренной на выпиленных образцах, характеризуется коэффициентом детерминации от 0.58 до 0.73. Также установлен значительный клональный эффект (Mamdy et al., 1999). Однако метод оказался слишком трудоемким и исключаящим возможность выполнения множественных замеров при реализации селекционных программ (Launay et al., 2000).

В дальнейшем схема ригидометр-конструкции была усовершенствована (Launay et al., 2000). Принцип конструкции для испытания на чистый изгиб, обычно используемый в лаборатории для измерения модуля упругости, показан на рис. 7.

Испытываемая балка помещается на две опоры  $A$  и  $B$  и нагружается двумя силами, равноудаленными от середины балки. При условии

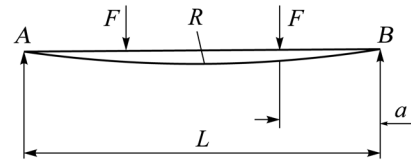


Рис. 7. Принцип испытания на чистый изгиб однородного цилиндрического бруса (Launay et al., 2000).

однородности материала между этими двумя силами изгибающий момент и радиус кривизны постоянны.

Определение этого радиуса  $R$  позволяет рассчитать модуль упругости образца в соответствии с приложенной силой, формой балки и расстояниями между приложенными силами и опорами.

Экспериментальное устройство, разработанное на основе показанной схемы, состоит из двух независимых блоков (рис. 8).

Первый предназначен для приложения изгибающей силы, а второй – для измерения результирующего прогиба ствола. Центр устройства обычно располагается на высоте 1.3 м над землей. Диаметр ствола определяется на этой высоте с точностью до 0.5 мм.

Давление прикладывается на уровне прямоугольного алюминиевого портала длиной 1.8 м и высотой 0.4 м. Крепление портала к стволу

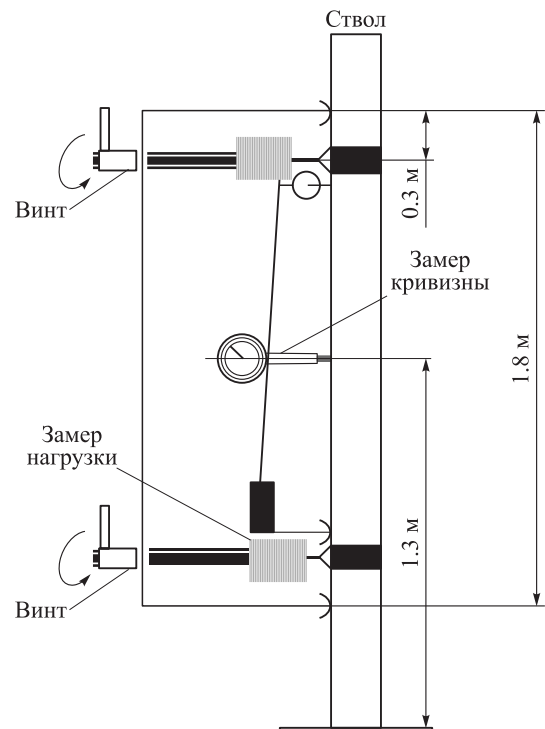


Рис. 8. Схема усовершенствованной ригидометр-технологии (Launay et al., 2000).

осуществляется с помощью широких стальных контактов во избежание травмирования коры. Давление создается путем затяжки двух винтов, разделенных расстоянием 1.2 м и оснащенных двумя цифровыми датчиками, используемыми для калибровки изгибающих усилий с точностью до 10 н (Launay et al., 2000).

Устройство позволяет обработать до 50 деревьев в день. МОЕ, согласно схеме, показанной на рис. 8, рассчитывается по формуле

$$E = \frac{64 \cdot R \cdot F \cdot a}{\pi d^4}, \quad (2)$$

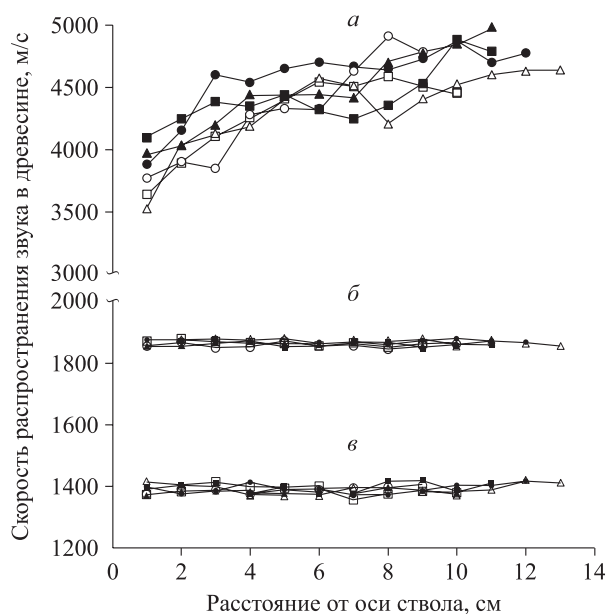
где  $E$  – статический модуль упругости  $MOE_{обр}$ , МПа;  $F$  – сила, приложенная к брусу в данной точке;  $n$ ;  $a$  – расстояние от опоры до точки приложения нагрузки;  $d$  – диаметр образца (бруса);  $R$  – радиус кривизны.

Коэффициент корреляции между показателями МОЕ, полученными на данном устройстве, на выпиленных из ствола образцах составляет 0.74–0.79 и не зависит от диаметра ствола. Клональный эффект значим на уровне  $F$ -критерия, равного 6.3. В пределах семейства коэффициент корреляции между экспериментальным значением МОЕ и плотностью древесины составил 0.68. Предложенное устройство может эффективно использоваться при массовых измерениях в различных селекционных программах (Launay et al., 2000, 2002).

По аналогичной схеме было испытано 110 деревьев разных генотипов гибридной лиственницы во Франции (Pâques, Rozenberg, 2009). На уровне отдельных деревьев обнаружены умеренные корреляции ( $R = 0.48–0.61$ ) между МОЕ ствола и образцов древесины. Показано, что МОЕ образца тесно связан с линейной комбинацией МОЕ ствола и положения образца на стволе. На среднем уровне генотипа МОЕ ствола был тесно связан с МОЕ образцов древесины ( $R = 0.80–0.91$ ). Ранжирование генотипов, основанное на МОЕ ствола, в основном соответствовало ранжированию, основанному на стандартных образцах. Таким образом, ригидометр является ценным инструментом для селекционеров, регулярно оценивающих и ранжирующих генотипы по квалиметрии древесины (Pâques, Rozenberg, 2009).

### Акустические методы

**Общие положения.** Одна из причин того, что плотность, оцениваемая по дискам или кернам, служит плохой оценкой качества древеси-



**Рис. 9.** Зависимость скорости распространения звука в продольном (а), радиальном (б) и тангентальном (в) ортотропных направлениях древесины кипарисовика японского (*Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl.) от расстояния до центра сечения ствола (Hasegawa et al., 2011).

ны, заключается в том, что она не учитывает наличия сучков и других пороков в древесине, поэтому системы, которые охватывают некоторый вертикальный диапазон ствола, имеют большую возможность учета влияния пороков на качество древесины дерева и древостоя. Один из возможных быстрых методов оценки качества древесины с учетом ее пороков основан на скорости распространения акустических волн (САВ) в стволах деревьев (Launay et al., 2000; Viscur, 2006).

Ортотропная природа древесины означает, что скорость звука зависит от направления его распространения (Hasegawa et al., 2011). В продольном направлении ортотропной оси она – самая высокая, а в тангенциальном направлении – наиболее низкая (рис. 9).

Соответственно акустическое затухание в продольном направлении самое низкое (Viscur, Feeney, 1992). По мере смещения канала продольного прохождения звука от ядра к наружным слоям его скорость увеличивается (траектории 1 на рис. 9).

Акустические методы неразрушающего контроля используют разные типы акустических волн, отличающихся скоростью распространения, направлением колебания частиц и другими признаками (Полубояринов, 1976а; Ланге, Воронков, 2003). При неразрушающем контро-

ле акустические волны возбуждаются и улавливаются путем преобразования электрических колебаний в упругие и наоборот (Лехницкий, 1977; Радж и др., 2006). Для этой цели используют различные преобразователи (ГОСТ 26266-90..., 1998; Ермолов И. Н, Ермолов М. Н., 2006).

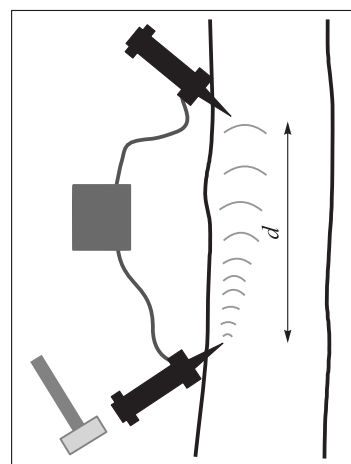
Акустические методы позволяют обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты ствола и делятся на две категории: активные, использующие излучение и прием акустических колебаний, и пассивные, основанные только на приеме колебаний (Ланге, 1991; Симоненко, 2014). Достоинства акустических методов – возможность контроля при одностороннем доступе к изделю; высокая проникающая способность; простота и высокая производительность контроля; высокая чувствительность, позволяющая выявлять мелкие дефекты; полная безопасность работы оператора и персонала; практически мгновенная индикация дефектов, позволяющая автоматизировать контроль. К недостаткам акустических методов относят необходимость специальных методик измерений (Симоненко, 2014).

Концепция использования САВ в древесине в качестве показателя ее качества получила широкое признание как в деревообрабатывающей промышленности, так и в лесном хозяйстве. Для оценки качества древесины растущих деревьев и различных изделий из нее разработаны и применяются различные способы акустических измерений. Имеется широкий спектр инструментов, пригодных для использования как в полевых, так и в лабораторных условиях. Технологический прогресс привел к созданию надежных и портативных устройств повышенной точности (Mochan et al., 2009). Развитие акустических инструментов для растущих деревьев открыло путь для квалиметрической оценки в процессе их выращивания (Полубояринов, 1974, 1976б), что позволило осуществлять управление, планирование, заготовку и обработку древесины таким образом, чтобы максимизировать извлекаемую из лесных ресурсов стоимость (Wang et al., 2007; Ross, 2015; Carter, 2017).

**Измерения САВ и их неопределенности.** Измеренное у растущих деревьев значение САВ обычно используется при оценке модуля упругости по формуле

$$\text{МОЕ} = \rho \cdot AV^2, \quad (3)$$

где МОЕ – динамический модуль упругости;  $\rho$  – плотность свежей древесины;  $AV$  – скорость распространения в древесине акустической волны (САВ).



**Рис. 10.** Схема «ударного» метода измерения скорости распространения звуковой волны в древесине растущих деревьев (Legg, Bradley, 2016).

$\rho$  в формуле (3) при проведении измерений на растущих деревьях и бревнах обычно считается постоянной величиной, хотя определение фактической плотности сырой древесины может повысить точность оценки модуля упругости (Lasserre et al., 2009; Wang, 2013; Butler et al., 2017).

У растущих деревьев САВ оценивается путем измерения времени прохождения акустических волн ( $t$ ) между двумя точками измерения ( $d$ ), расположенными на стволе на высотах примерно 2.0 и 0.5 м от земли. В этих точках в ствол внедряются соответственно передающий сенсорный зонд и приемный акселерометр, и значения САВ определяются отношением  $d/t$  (Schimleck et al., 2019). Сенсоры работают на частоте 1–2 кГц, и акустическая энергия генерируется в дереве посредством удара молотком. Расстояние  $d$  измеряется ультразвуковым сигналом, проходящим между передающим и приемным устройствами, и дистанционно фиксируется регистрирующим устройством (Paradis et al., 2013) (рис. 10).

Таким образом, акустическая волна, генерируемая ударом молотка, дает значение времени ( $t$ ), а ультразвуковая установка – значение расстояния ( $d$ ) между сенсорными зондами, внедренными в древесину.

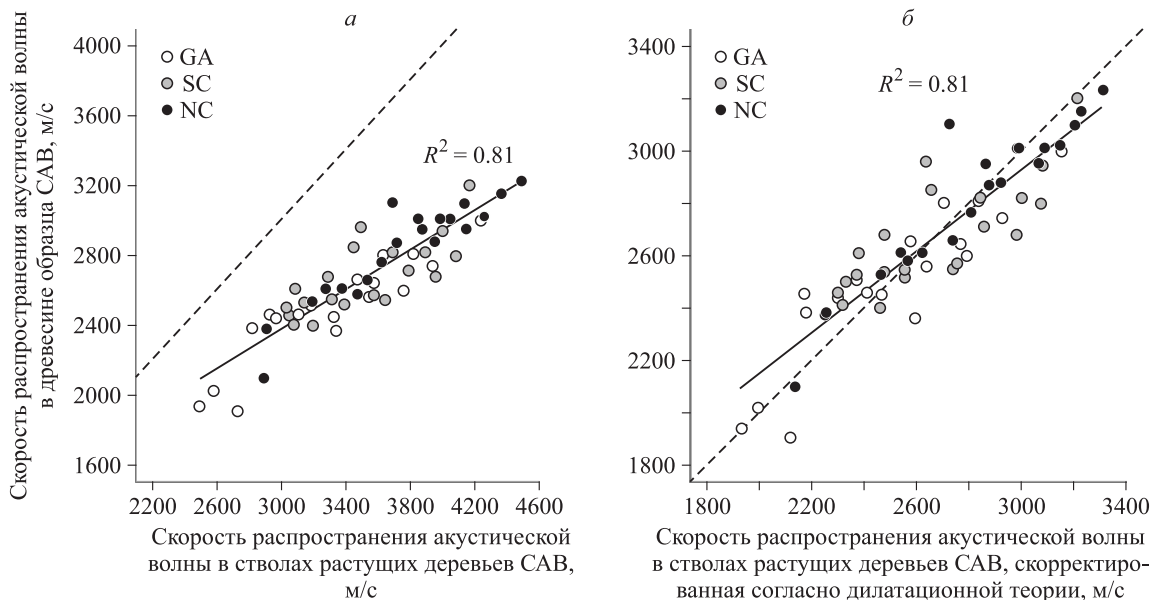
Волны, распространяющиеся вдоль стволов деревьев, называют акустическими направленными. Удлиненная структура древесного ствола действует для акустического сигнала как волновод, если диаметр структуры приблизительно пропорционален длине волны сигнала. Сигнал первоначально распространяется в виде дилатационных (объемных) волн. Однако после

прохождения некоторого расстояния начинают генерироваться управляемые волны, которые включают в себя продольные, изгибные и крутильные моды волн. Они распространяются с различными скоростями, которые зависят от длины волны и диаметра структуры. Имеется лишь несколько публикаций, в которых исследованы управляемые волны в древесине (Marra et al., 1966; Veres, Sayir, 2004; Dahmen et al., 2010), и в этой области необходимы дополнительные исследования (Legg, Bradley, 2016).

В частности, в древесине сосны замечательной и эвкалипта в Австралии изучены модификации гармоник акустического сигнала при его прохождении через древесину. В ходе эксперимента измеряли выходные амплитуды и частоты бегущих сигналов и сравнивали с исходным входным сигналом. Анализируемые факторы включали тип и влажность древесины, частоту входного сигнала, расстояние прохождения сигнала и состояние древесины (с трещинами или без них). Результаты эксперимента показали, что более высокие частоты входного сигнала приводят к более интенсивному затуханию акустической волны, проходящей через древесину. Установлено также, что тип и влажность древесины, расстояние прохождения сигнала и его ориентация, в отличие от текстуры древесины, существенно влияют на скорость распространения сигнала (El-Hadad et al., 2018).

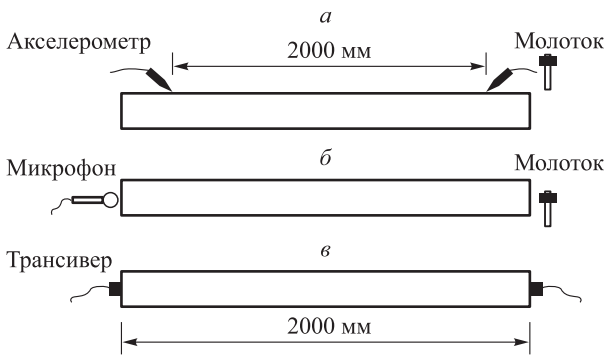
Принципы измерения растущих деревьев и выпиленных из них бревен различны. Описанными выше измерениями САВ на частоте 1–2 кГц с расстоянием между сенсорами вдоль по стволу приблизительно от 1 до 1.2 м охватываются только внешние слои ствола на глубину 20–30 мм (Wang et al., 2007; Auty, Achim, 2008), тогда как квалитметрия древесины растущего дерева существенно изменяется по радиусу ствола (Колесникова, Мазуркин, 1997). При акустическом анализе квалитметрии древесины бревен и изделий в качестве альтернативного обычно находят применение резонансный и ультразвуковой методы (Yin et al., 2010; Baar et al., 2012; Legg, Bradley, 2016), которые, в отличие от зондирования только внешних слоев ствола, репрезентативны для всего сечения бревна или изделия и считаются более точными (не смещенными) по сравнению с САВ (Sandoz et al., 2000; Andrews, 2002; Hayes, Chen, 2003; Sandoz, Benoit, 2007).

На рис. 11, а на примере сосны ладанной показано смещение скорости распространения акустической волны, измеренной системой Fakopp Tree-Sonic в наружной (заболонной) части растущих стволов по отношению к скорости, измеренной в образцах, вырезанных из тех же стволов (Mora et al., 2009). Путем введения корректировочного коэффициента в значения САВ согласно дилатационной теории (Andrews, 2003)



**Рис. 11.** Сравнение измеренной (а) и скорректированной (б) скоростей распространения акустической волны в древесине растущих деревьев (САВ) сосны ладанной со скоростью, измеренной в образцах, вырезанных из тех же стволов (САВ<sub>обр</sub>).

Выполнено совместно по трем центрам происхождения: GA, SC и NC – соответственно Центральная Джорджия, Южная Каролина и Северная Каролина Атлантического побережья. Пунктиром показана линия равных значений (Mora et al., 2009).



**Рис. 12.** Методы звукового зондирования древесины: измерение ударной волны (а) (то же, что на рис. 10), резонансный (б) и ультразвуковой (в) (Yin et al., 2010).

названное смещение было сведено практически к нулевому уровню (0.02 %) (рис. 11, б).

Перечисленные методы представлены схемой на рис. 12. В процессе изучения квалиметрии деревьев в тропических лесах при измерении резонансной скорости звука продольная вибрация древесины вызывалась ударом молотка по переднему торцу бревна (Vaar et al., 2012). На другом конце был закреплен акселерометр. Собственная частота в продольном направлении подбиралась с помощью метода быстрого преобразования Фурье в диапазоне от 6000 до 9000 Гц. Продольную скорость звуковой волны (САВ) рассчитывали путем умножения двойной длины бревна (м) на частоту собственных колебаний (Гц) (рис. 12, б).

Ультразвуковые сенсоры представляют собой акустические датчики трех категорий: передатчики, приемники и приемопередатчики (трансиверы). Передатчики преобразуют электрические сигналы в ультразвук, приемники – ультразвук в электрические сигналы, а трансиверы могут как передавать, так и принимать ультразвук. В упомянутом эксперименте с тропическими деревьями время распространения ультразвука в образце древесины измеряли с помощью ультразвукового таймера Fakopp с двумя специальными пьезоэлектрическими датчиками треугольной формы на частоте 45 Гц (Vaar et al., 2012). При электронном возбуждении преобразователя генерировался короткий ультразвуковой импульс (униполярный прямоугольный импульс длительностью 60 мкс). Время прохождения ультразвука между датчиками отображалось на дисплее прибора в микросекундах. Скорость звука вдоль волокон (САВ) вычислялась путем деления расстояния между сенсорами (d) на время прохождения волны (t) (рис. 12, в).

В нашей стране методы ультразвуковых и резонансных звуковых испытаний древесины проводятся с 1960-х годов (Уголев, 1965; Никишов, 1966; Перелыгин, 1969). За рубежом методами ультразвуковой томографии оценивается степень интерференции, вызванной наличием сучков и смещением сердцевины (Palma et al., 2017), путем измерения продольной и радиальной скорости волн оценивается базисная плотность древесины корней (Cavalcanti et al., 2017), стволов эвкалиптовых клонов (Lorenzani et al., 2017a) и нескольких потомств семян сосны приморской (Lorenzani et al., 2017b), определяется квалиметрия древесины молодых тополей (*Populus L.*) в динамике в ходе селекционных испытаний в Китае в сравнении с результатами резонансного метода (Zhang et al., 2017). В Бразилии методом ультразвуковой томографии (прибор USLab, Agricef, Brazil) были сопоставлены квалиметрические характеристики древесины корней, ветвей и ствола шести древесных видов. Установлено различие скоростей распространения волны в корнях и стволе у 67 %, в корнях и ветвях – у 33 %, в стволе и ветвях – у 50 % видов (Costa et al., 2017). Каких-либо закономерностей в изменении скорости распространения волны в различных компонентах дерева (корне, ветвях и стволе) не найдено.

Многочисленными исследованиями установлено, что «ударный» метод определения САВ завышает значения МОЕ по сравнению с резонансным и ультразвуковым методами, примененными как на растущих деревьях, так и на бревнах (Yang et al., 2003; Vaar et al., 2012; Hassan et al., 2013). На рис. 11, а это завышение составило 32 % по сравнению со скоростью, измеренной по всему сечению образца древесины, вырезанного из того же ствола (Mora et al., 2009), поэтому практикуется корректировка менее точных (смещенных) результатов посредством более точных путем прямого сопоставления (рис. 11, а, б) (Ikeda et al., 2017; Ikeda, Arima, 2000; Chauhan et al., 2006; Grabianowski et al., 2006; Wang et al., 2007; Mora et al., 2009; Legg, Bradley, 2016; Simic et al., 2019).

В. И. Федюков (1998) представил результаты комплексных лесоводственно-дендроакустических исследований, позволившие разработать неразрушающие способы отбора резонансного сырья на корню и в лесоматериалах. Автор разработал, изготовил и внедрил технические средства для неразрушающего контроля акустических параметров резонансной древесины в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот

при целевом отборе и выращивании. Для решения этой задачи проводились фундаментальные и поисковые научные исследования по следующим основным направлениям: анализ состояния контроля качества продукции в лесной и лесопромышленной отраслях; разработка, изготовление и внедрение новых технических средств для неразрушающего контроля акустических параметров резонансной древесины в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот при целевом отборе и выращивании древесины; определение ее основных физико-механических и акустических показателей и выявление взаимосвязей между ними, а также биоморфологией дерева на фоне генетической и фитоценотической изменчивости; особенности формирования резонансной древесины под действием биотических и абиотических факторов; разработка системы всеобщего обеспечения качества и сертификации резонансного сырья при целевом использовании и возобновлении его запасов. В качестве критериев оценки использованы макроструктурные показатели (средняя ширина годичного кольца, количество поздней древесины (%), число годичных колец), прочность, динамический модуль упругости, низшая собственная частота колебаний образца консольного крепления. На основе теоретического исследования и анализа методов диагностики предложено устройство «Резонанс-4 для неразрушающей ранней диагностики технического качества подроста, позволяющее оптимизировать процесс определения свойств древесины (Федюков и др., 2016).

**Примеры неразрушающей квалитметрии древесины на основе САВ: противоречия и неопределенности.** Линейный регрессионный анализ, выполненный по результатам измерений 266 свежезаготовленных осиновых бревен, показал, что МОЕ тесно коррелирует со статическим модулем упругости  $MOE_{обр}$  ( $R^2 = 0.83$ ). Сделан вывод, что акустические инструменты могут успешно использоваться для контроля качества древесины (Achim et al., 2011). При измерении САВ бездефектных участков ствола получены довольно устойчивые оценки модуля упругости МОЕ (Wang et al., 2001). Для древесных видов России связь МОЕ с  $MOE_{обр}$  характеризовалась величиной  $R^2$  от 0.36 до 0.79, с плотностью древесины от 0.29 до 0.81 и со скоростью распространения звуковых и ультразвуковых колебаний от 0.26 до 0.76 км/ч (Перельгин, 1969).

На основе проведенных испытаний акустических методов на деревьях сосны обыкновенной в Шотландии рассчитаны линейные зависимо-

сти модулей упругости (МОЕ) и разрыва (MOR), измеренных на выпиленных образцах ствола, от измеренного значения САВ с помощью Hitman ST300 у растущих деревьев, объясняющие соответственно 53 и 59 % общей изменчивости искомых показателей. Аналогичные зависимости МОЕ и MOR от плотности древесины при 12 % влажности объясняли соответственно 41 и 49 % изменчивости. Для оценки влияния «камбиального» возраста дерева на МОЕ и MOR рассчитана нелинейная модель с коэффициентами детерминации соответственно 0.58 и 0.54. Значимого различия сосен естественного и искусственного происхождения по показателям МОЕ и MOR не установлено, возможно, вследствие несоблюдения требуемой чистоты эксперимента (Auty, Achim, 2008). В то же время, у ели чёрной (*Picea mariana* (Mill.) Britton, Sterns & Poggenb.) в плантациях квалитметрические показатели древесины были существенно ниже, чем в естественных древостоях (Zhang et al., 2002).

В отличие от изложенных результатов эксперимента с сосной, у молодых деревьев дугласии во Франции не обнаружено никакой связи между МОЕ и САВ (Mamdy, 1995). В древостоях сосны желтой (США) в выделенных пяти градациях полноты зависимость САВ от плотности древесины 50 последних колец характеризовалась довольно низкими коэффициентами детерминации в диапазоне 0.015–0.16 (Ruggirello, 2017). В то же время у ели сизой в Канаде зависимость МОЕ от САВ характеризовалась коэффициентом детерминации 0.41, а при включении в модель дополнительных переменных плотности древесины и ширины заболони названный коэффициент увеличился до 0.69 (Achim et al., 2010). У дугласии в США зависимость МОЕ от САВ характеризовалась коэффициентом детерминации 0.740, то же от плотности свежей древесины – коэффициентом 0.164 и от диаметра ствола на высоте груди – коэффициентом 0.107. Совместное действие САВ и диаметра ствола в двухфакторной регрессии повысило долю объясненной изменчивости МОЕ дугласии до 88 % (Trejo, 2015).

Отмеченное низкое значение коэффициента детерминации при определении МОЕ только по диаметру ствола (0.107) вполне логично и подтверждается другими исследователями: для эвкалипта 0.09 (Farrell et al., 2008) и для дугласии 0.12 (Wang et al., 2013). Но низкий коэффициент детерминации (0.164) в зависимости МОЕ от плотности свежей древесины в вышеупомянутом эксперименте (Trejo, 2015) трудно объяснить,

поскольку плотность древесины является одним из ключевых детерминантов МОЕ (Zobel, van Buijtenen 1989; Huang et al., 2003), и в бездефектной древесине она определяет 60–70 % изменчивости (Rozenberg et al., 1999; Evans, Ilic, 2001). Последнее подтверждается экспериментом с 36–51-летними деревьями дугласии, где установлено, что наилучшей моделью для оценки МОЕ ( $R^2 = 0.61$ ) является включение в число независимых переменных САВ, плотности древесины и размер сбега, и сделан вывод, что для определения МОЕ измерения одной лишь САВ недостаточно, и требуется дополнительно включать в модель плотность древесины (Todoroki, Lowell, 2016). Некоторые исследователи отмечают слабую связь МОЕ с одной лишь плотностью древесины (Tsehaye, 1995; Raymond et al., 2008), другие же отмечают отсутствие между ними какой-либо связи (Chauhan et al., 2006; Lasserre et al., 2009).

Линейная модель зависимости МОЕ ели черной в Канаде от трех независимых переменных (квадрат значения САВ, диаметр ствола на высоте груди и произведение квадрата САВ на диаметр ствола) показала наличие коэффициента детерминации 0.41 (Paradis et al., 2013). Третья независимая переменная модели указывает на то, что влияние САВ на МОЕ опосредовано диаметром ствола. Это связано с анизотропной природой и неоднородной структурой древесины (Kettunen, 2006).

У деревьев свойства древесины значительно варьируют в направлении от сердцевины к коре. Содержание влаги в древесине также изменяется от примерно 40 % в сердцевине до 100 % и выше в заболони (Jessome, 2000). Названные три характеристики – МОЕ, плотность древесины и ее влажность – оказывают влияние на распространение механических волн и могут определенным образом взаимодействовать в анизотропных материалах, таких как древесина. Полученный результат ( $R^2 = 0.41$ ) (Paradis et al., 2013) сопоставим с полученными ранее значениями коэффициента детерминации моделей той же структуры у ели ситхинской (0.44) и сосны ладанной (0.45) (Wang et al., 2001; Eckard et al., 2007). Линейная трехфакторная модель, описывающая у ели черной в Канаде зависимость МОЕ от плотности древесины, диаметра ствола и длины кроны, объясняла 65 % общей изменчивости искомого показателя, а четырехфакторная модель, включающая только структурные независимые переменные (диаметр ствола, длину кроны, сбег ствола и густоту древостоя) – лишь 55 % изменчивости (Liu et al., 2007).

В эксперименте с дугласией, произрастающей в США, была проанализирована зависимость плотности древесины от нескольких морфометрических показателей дерева, но значимой ( $R^2 = 0.256$ ) оказалась лишь высота замера и взятия образца на стволе. В направлении от основания ствола к его вершине плотность древесины снижается вследствие увеличения доли ювенильной древесины (Acuna, Murphy, 2006). Однако, если в названном направлении возрастает количество сучьев, то плотность древесины, рассчитанная по САВ, повышается, поскольку сучья в древесине, обладающие повышенной твердостью, снижают скорость прохождения звуковой волны (Amishev, Murphy, 2008).

Довольно редкое исследование посвящено изучению акустическим методом древесины ветвей (García et al., 2017). Были собраны срезы в нескольких сечениях ветвей шести видов деревьев. Показания снимались в продольном направлении с помощью прямых измерений (датчики располагались на противоположных срезах диска) и косвенных измерений (датчики располагались под углом  $45^\circ$  к одному и тому же срезу). Результаты показали, что существуют различия в скоростях звука между древесными видами, и сделан вывод, что этот простой инструмент может быть использован для прочностной классификации ветвей разных видов деревьев и ветвей из разных положений в кроне. Полученные данные сопоставлены с характеристикой древесины корней и ствола (García et al., 2017).

При исследовании возможности оценки плотности древесины ствола в связи с измеренными значениями плотности древесины ветвей не обнаружено закономерности, поскольку плотность ветвей сильно изменяется в направлении от основания к их окончанию, но при фиксированном месте взятия образца на ветви получена устойчивая зависимость (Hayes, Chen, 2003).

**Корреляция квалиметрии и САВ в связи с прореживаниями.** В число основных лесохозяйственных мероприятий входит регулирование густоты древостоев путем прореживаний (рубок ухода), а также селекция перспективных форм и клонов (Savill, Sandels, 1983; Smith et al., 1997; Moore et al., 2015). Оценке влияния прореживаний древостоев на квалиметрию древесины посвящены многочисленные исследования, и в целом выявлено их отрицательное влияние на ее плотность у ели европейской (Grammel, 1990; Herman et al., 1998), дугласии (Harpla, 1985), со-

сен замечательной (Kimberley et al., 2015) и ладанной (Aslezaeim, 2016), ели ситхинской (Wang et al., 2001; Macdonald, 2002; Vihermaa, 2010) и у сосны обыкновенной (Мелехов и др., 2003; Peltola et al., 2007). Авторы объясняют это изменение увеличением радиального прироста и доли ранней древесины у деревьев после прореживаний. Однако некоторые исследователи пришли к противоположному выводу в отношении ели ситхинской (Moore et al., 2009), дугласии (Kimberley et al., 2017) и ели черной (Vincent et al., 2011). Отсутствие какого-либо влияния прореживаний на МОЕ показано у деревьев тсуги западной (*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.) (Wang et al., 2001). Поскольку у сосны ладанной были обнаружены отрицательные корреляции между МОЕ и скоростью роста ( $-0.21 \dots -0.48$ ), сделано предположение, что одновременное повышение прочности древесины и скорости роста дерева в селекционных экспериментах проблематично (Eckard, 2007).

Для снятия этой неопределенности проведено крупномасштабное исследование древостоев дугласии, елей европейской и ситхинской в Ирландии в шести различных древостоях каждого вида, одна половина которых была прорежена, а вторая оставлена без прореживаний (Krajnc, 2019). У каждого из 600 растущих деревьев измерена САВ, после чего были взяты образцы для определения механических свойств древесины. Результаты показали, что прореживание древостоев в целом отрицательно влияет на механические свойства древесины, причем размер ущерба у разных видов различается. Снижение плотности древесины в результате прореживаний редко превышало 20 %, в среднем составило около 5 %. Установлено также, что у деревьев большого диаметра САВ не может быть использована для определения механических свойств древесины на корню (Krajnc, 2019).

В 45–51-летних древостоях дугласии (США) был заложен эксперимент с вариантами прореживаний различной интенсивности. Определяли САВ растущих деревьев, а также плотность и модуль упругости заготовок древесины, выпиленных из тех же стволов. Установлена отрицательная связь МОЕ с диаметром и сбегом ствола и положительная – с САВ. Выявлен некоторый тренд снижения прочности древесины в связи с увеличением интенсивности прореживаний и соответствующим увеличением радиального прироста, но он не был статистически подтвержден (Lowell et al., 2014).

**Корреляция квалиметрии и САВ в селекционных программах.** Наибольшее распространение оценка САВ в древесине растущих деревьев получила в программах селекционных испытаний деревьев, где требуется большое число измерений (Matheson et al., 2008; Apiolaza, 2009; Lindström et al., 2009; Lenz et al., 2013; Hong et al., 2015).

Для оценки квалиметрических характеристик свойств древесины в раннем возрасте в терминах селекции и генетического совершенствования вида выполнено исследование древесины 9-летней сосны приморской (Sánchez et al., 2017a). Измерения САВ проводились на растущих деревьях в продольном и радиальном направлениях, а на выпиленных образцах применен стандартный метод испытаний на упругость (МОЕ) и разрыв (MOR). Не установлено достоверной корреляции плотности древесины ни с МОЕ ( $R = 0.16$ ), ни с MOR ( $R = 0.20$ ). Но САВ в продольном и тангенциальном направлениях имела значительную положительную корреляцию как с МОЕ, так и с MOR и не имела существенных корреляций с плотностью древесины.

Исследование линейной связи МОЕ и САВ у более 20 клонов эвкалипта в Бразилии выявило наличие коэффициента детерминации, равного 0.573, а при замене в ней средней САВ на ее минимальное значение он возрос до 0.653 (Gonçalves et al., 2013).

При проведении генетических тестов древесины 15- и 32-летних деревьев ели сизой установлено, что индивидуальная наследуемость по показателю САВ была умеренной и такой же величины, как и наследуемость по плотности древесины (Lenz et al., 2013). Связь между САВ и углом микроволокон целлюлозы (МФА) была довольно тесной на генетическом уровне, и отбор, основанный на определении САВ, может эффективно улучшить МФА как один из наиболее важных детерминантов механических свойств древесины. Добавление в регрессию дополнительно к САВ таких легко определяемых показателей, как диаметр на высоте груди, отношение высоты к диаметру, а также плотность древесины, улучшает оценку МФА. Сделан вывод, что определение САВ в ювенильном возрасте вполне подходит для оценки качества древесины в контексте селекции деревьев (Lenz et al., 2013).

Было выполнено сравнительное исследование резистивного бурения (Resistograph) и акустического инструмента TreeSonic при зондировании молодых клонов сосны ладанной



по показателям: плотность древесины, модуль упругости (МОЕ) и модуль разрыва (МОР). Образцы, взятые для определения статического модуля упругости, и керны были исследованы одновременно с измерениями ростовых характеристик клонов в возрасте 8 лет. На кернах измеряли базисную плотность древесины на высоте груди и для всего дерева с помощью рентгеновской денситометрии, а также выполняли измерения объема и массы на образцах бездефектной древесины (Eckard, 2007).

Показатели МОЕ и МОР определялись по результатам статических испытаний на изгиб на бездефектных образцах древесины. Средства клонирования по свойствам древесины были умеренно или высоко воспроизводимыми, и интенсивный клональный отбор привел к генетическому выигрышу в диапазоне от 11.1 % для плотности древесины и до 19.9 % для МОЕ. После корректировки на влияние трения значения амплитуды резистографа для клонов имели умеренно тесные корреляции с плотностью древесины как на уровне груди (0.75), так и по всему стволу (0.72). Генетические корреляции между амплитудой и плотностью были довольно тесными, с оценками от 0.92 до 1.00. Амплитуда слабо коррелировала с МОЕ и МОР на фенотипическом уровне, но была умеренно связана на генетическом уровне. Клональная вариация объясняла только 20 % фенотипической дисперсии по амплитуде, так что различия между генетическими и фенотипическими корреляциями были обусловлены низкой повторяемостью клоновых средних по амплитуде. Эффективность резистографа была высокой для отбора клонов по плотности древесины, умеренной для МОР и довольно низкой для МОЕ (Eckard, 2007).

Значения САВ в древесине (инструмент TreeSonic) были высоко воспроизводимыми и имели умеренные и очень значимые средние корреляции с механическими свойствами древесины. Они слабо коррелировали с плотностью древесины и были высокоэффективны при отборе клонов по МОЕ, умерены по МОР и слабы по плотности. САВ и амплитуда не были связаны между собой и давали независимую информацию относительно изменения механических свойств древесины, поэтому объединение их в единый индекс для отбора повысило его эффективность.

Таким образом, акустические методы и резистивное бурение могут быть надежно применены при отборе клонов по качеству древесины. Эти методы являются быстрыми, недорогими и

эффективными в обеспечении желаемого генетического эффекта. Ожидается, что надежность и эффективность отбора повысятся, особенно для резистографа, поскольку будут выявлены и исправлены источники, способствующие возникновению внешних экологических ошибок в измерениях (Eckard, 2007).

В США исследована возможность использования акустического инструмента и статистических методов для дифференциации 17-летних деревьев сосны ладанной, восприимчивых и толерантных к корневым грибам (Essien et al., 2017). Результаты показали, что влияние поражаемости грибами на качественные свойства древесины корней сильно различается между изучаемыми семействами. Акустический инструмент был успешно использован для дифференциации восприимчивых и толерантных семейств (Essien et al., 2017).

**Корреляция квалиметрии и САВ в селекционных программах в контексте неопределенности их целевых установок.** Как отмечалось выше, прореживания, с одной стороны, направлены на увеличение пространства и скорости роста деревьев, а с другой – снижают квалиметрию древесины вследствие увеличения ширины годичных колец и доли ранней древесины. Селекция перспективных форм и клонов направлена на отбор форм быстрорастущих, а также обладающих повышенными механическими свойствами (Kumar et al., 2008; Gapare et al., 2009; Moore et al., 2015).

Для снятия этих очевидных неопределенностей в Новой Зеландии исследовано влияние густоты древостоев сосны замечательной и результатов селекционных экспериментов прошлых лет на квалиметрию ее древесины (Moore et al., 2015). Проведен трехфакторный эксперимент, включающий четыре градации культур по начальной густоте, каждая из которых имела прореживаемый и непрореженный варианты и каждый последний представлен двумя сидлотами с разными генетическими рейтингами. У растущих деревьев и образцов древесины определены САВ, угол микроволокон целлюлозы и модуль упругости. Различия квалиметрических характеристик двух генетически разных сидлотов оказались незначимыми и не зависели от густоты древостоев.

Установленная положительная корреляция модуля упругости и густоты древостоев сосны замечательной (Moore et al., 2015) подтвердила аналогичные выводы, полученные другими исследователями как по сосне замечатель-

ной (Lasserre et al., 2005; Raymond et al., 2008; Waghorn et al., 2007; Watt et al., 2011), так и по другим видам (Brazier, Mobbs, 1993; Zhang et al., 2006; Moore et al., 2009). Чтобы не снижать квалитетические показатели древесины, рекомендовано избегать интенсивных ранних прореживаний культур сосны замечательной (Moore et al., 2015).

В Турции изучено влияние различий клонов и исходной густоты посадки путем акустических измерений САВ с помощью микросекундного таймера Fakopp и определены механические свойства древесины 12-летних гибридных тополей. Было задействовано 100 модельных деревьев, по 5 от каждого клона и начальной густоты, и соответственно взяты отрезки ствола длиной 1 м. Базисная плотность клонов варьировала от 0.32 до 0.42 г/см<sup>3</sup>. Существенные различия между клонами выявлены также по САВ. Что касается густоты посадки, то связи искомым показателям с ней не обнаружено. Сделан вывод, что измерения САВ, выполненные на растущих деревьях, имеют перспективный потенциал при формировании гибридных тополевых насаждений путем мониторинга их квалитетрии (Dündar et al., 2017).

**Сравнение технологии САВ с другими неструктивными методами.** Группой исследователей определялась пригодность использования ультразвукового инструментария и пилотин-тестера для оценки плотности древесины, угла микроволокон целлюлозы и модуля упругости на примере деревьев ели европейской. В качестве эталона использована база SilviScan, тесные корреляции выявлены между результатами измерений пилотин-методом и плотностью древесины ( $R = -0.96$ ), а также между САВ и углом микроволокон ( $R = -0.94$ ). Сочетание измерений пилотин-методом и САВ показало повышенную корреляцию с эталонными значениями модуля упругости на уровне 0.99, что обеспечивает надежный прогноз прочности ели обыкновенной в селекционных программах (Chen et al., 2015).

На примере японской лиственницы (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière) выполнено сравнение САВ методологии и пилотин-тестирования (Ishiguri et al., 2008). Установлено снижение коэффициента корреляции между САВ растущего дерева и динамическим модулем Юнга в направлении от основания к вершине дерева. Коэффициент корреляции между САВ и модулем упругости (МОЕ) составил 0.834. Обнаружена значимая отрицательная корреляция ( $-0.859$ ) между глубиной проникновения штифта (пило-

дин-метод) и средним модулем разрыва (MOR) древесины. Регрессионная связь средних значений МОЕ и MOR древесины с такими независимыми переменными, как САВ и пилотин-отсчёт, характеризуется высокими коэффициентами детерминации (Ishiguri et al., 2008).

На Северо-Востоке Китая было протестировано 100 поперечных сечений деревьев ясени маньчжурского (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) и тополя Симона (*Populus simonii* Carrière) электротомографией, САВ-методом и резистограф-методом. Результаты показали, что три метода неразрушающего контроля способны дать различную оценку степени разложения древесины растущих деревьев: резистограф дает хорошую диагностику независимо от стадии разложения древесины, на начальных стадиях поражения лучшую диагностику дает электротомография, а САВ-метод предпочтительнее использовать на средней стадии разложения (Yue et al., 2017).

Для выявления внутренних состояний деревьев на примере четырех древесных видов Бразилии была выполнена сравнительная оценка двух неразрушающих инструментариев – ультразвуковой томографии (Divos, Szalai, 2002) и резистивного бурения (IML F400 Resistograph, Germany) (Reis et al., 2017). Результаты показали, что томография информативна для оценки состояния сечений ствола с выраженной и обширной деградацией. Однако она может оказаться несостоятельной, если необходимо иметь более точную информацию о размере и расположении зон деградации. Оценка сопротивляемости сверлению дает очень эффективный диагноз расположения кавитационных областей. Путем совмещения обеих технологий можно получить более точную оценку качества древесины.

**Нетривиальные акустические феномены деревьев и не только.** Для неразрушающего контроля активности насекомых в древесине растущих деревьев разработаны биоакустические датчики. Они позволяют подслушивать порождаемые деятельностью короедов специфические звуки, исходящие изнутри ствола (Allison, 2017). Но растения, по крайней мере их корни, сами способны издавать звуки (предположительно вследствие расщепления клеточных стенок в ходе роста), которые слышат соседние корни и в зависимости от характера звука выбирают ту или иную стратегию поведения. То, что корневые окончания представляют собой сложные чувствительные органы, способные регистрировать различные сигналы и реагировать на них,

было установлено ещё Ч. Дарвином, но как корни это делают, до сих пор непонятно (Gagliano et al., 2012). В сфере сенсорного восприятия растения не уступают животным и кроме пяти общеизвестных имеют еще как минимум 15 других чувств, которыми человек не располагает (Манкузо, Виола, 2019). До сих пор официальной наукой не признан (поскольку не объяснен) так называемый «эффект Кирлиан» (Кирлиан В. Х., Кирлиан С. Д., 1964), вызванный собственными митогенетическими излучениями, описанными А. Г. Гурвичем (1944). И. С. Марченко (1995) изучил эти излучения в виде разрядных свечений биополей деревьев и установил эффект антагонизма у лиственных и хвойных древесных видов. Всё это легло в основу понятия «интеллект растений», хотя физические носители этих «интеллектуальных» отношений у растений в большинстве своем пока неизвестны или не объяснены (Trewavas, 2003; Garzon, Keijzer, 2011; Манкузо, Виола, 2019).

Таким образом, акустическое зондирование достаточно большой совокупности растущих деревьев пригодно для сравнительных исследований свойств древесины на уровне древостоя, а также в селекционных программах и при оценке последствий рубок ухода (Raymond et al., 2008; Murphy, Cown, 2015; Essien et al., 2016). Оно относится к самым быстрым и недорогим, поскольку один оператор может снять показания в течение нескольких секунд (Wessels et al., 2011). Сегодня во всем мире акустические технологии все активнее внедряются в лесную и деревообрабатывающую промышленность, особенно в тех случаях, когда ценность конечного продукта напрямую связана с качественными характеристиками древесины, в частности с высокой ее прочностью (Brazeo et al., 2011; Schimleck et al., 2019).

### Радиационные методы

Исследования по применению радиационных методов определения плотности древесины получили свое развитие в конце 1950-х – начале 1960-х годов. Основанные на использовании  $\beta$ -,  $\gamma$ - и рентгеновских лучей радиационные методы определения плотности древесины в то время относились к числу наиболее совершенных способов анализа древесины. По сравнению с традиционными способами некоторые из этих методов дают определенный выигрыш во времени, но при этом все они требуют довольно дорогостоящего оборудования и высокой квалифика-

ции специалистов. Радиационными методами можно определять не только общую, но и внутрикольцевую плотность древесины, что является их достоинством по сравнению с весовыми методами (Симоненко, 2014).

Метод  $\beta$ -лучевого определения плотности древесины основан на линейной связи плотности с логарифмом ослабления интенсивности излучения. Сначала образцы древесины доводятся до однородной влажности 8–10 %, а затем просвечиваются  $\beta$ -лучами, при этом в качестве источника излучения используется стронций-90 или углерод-14. Диаграммы плотности исследованной древесины получают с помощью записывающего устройства, обрабатывают и строят графики изменения средней плотности годовых слоев, а также плотности ранней и поздней древесины. Полученные графики также позволяют оценивать степень «контрастности» годовых слоев и сравнивать изменчивость плотности образцов древесины разных деревьев. При этом основным недостатком  $\beta$ -лучевого метода является большая трудоемкость (Симоненко, 2014).

При методе  $\gamma$ -лучевого определения плотности в качестве источника излучения используется цезий-137. Он имеет большую проникающую способность и позволяет работать с образцами древесины в широком диапазоне толщин, до 90 см (Korell, Blofeld, 1978). При исследовании плотности и однородности структуры древесины эвкалиптов лимонного и красного был применен метод неразрушающего ослабления гамма-излучения (Cherelli and Ballarin et al., 2017). Плотность сердцевинной древесины была выше, чем заболони в изученных видах. Результаты плотности не показали статистически обусловленной разницы между сердцевиной и заболонью, и, напротив, наблюдались статистические различия между показателями однородности для сердцевинных и заболонных участков. Сделан вывод, что вполне оправданно включение показателя однородности плотности в качестве параметра качества для эвкалиптовой древесины.

**Рентгеновский метод** определения плотности древесины менее трудоемок, но требует более дорогого оборудования. При определении плотности образцы древесины просвечивают мягкими рентгеновскими лучами по 10–20 шт. и по негативам с помощью микрофотометра и записывающего устройства снимают графики распределения внутрикольцевой плотности. Точность результатов при этом зависит от правильности приготовленных образцов и равно-

мерности дозировки излучения (Симоненко, 2014).

Распространенный и надежный метод рентгеновского микроплотностного анализа (Pot et al., 2002; Louzada, Fonseca, 2002; Li, Wu, 2005) был использован для оценки плотности древесины сосны приморской на ранней стадии (Bouffier et al., 2008). Оценки плотности ювенильной и спелой древесины были хорошо коррелированы, и относительная эффективность ранней селекции достигала около 80 % в возрасте 12 лет. Тем не менее сделан вывод, что при массовых измерениях в селекционной программе использовать рентгеновский денситометр нереально, поскольку процедура эта трудоемкая и относительно дорогостоящая. К аналогичному выводу пришли в Финляндии: рентгеновская томография показала способность обеспечить хорошее изображение плотности и внутренней структуры, например, наличие сучьев в древесине, но также имеет недостаток в том, что он относительно дорог и не подходит для полевых измерений (Hanhijärvi, Ranta-Maunus, 2008; Ruggirello, 2017).

Сравнительное исследование плотности 33- и 42-летних сосен Тунберга (*Pinus thunbergii* Parl.) в Японии обычным методом с использованием ядер и денситометрии на основе мягкого рентгеновского излучения показало, что масса углерода у сосны, рассчитанная по двум методам, в двух префектурах Японии различается соответственно на 27 и 6 %, и по плотности древесины не выявлено устойчивой связи с возрастом (Taki et al., 2014).

Многие вышеупомянутые методы неразрушающего контроля в настоящее время дублируются с помощью стационарной системы SilviScan, в основе которой лежит радиационная денситометрия (рис. 5). Она включает в себя мультиспектральные и мультимодальные рабочие процессы, в частности визуализацию проходящего света, объединение последовательных данных для формирования полных профилей квалитметрии по радиусу ствола, обычную рентгеновскую абсорбционную денситометрию с использованием сцинтилляционного детектора и обычную рентгеновскую дифрактометрию небольших участков образцов. SilviScan включает автоматизированный процесс измерения годовых колец ядер для получения значений плотности, угла микроволокон, размерных характеристик клеток, а также степень косослойности древесины. Вследствие высокой точности

получаемых результатов система служит базовой основой при сравнении разных методов неразрушающего контроля (Schimleck et al., 2019). L. Schimleck с соавт. (2019) утверждают, что дифракционная система SilviScan может измерять за год миллиарды клеточных структур, т. е. больше, чем общее число измерений угла микроволокон методом микроскопии в течение любого числа лет.

Поскольку в большинстве случаев на практике требуется определение общей, а не внутрикольцевой плотности, гравиметрические методы имеют неоспоримое преимущество перед радиационными (Полубояринов, 1976а).

### Ближняя инфракрасная спектроскопия

Ближняя инфракрасная спектроскопия (NIRS) успешно применяется для измерения многих свойств древесины. Этот метод неразрушающего контроля использует спектры, измеренные в ближней инфракрасной области электромагнитного спектра. Измеренные длины волн и их разрешение варьируют в зависимости от применяемого прибора, но наиболее полезная область для качественного анализа отраженных спектров составляет от 1200 до 2500 нм (8333–4000 см<sup>-1</sup>). Преимущество этого метода, которым не обладает ни один другой метод неразрушающего контроля, заключается в способности оценивать химию древесины или свойства, непосредственно связанные с химией, такие как выход целлюлозы. Квалитметрия растущих деревьев потенциально может быть оценена с помощью спектров, отобранных на месте или полученных на измельченных возрастных ядрах в лаборатории (Schimleck et al., 2019).

Наибольшее распространение NIR-спектроскопия получила при квалитметрии цельного дерева по извлеченным ядрам древесины (Schimleck et al., 2005), в том числе в селекционных программах (Meder et al., 2010). Тем не менее при сравнении выхода целлюлозы, полученного по NIR-спектрам, записанным с растущих деревьев с помощью портативного прибора, оказалось, что оценки, полученные по древесине измельченных ядер на лабораторном спектрометре, дают лучшие результаты (Muneri et al., 2011).

Разработанная калибровка NIRS для базисной плотности древесины с помощью соответствующих портативных устройств обладает по-

тенциалом получения ближних инфракрасных спектров у растущих деревьев (Sánchez et al., 2017b). Подобный портативный прибор применен на двух клонах эвкалипта в Испании, из которых предварительно были извлечены керны и определена их базисная плотность. В лаборатории проанализированы профили микроплотности и получены их спектры в инфракрасном диапазоне.

Ближнее инфракрасное гиперспектральное изображение исследовалось на пяти образцах древесины криптомерии японской (син. кедр японского) (*Cryptomeria japonica*). Для достижения высокой достоверности прогнозных значений в качестве эталонных данных использовалась система SilviScan (рентгеновская денситометрия, рентгеновская дифрактометрия, оптическая микроскопия) с высоким пространственным разрешением. После предварительной спектральной обработки и выбора ключевых длин волн был применен метод наименьших квадратов для калибровки данных ближнего инфракрасного диапазона по эталонным значениям. Коэффициент детерминации при оценке модуля упругости составил 0.66. Установлены значимые различия между ранней и поздней древесиной (Ma et al., 2017, 2018). С использованием данных NIR-спектроскопии, полученных на образцах древесины кедр японского известной плотности, была построена модель для прогнозирования плотности сухой древесины (Watanabe et al., 2012).

На примере 5-летних деревьев эвкалипта была исследована ближняя инфракрасная спектроскопия в сочетании с многомерным анализом данных с целью прогнозирования удельного веса, модуля разрыва и модуля упругости. Для каждой характеристики древесины были разработаны регрессионные калибровки методом наименьших квадратов. Калибровки имели хорошие соотношения между значениями, измеренными в лаборатории, и прогнозируемыми значениями спектроскопии, полученными на образцах древесины. Коэффициент детерминации при калибровке колебался от 0.76 до 0.83, а при прогнозировании – от 0.58 до 0.77. Стандартные ошибки прогнозирования были несколько выше по сравнению со стандартной ошибкой калибровки (Kothiyal, Raturi, 2011). Аналогичные коэффициенты детерминации при оценке модулей упругости и разрыва путем аналогичной калибровки древесины дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) составили соответственно 0.80 и 0.78 (Yu et al., 2020).

На образцах сосны южной в США получены NIR-спектры диффузного отражения с калибровкой по методу наименьших квадратов. Общая умеренная прогностическая способность была обнаружена между характеристиками NIR-спектров и квалиметрическими показателями – удельным весом блока ( $R^2 = 0.66$ ), модулями упругости ( $R^2 = 0.58$ ) и разрыва ( $R^2 = 0.4$ ). Сделан вывод, что в целом NIR-спектроскопия обладает достаточно хорошей предсказательной способностью (Dahlen et al., 2017).

Гиперспектральная визуализация в ближнем инфракрасном диапазоне была использована при построении прогнозной модели и картографировании прогнозируемых значений МОЕ древесины криптомерии японской. Полученные карты прогнозируемых значений МОЕ позволяют различать позднюю и раннюю древесину, а также живые и отмершие сучки (Sofianto et al., 2019).

В целом преимущество методов NIR-спектроскопии состоит в том, что они позволяют измерить несколько различных квалиметрических показателей, таких как химические свойства древесины, ее плотность, угол микроволокон целлюлозы, косослойность, а также модули упругости и разрыва на бездефектной древесине кернов. Однако этот косвенный подход требует калибровки, поскольку не является прямым методом измерения какого-либо показателя (Wessels et al., 2011).

### Микроволновое сканирование

Когда древесина используется в качестве строительного материала, важнейшими ее характеристиками являются отклонение угла волокон, содержание влаги и плотность. Влажность обычно определяется с помощью емкостных влагомеров с использованием высокочастотных сигналов или с помощью контактных влагомеров электропроводимости (Wilson, 1999), которые способны успешно справляться с промышленными потребностями. Однако подобным измерениям свойственны отклонения при изменении угла волокон древесины. Кроме того, для надежного определения влажности они требуют информации о плотности. Метод рентгеновских лучей успешно применен для измерения плотности, обеспечивая скорость и качество измерений (Schajer, 2001). Тем не менее эти системы остаются довольно дорогостоящими и требуют специальных средств защиты от опасного ионизирующего излучения. Угол отклонения воло-

кон значительно влияет на прочность древесины (Kollmann, Côté, 1984), однако при обычной визуальной сортировке отклонения волокон остаются незамеченными.

На протяжении многих лет микроволновой метод применялся как перспективный инструмент для быстрого, неразрушающего и бесконтактного определения ключевых параметров плотности, влажности и отклонения волокон древесины (King, Yen, 1981). Измерениям данным методом влажности и плотности при отсутствии информации об угле отклонения волокон свойственны смещения оценок (Martin et al., 1987; Johansson et al., 2003; Lundgren et al., 2006). Интегральный учёт анизотропных диэлектрических свойств древесины с использованием микроволновой технологии позволяет одновременно определять плотность, влажность и угол наклона волокон в отдельности (James et al., 1985; Schajer, Orhan, 2006). Определение угла наклона волокон влажной (7.6–14 %) и высушенной древесины дает среднеквадратичную ошибку соответственно 0.14 и 0.4°. Метод дает оценку содержания влаги вне зависимости от плотности. Предложены адаптированные регрессионные модели, позволяющие оценивать содержание влаги с ошибкой 0.45 %. По плотности, влагосодержанию и температуре определена диэлектрическая проницаемость влажной и высушенной древесины в диапазоне от 8 до 12 ГГц (Aichholzer et al., 2018).

Для изучения возможности калибровки прогнозной модели распределения влажности и плотности сосны обыкновенной проведено исследование с использованием микроволновых сенсоров. Первоначально древесина имела исходное содержание влаги, а затем была высушена в несколько этапов до нулевого содержания влаги. На каждом этапе все образцы взвешивались, сканировались с помощью микроволнового сенсора (Satimo 9.4 ГГц) и выполнялась компьютерная томография (КТ) с помощью медицинского сканера (Siemens Somatom AR. T.). Построена регрессионная модель, в которой в качестве предикторов использовались выходные переменные микроволнового сенсора, а в качестве переменных отклика – КТ-изображения, коррелирующие с известным содержанием влаги. Полученные результаты показали, что с помощью микроволновых сенсоров можно с высокой точностью прогнозировать распределение в древесине как влажности, так и плотности (Johansson et al., 2003).

## О влиянии влажности древесины на точность оценки ее плотности

Известно, что влажность по отношению к сухой массе и базисная плотность у растущих деревьев – взаимосвязанные показатели, причем характер взаимосвязи видоспецифичен. Если у сосны, ели и березы (*Betula* L.) названные показатели изменяются вдоль по всему стволу обратно пропорционально, то у осины (*Populus tremula* L.) – прямо пропорционально, за исключением нижней 20%-й доли длины ствола (Полубояринов и др., 1982). Применяя любой из неdestructивных методов оценки плотности древесины дерева, мы получаем искомое значение в форме условного показателя, специфичного в каждом конкретном устройстве: в пилодин-тестере это глубина погружения штифта, в резистографе – усилие кручения, в ригидометре – изгибающий момент и для получения интересующего конечного значения, например базисной плотности, в каждом случае применяется дополнительная процедура той или иной калибровки.

Содержание влаги относится к одному из наиболее важных факторов, влияющих на точность оценки плотности древесины (Исаева, 1974; Полубояринов, 1976а; Полубояринов и др., 1982; Wang, Chuang, 2000; Glass, Zelinka, 2010; Chan et al., 2011), в том числе и при применении методов неразрушающего контроля растущих деревьев. Но в данном аспекте проблемы мы анализируем взаимовлияние других показателей, отличных от вышеупомянутых влажности по отношению к сухой массе и базисной плотности. Нас интересует влияние влажности «живой» древесины растущего дерева на показатель, снимаемый с того или иного измерительного устройства. Именно соотношение этих первичных показателей (исходной влажности и отсчета прибора) интересовало исследователей, начиная с самых первых экспериментов по неразрушающему контролю плотности древесины растущих деревьев.

В 1978 г. при испытании нескольких опытных конструкций пилодин-тестера на растущих деревьях ели европейской, сосны обыкновенной и бука европейского (*Fagus sylvatica* L.) установлено, что при влажности от 8 до 24 % ее дальнейшее повышение на 1 % увеличивает глубину проникновения штифта в древесину на 1–2 %, однако по достижении предела насыщения волокон влагой (около 30 %) влияние влажности становится незначимым (Hoffmeyer, 1978). В аналогичных экспериментах с дугла-

сией при влажности 6–30 % при ее повышении на 1 % глубина проникновения штифта увеличивается на 0.19–0.26 мм, однако при влажности выше 30 % достоверного влияния этого показателя не обнаружено (Smith, Morrell, 1986).

При аналогичном исследовании влияния влажности древесины сосны черной в Испании в диапазоне 65.1–8.3 % с помощью пилодин-тестера и резистографа установлено отсутствие влияния влажности на показания обоих приборов за пределами точки насыщения волокон (30 %). В диапазоне влажности 8–30 % связь показаний резистографа с влажностью была на уровне коэффициента детерминации 0.512, тогда как связь показаний пилодин-тестера с влажностью – лишь 0.154 (Llana et al., 2015)

Высокую чувствительность резистографа к изменению влажности древесины отмечали и другие авторы (McLain, 1997). Сопротивление сверлению при влажности древесины 7 % по сравнению с показаниями при влажности насыщения волокон были в среднем на 50 % выше, причем у клена сахарного (*Acer saccharum* Marshall) – на 71 % и у сосны веймутовой – на 23 % (Cockrell, 1933).

В экспериментах с использованием пилодин-тестера изменение влажности древесины в диапазоне от 8 до 14 % у сосен обыкновенной, замечательной и черной не повлияло на показания прибора. Но использование у этих же видов резистографа Fakopp показало существенное видоспецифичное увеличение сопротивления бурению при снижении влажности в том же диапазоне, и для каждого вида было выведено корректировочное уравнение второго порядка (Calderón, 2012).

Таким образом, при влажности древесины растущего дерева ниже уровня насыщения волокон (30 %), связь показаний прибора с плотностью древесины может быть, как значимой, так и незначимой в зависимости от метода определения и видовой принадлежности объекта исследования. Но если древесина находится в состоянии максимального насыщения влагой, что соответствует влажности около 30 %, то при оценке плотности древесины растущих деревьев неразрушающими методами ее влажность на уровне, превышающем 30 %, не влияет на точность определений. Поскольку древесина здорового дерева имеет влажность, обычно превышающую 30 %, то независимо от метода определения плотности введения каких-либо корректировочных коэффициентов к показателям приборов нет необходимости.

Кроме влажности древесины на показатели ее плотности оказывает влияние наличие экстрактивных (смолистых) веществ, повышающее плотность в среднем на 6–8 % (Полубояринов, 1976a). Однако вопрос о влиянии их на показатели плотности, определяемые неразрушающими методами, практически не исследован.

## Определение влажности древесины

В условиях изменяющегося климата древесные растения часто подвергаются стрессам вследствие периодических засух. Изменчивость стрессового состояния сопрягается с изменчивостью содержания влаги в стволе и определяется также видовыми свойствами. При сильном дефиците воды растениям приходится сталкиваться с дилеммой возможной гибели в результате или иссушения, или углеродного голодания. Содержание воды в проводящих тканях ствола подвержено суточным колебаниям вследствие изменения водного потенциала ксилемы. Для оперативного контроля водного стресса деревьев необходимы простые и точные методы измерения влажности древесины растущих деревьев (Malavasi et al., 2016).

Содержание воды в стволах наземных растений измеряют *in situ* с использованием различных сенсорных методов. Для регистрации водного потенциала живых растений без их повреждения используются ствольные психрометры. Стержневой психрометр крепится к стволу зажимами с использованием светового давления и дает точный и воспроизводимый показатель водного потенциала растений, связанный с кавитацией ксилемы и эмболией вследствие дефицита влаги (Vogt, 2001). Более поздний инструментарий включает магнитно-резонансную томографию (Schepper et al., 2012), рентгено-компьютерную томографию (Raschi et al., 1995), дендрометрию ствола (Fernandez, Cuevas, 2010), определение диэлектрической проницаемости (Sparks et al., 2001) и др.

Метод магнитно-резонансной томографии (МРТ) – не инвазивный и безопасный, но дорогой и непрактичный для долгосрочного мониторинга водного статуса растений в естественных условиях. Была установлена взаимосвязь между результатами МРТ и изменением диаметра ствола дуба вследствие индуцированной транспирации (Schepper et al., 2012). Суточные изменения содержания воды в стволе, вызывающие расширение или сжатие диаметра ствола, фиксируются дендрометрами. Однако их показания могут

смещаться в условиях разной степени засушливого стресса (Fernandez, Cuevas, 2010), а также вследствие ростовых изменений ствола.

Диэлектрическая проницаемость древесины, зависящая от ее влажности, – важная характеристика древесины и физических свойств изделий из нее. Зависимость диэлектрической проницаемости от содержания влаги может быть полезна для оценки физического состояния древесины. В последнее время были проведены исследования с использованием георадарных методов (Martinez-Sala et al., 2013; Hans et al., 2015; Mai et al., 2015), преимуществом которых является возможность выполнения прямых измерений. Характеристики используемого сигнала (передача или отражение) зависят от диэлектрических свойств древесины, а они – от плотности древесины (Milota, 1994) и от ориентации волокон (Schajer, Orhan, 2006). Путем использования метода слабых возмущений на примере нескольких древесных видов установлено, что относительная диэлектрическая проницаемость, соответствующая электрическому полю, параллельному направлению волокон, значительно выше, чем в перпендикулярном направлении (Razafindratsima et al., 2017).

При оценке влажности древесины как сырья для изделий применяют штифтовые и бесконтактные влагомеры (Берлинер, 1973). Штифтовой влагомер основан на определении электрического сопротивления древесины, заключенной в промежутке между двумя погруженными в древесину штифтами. При изолировании определенных участков по длине штифта можно получить градиент влажности в направлении от сердцевины к поверхности ствола. В бесконтактном влагомере используется емкостный метод. Он основан на взаимосвязи между содержанием влаги и диэлектрическими свойствами древесины и показывает среднюю влажность в трехмерном поле. Как электрическое сопротивление, так и диэлектрические свойства древесины изменяются прямо пропорционально ее влагосодержанию при предельном значении 30 %, т. е. ниже точки насыщения волокон. Показания влагомеров зависят также от структуры древесины, ее химических свойств и температуры материала (James, 1988; Milota, 1996; Wilson, 1999). При измерении в радиальном направлении отношение проводимости перпендикулярно волокон к проводимости вдоль волокон составляет около 0.055 и при измерении в тангентальном направлении – 0.50 (James, 1988). При влажности более 10 % электрическая проводимость древесины

удваивается при каждом 10%-м повышении ее температуры (Davidson, 1958; James, 1968).

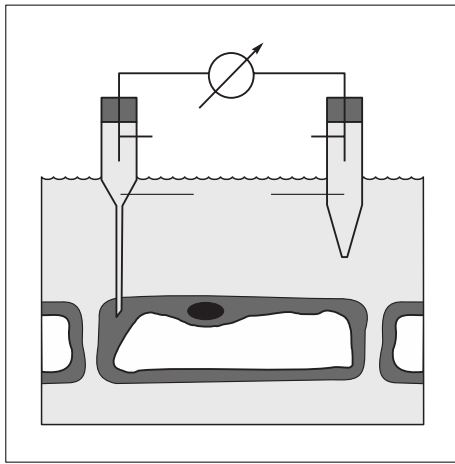
При содержании влаги менее 10 % в показателях влагомеров возможны смещения по отношению к данным, полученным термовесовым методом (Forsén, Tarvainen, 2000). При исследовании 13 листовых видов Канады установлено, что в диапазоне влажности древесины 6–26 % влагомеры обоих типов дают как положительные, так и отрицательные смещения, связанные с влажностью древесины, и их абсолютные значения обычно находятся в пределах 2 % (Wengert, Bois, 1997; Shupe et al., 2002). Поправочный коэффициент зависит от типа влагомера: при использовании бесконтактного влагомера он больше, чем при использовании штифтового (Gillis et al., 2001). Связь показателей влагомеров с истинными значениями характеризуется коэффициентами детерминации, обычно превышающими 95 % (Shupe et al., 2002), но для дугласии в Австралии он составил лишь 85 % (Blakemore, 2003).

### **Биопотенциалы в диагностике состояния растений**

Биоэлектрические потенциалы (БЭП) представляют одну из важнейших характеристик живой материи. История исследований БЭП началась в XVIII в. с изучения природы «животного» электричества у некоторых рыб. В 1882 г. Э. Г. Дюбуа-Реймон установил общность биоэлектрических явлений у животных и растений, а в 1902 г. это научное направление получило обобщение в виде мембранной теории, сформулированной его учеником Ю. Бернштейном (De Palma, Pareti, 2010). За расшифровку ионного механизма возникновения биопотенциала действия и разработку мембранной теории БЭП (1947–1952 гг.) английские физиологи А. Ходжкин, А. Хаксли и Б. Кац были удостоены Нобелевской премии (Еремин, 2016). Несмотря на то, что БЭП живых организмов исследуются более 200 лет, механизм их возникновения до сих пор не объяснен (Кулешова и др., 2019).

Способность находиться в состоянии неравновесной электрической поляризации, мерой которой служит БЭП, – фундаментальное свойство живой ткани. БЭП, возникающие в тканях и отдельных клетках живых организмов, являются важнейшими факторами процессов возбуждения и торможения клеток. Эта энергетическая характеристика взаимодействия и движения зарядов в исследуемой живой системе измеряется





**Рис. 13.** Внутриклеточное измерение мембранного потенциала с помощью микроэлектрода, введенного в цитоплазму водорослевой клетки, в то время как электрод сравнения находится вне клетки (Fromm, Lautner, 2007).

как разность потенциалов между двумя точками ткани и отражает биоэлектрическую активность органа или организма в целом и характер протекания метаболических процессов (Зарудный, 1970; Кулешова и др., 2019).

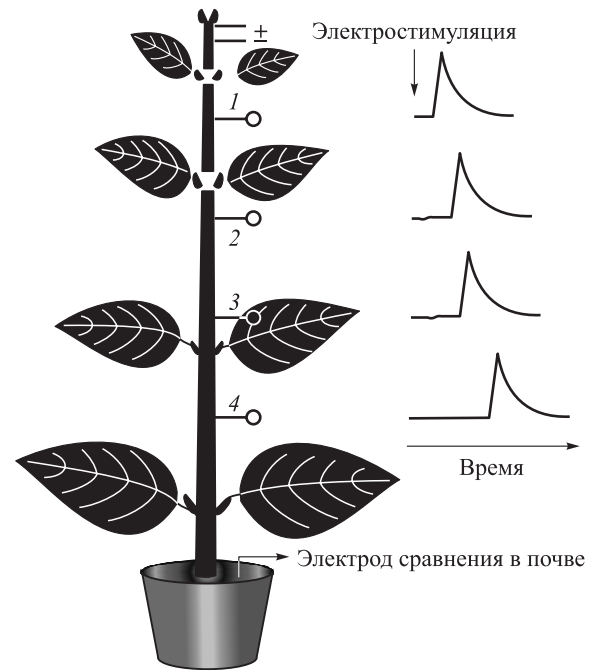
Различают два типа БЭП – один происходит на клеточных мембранах, второй имеет внеклеточное происхождение. Мембранные потенциалы, в свою очередь, проявляются как разновидности БЭП покоя и возбуждения (действия). БЭП покоя представляет разность потенциалов между цитоплазмой и внеклеточной жидкостью вследствие разной концентрации ионов в них, а БЭП действия – быстрое колебание (*spike*) мембранного потенциала, возникающее при раздражении клеток. БЭП течения (внеклеточного происхождения) возникает в пристеночном двойном электрическом слое при движении жидкости в живых тканях (Ходоров, 1969; Коловский, 1980; Медведев, 1997).

Соответственно существуют два различных способа измерения БЭП:

1) внутриклеточный потенциал фиксируется путем помещения электродов внутрь клетки и за ее пределы (рис. 13);

2) БЭП растительной ткани (БЭП течения) определяется с помощью контакта электродов с разными точками растения, между которыми проводится измерение (рис. 14) (Parkinson, 1963; Fromm, Lautner, 2007; Кулешова и др., 2019).

Установлено, что все высшие растения могут использовать электрические сигналы для регулирования различных физиологических функций. В отличие от химических сигналов, таких как гормоны, электрические сигналы способны



**Рис. 14.** Внеклеточное измерение БЭП растительной ткани с последовательной четырехступенчатой электростимуляцией (Fromm, Lautner, 2007).

быстро передавать информацию на большие расстояния. Причина, по которой растения выработали пути передачи электрического сигнала, скорее всего заключается в необходимости быстро реагировать на внешние раздражители, например на факторы стресса со стороны внешней среды (Fromm, Lautner, 2007).

Важным показателем функционального состояния растений служит электрическая проводимость их тканей, определяемая взаимодействием наложенного электрического поля со свободными и связанными зарядами объекта. Она зависит как от свойств электрического поля (постоянный или переменный ток), так и от свойств объекта. Электрическая проводимость, измеряемая при пропускании постоянного тока, определяется в основном свободными зарядами. Во время пропускания переменного тока существенное значение имеют связанные заряды. Общая электрическая проводимость зависит от частоты переменного тока. Постоянный электрический ток, проходя через ткани растения, разветвляется по системе проводников с разным сопротивлением. Наименьшее сопротивление (величина, обратная электрической проводимости) имеют оводненные клеточные стенки, хорошо проводящие электрический ток. Гораздо большее сопротивление оказывают мембраны, липидные слои которых служат хорошими изоляторами. Сопротивление плазмодесм, обеспе-

чивающих межклеточные контакты, в десятки раз меньше мембранного, но также достаточно велико. Для переменного тока, особенно высоких частот, липидные слои мембран не служат существенным барьером, поэтому сопротивление биологических объектов, измеренное при пропускании переменного тока, меньше, чем при пропускании постоянного (Fromm, Lautner, 2007).

Электрические свойства растений, используемые для оценки роста и физиологических характеристик растений, возникают на клеточном уровне и обусловлены различиями в протекании электрического тока, которые отражают функции клеточных мембран и движение внеклеточных и внутриклеточных жидкостей. Среди электрических свойств деревьев наиболее часто используются БЭП, электросопротивление (сопротивление постоянному току между двумя точками – величина, обратная проводимости) и импеданс (полное электрическое сопротивление цепи переменному току) (Tattar, Saufley, 1973). Измерение электросопротивления, импедансная томография и спектроскопия отображают удельное сопротивление дерева. Несмотря на методологическое разнообразие, все эти устройства в конечном счете измеряют сходные электрические характеристики и обычно повреждают ткани дерева вводимыми зондами (Goga, Yanoviak, 2015). Некоторые новые подходы включают менее интрузивные (но более дорогостоящие) технологии, такие как ультразвуковая томография и георадар (Sambuelli et al., 2003; Al Hagrey, 2007).

С помощью моста Уитстоуна установлено, что электрическое сопротивление в камбиальной зоне растений обратно пропорционально скорости их роста (Shortle et al., 1977). Однако разница в сопротивлении наблюдается лишь при значительных различиях в росте растений (Piene et al., 1984a, b). Кроме того, сопротивление недостаточно тесно коррелирует с ростом отдельных растений (Smith, Ostrofsky, 1993). На примере дуба выявлена обратная корреляция электросопротивления с рН пасоки и содержанием калия и магния (Bieker, Rust, 2010).

Измерениями БЭП в системе растение – почва у тополя установлено, что поток пасоки связан с электрическими колебаниями, вызванными электрохимическими эффектами, включая мембранные диффузионные потенциалы и активный транспорт ионов (Gibert et al., 2006). Однако на эти данные оказали влияние такие факторы окружающей среды, как атмосферное электричество, а также геомагнитное и электрическое поля Земли (Korpan et al., 2000).

Хотя предпринято много попыток понять взаимосвязь между физиологическими и электрическими свойствами растений, степень корреляции условий окружающей среды с электропроводностью растений до сих пор неясна (Jeon et al., 2017). Электрические свойства отражают быструю реакцию растения на стресс (Fromm, Lautner, 2007), которая визуальна (увядание и изменение цвета листьев) не всегда очевидна, поэтому для эффективной оценки реакции растений на стресс и изменение окружающей среды необходима разработка неразрушающих и легко применяемых в полевых условиях методов на основе моделирования (Jung et al., 2015; Moon et al., 2017).

Было предложено измерять скорость транспирации растений по тепловому балансу движущегося потока пасоки (Карасев, Карасева, 1975; Smith, Allen, 1996). Хотя движение воды в растении не имеет прямого отношения к быстрой реакции растений на окружающую среду или стресс, термо-биофизический метод показал свою эффективность при ранней диагностике физиологического состояния древесных растений (Карасев, 2001; Карасев, Карасева, 2004). Между расходом воды на транспирацию и температурой ствола установлена обратно пропорциональная связь, характеризующая у разных древесных видов значением  $R^2$  от 71 до 97 % против оценки по БЭП от 14 до 91 % и против оценки по импедансу камбиального слоя от 44 до 91 %. Кроме того, тепловые методы оценки состояния деревьев при различных типах повреждений, по сравнению с электрофизиологическими, обладают перспективой дистанционного получения информации (Карасев, Карасева, 2004).

Измерение БЭП распространено в качестве метода оценки реакции растений на стресс, но на него сильно влияют почвенная влага, температура и влажность воздуха, а также атмосферное электричество (Коловский, 1980; Dobbertin, 2005). В этой связи в исследовании жизненного состояния растений биофизическими методами может быть использован многофакторный анализ.

На примере растений перца стручкового разработана регрессионная модель для оценки электропроводности (ЕС) (Park et al., 2018):

$$ЕС = 0.765 T + 0.002 IR + 0.105 RH + 0.012$$

$$(R^2 = 0.715, p < 0.01), \quad (4)$$

где ЕС – электропроводность, мСИ/м;  $T$  – температура, °C;  $IR$  – радиация, Вт/м<sup>2</sup>;  $RH$  – отно-

сительная влажность воздуха, %. Уравнение (4) применимо для прогнозирования ЕС с учетом условий окружающей среды, и прогнозируемые значения были подтверждены путем сравнения их с измеренными ( $R^2 = 0.867$ ). Высокий коэффициент корреляции свидетельствует о том, что состояние роста растений соответствует условиям окружающей среды. Если ЕС, предсказанный по условиям окружающей среды, оказывается выше измеренного значения, это может указывать на некоторые физиологические проблемы растения (Park et al., 2018).

Одним из адекватных биофизических методов оценки состояния лесных экосистем является исследование электрического сопротивления (импеданса) древесных растений. При пропускании постоянного тока через живые клетки часто наблюдается дезинтеграция протоплазмы, что приводит к повреждению клеток и резкому повышению их электропроводности. Во избежание поляризации при определении сопротивления используется переменный ток на основе техники исследования импеданса древесных растений. Загрязнение воздуха и почвы приводят к повышению электрического сопротивления прикамбиального комплекса тканей, к подавлению обменных процессов в организме древесного растения и отражает уровень корнелистовой связи их жизнедеятельности.

Проведенный эксперимент с деревьями березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающей как в условиях нефтяного загрязнения, так и на контрольных площадках, показал, что на начальном этапе исследования средний уровень импеданса был вдвое больше его среднего уровня в контрольной группе, что связано с поступлением в корневую систему продуктов нефтешлама. Затем наблюдается незначительное изменение уровня импеданса и в конечном итоге зафиксировано снижение его уровня в экспериментальной группе. Это непосредственно связано с процессом жизнедеятельности растения, в ходе которого деревья березы адаптируются к стрессовым условиям, и процессы их жизнедеятельности восстанавливаются (Курило, Григорьев, 2015, 2019).

При измерении импеданса проявляется систематическая погрешность, для снятия которой применяют квадратичный интерполяционный алгоритм самокалибровки. Калибровку проводят по абсолютному значению импеданса. Относительная погрешность измерения импеданса после калибровки колеблется от  $-4.5$  до  $6.0$  %

при среднем значении  $-0.02$  % (Michalikova, Prauzek, 2014).

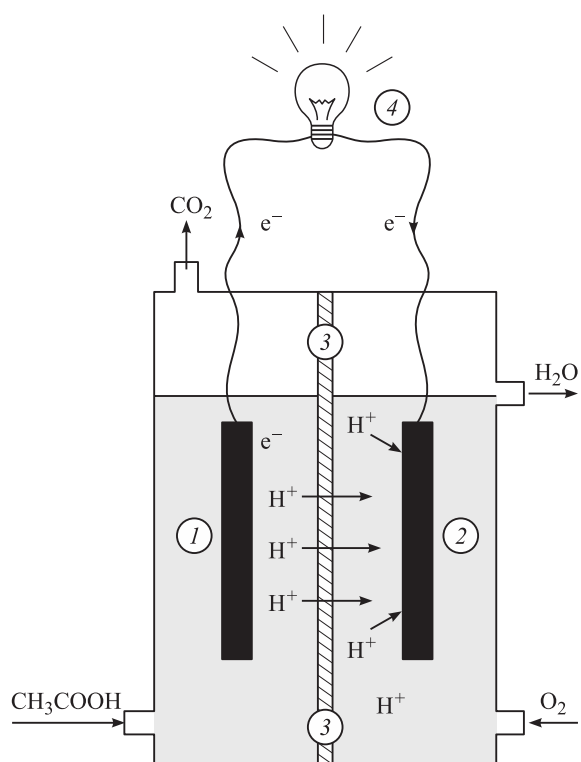
Изучение электрической сигнализации в растениях поможет разгадать природу информационного обмена внутри растительных клеток и органов. Необходимо более глубокое понимание механизма управления электрической сигнализацией, взаимосвязей между потоками ионов и физиологическими реакциями, а также молекулярной идентичности различных типов каналов, участвующих в передаче электрических сигналов.

### **Биотоки и микробные топливные элементы**

Выше было установлено, что изменение БЭП растений можно использовать как систему фитомониторинга, т. е. отслеживания состояния растительных организмов и стимуляции их развития. С другой стороны, генерируемые в растительных тканях биотоки являются основой для разработки технологий производства электроэнергии с помощью комбинации высших растений и микробных топливных элементов (МТЭ (*microbial fuel cells*, *MFC*)). Поиск альтернативных способов получения энергии из возобновляемых источников органического сырья привел к созданию МТЭ, в которых получение электрического тока происходит за счет окисления органических соединений электрогенными микроорганизмами в анаэробных условиях. Эти бактерии в процессе жизнедеятельности осуществляют транспорт электронов на внешнюю поверхность клеточной мембраны. Электроны могут быть акцептированы экзогенными и эндогенными медиаторами переноса электронов или же анодом МТЭ. В результате этих процессов в МТЭ регистрируется электрический ток (Strik et al., 2008; Воейкова и др., 2013; Voeikova et al., 2013).

Клетки микроорганизмов, используя органические вещества в качестве питания, производят углекислый газ, протоны и электроны. Последние служат источником электрического тока в МТЭ, где в анаэробной анодной камере идет окисление органических соединений (рис. 15).

Получаемый диоксид углерода удаляется из камеры, электроны поступают на анод и через него – во внешнюю цепь, а протоны проникают к катоду через ионоселективную мембрану. На катоде образуется вода в результате взаимодействия кислорода, протонов и электронов (Дебабов, 2017).



**Рис. 15.** Принцип работы МТЭ.

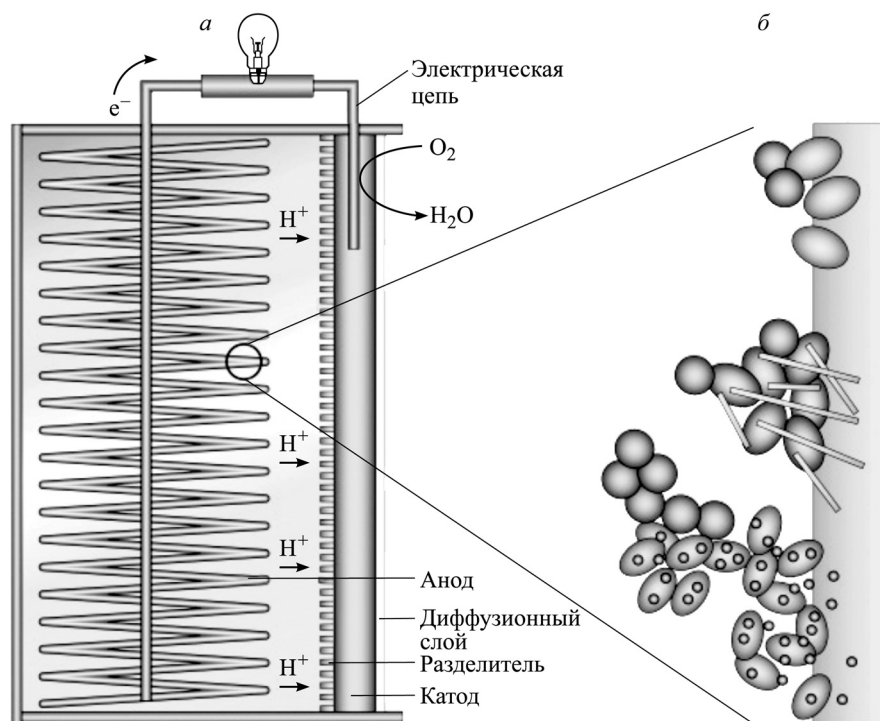
1 – анодная камера и анод; 2 – катодная камера и катод;  
3 – ионселективная мембрана; 4 – прибор, потребляющий ток (Дебабов, 2017).

МТЭ – это электрохимические реакторы, которые функционируют за счет окисления биоразлагаемых субстратов электроактивны-

ми бактериями для выработки электрического тока. Основываясь на электрогенной природе некоторых бактерий как биокатализаторов, технология МТЭ получила распространение для получения энергии из различных растворимых органических отходов. С другой стороны, недавно выявленные гетеротрофные грибы считаются перспективными для формирования биопленки вокруг электрода, что повышает производительность МТЭ (Sivasankar et al., 2018).

Возможность получения электроэнергии в процессе переработки микроорганизмами органических отходов пищевой промышленности, сельского хозяйства, очистных сооружений, инициирует исследования по оптимизации работы МТЭ. Они дают возможность получения электричества для питания приборов в отдаленных и труднодоступных регионах, в замкнутых системах, таких как подводные лодки и орбитальные космические станции. К преимуществам подобных технологий можно отнести их экологическую безопасность, возможность сочетать процессы утилизации отходов с получением электроэнергии.

В настоящее время мощность тока, получаемого в МТЭ (рис. 16, а), невысока, и для промышленного применения они должны быть усовершенствованы. Оптимизация работы МТЭ может идти как по пути технического усовершенствования конструкций (подбор материала



**Рис. 16.** Схема МТЭ (а) и представление разных типов электрогенных сообществ микроорганизмов (б) (Букач, Мякинкова, 2014).

и увеличение площади электродов, подбор мембран, конструкция ячеек, снижающих внутреннее сопротивление), так и путем генетической модификации микроорганизмов, в частности скорости, с которой микробные клетки могут окислять субстрат, способности клеток к передаче электронов на электрод (рис. 16, б) (Strik et al., 2008; Воейкова и др., 2013; Voeikova et al., 2013; Букач, Мякинкова, 2014).

Технология МТЭ позволяет сочетать получение биоэлектричества с очисткой почвы от органических отходов. Эксперименты показали, что в вариантах загрязненных почв количество получаемой электроэнергии было в 2–3 раза выше, чем на контроле, где загрязнение отсутствовало (Moqsud et al., 2015). Фитомелиорация представляет собой перспективный вариант применения МТЭ за счет формирования колоний специальных микробов на корнях и в почве (Vaquir et al., 2019).

Одновременное получение электроэнергии и очищение окружающей среды с использованием МТЭ – технология будущего. Для развития этого направления нужны фундаментальные исследования внеклеточного транспорта электронов, образования и функционирования катодных биопленок, а также транспорта протонов, компенсирующих заряды электронов. Необходимы поиски новых электрогенов и совершенствование известных, реконструкция геномов как для активации транспорта электронов, так и для модифицирования метаболизма бактериальных клеток (Дебабов, 2017).

### Инструментальные методы определения массы корней деревьев

Вышеизложенные методы учета массы подземных органов растений основаны на их раскопках. Метод раскопок не дает возможности оперировать большим количеством материала из-за трудности его получения, поэтому данные о массе подземных органов растений, особенно древесных, в основном статистически не обрабатываются.

Большие возможности для получения массовых данных о корнях растений дают так называемые «инструментальные» методы (Nadezhkina, Šermak, 2003), к которым можно отнести методы с применением радарной техники и электрометрических измерений.

**Метод с применением радарной техники** основан на радиолокационном сканировании почвенного объема на глубину до 30 м и позволяет получить карту пространственной

архитектоники корневой системы. Он не находит пока широкого применения, поскольку учитывает лишь скелетные корни толщиной более 20 мм (Hruska et al., 1999; Butnor et al., 2001; Nadezhkina, Šermak, 2003; Bolte et al., 2003).

**Электрометрический метод** – для измерения сопротивления (активного, емкостного, индуктивного) тканей растения пропускаемому через них электрическому току. Начальный этап его применения к исследованию количественных характеристик корневых систем растений охватывает период с 1920 по 1960 г., однако, по свидетельству W. Böhm (1979), эти эксперименты были либо неудачными, либо «модельными» и поэтому непригодными для натуральных измерений.

**Сравнительно более совершенный метод** разработан для сельскохозяйственных культур O. Chloupek (1972, 1976, 1977) на основе измерительного моста импеданса Tesla VM 394E с батарейным питанием и поэтому пригодного для полевых исследований. При напряжении 12 В максимальная измеряемая сила тока составляла 15 мА при частоте от 0.8 до 5.0 кГц. Один выход моста присоединяли к корневой шейке растения, а второй погружали в почву на глубину 10–15 см, снимали отсчет емкостного сопротивления, а затем определяли массу извлеченного из земли корня.

Метод основан на предположении, что при постоянстве толщины пограничного слоя-мембраны между растением и почвогрунтом и неизменной диэлектрической постоянной растений измеренное емкостное сопротивление пропорционально площади поверхности (и массе) корней. Но поскольку совокупность клеточных мембран растения также создает сопротивление электрическому току, то измеряемое емкостное сопротивление фактически зависит не только от площади поверхности корней, но и от их физиологии и внутренней структуры.

После 10–24 повторностей рассчитывали линейные регрессионные зависимости массы корней от величины емкостного сопротивления. Эти уравнения объясняли в среднем около 50 % общей изменчивости массы корней с колебаниями для отдельных культур от 43 до 90 %, а их регрессионный коэффициент существенно различался в разных типах почв: например, для подсолнечника (*Helianthus L.*) на песке и на суглинке он составил соответственно 3.02 и 0.25.

Такая неустойчивость оценок обусловлена неизвестной долей емкостного сопротивления клеток и тканей, изменчивостью диэлектрической постоянной, непостоянством характеристик

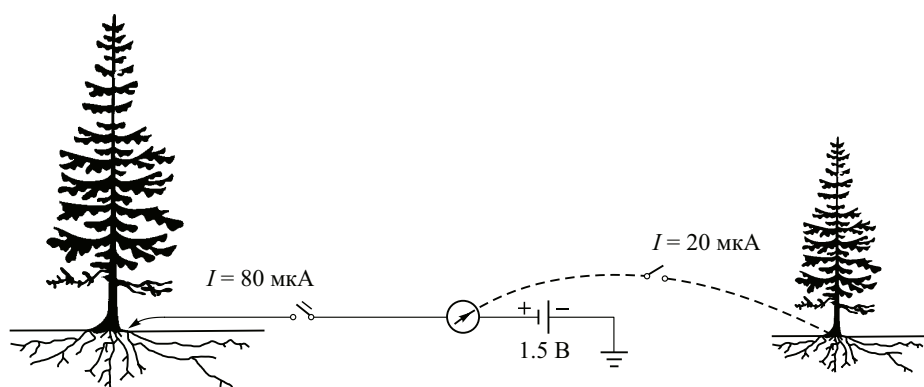


Рис. 17. Постановка эксперимента с проводимостью корневых систем (Якушев, 1988).

пограничных слоев между растением и почвой и между клетками растений, наличием «паразитной» емкости электродов, проводов и почвогрунта, а также варьированием физиологического состояния растений, структуры и влажности почвогрунта и т. д.

**Метод Б. И. Якушева (1988).** На основе многолетних эколого-физиологических и электрофизиологических исследований корневых систем растений Б. И. Якушеву (1972, 1988) удалось разработать более точный метод, основанный на пропускании через растение постоянного тока и во многом избежать методических недочетов предшественников.

Известен факт лучшей электропроводности растений по сравнению с почвогрунтом. Это связано с высоким содержанием в растительных тканях воды, подвижных ионов солей, органических кислот и других соединений. Общая суммарная концентрация этих веществ значительно превышает содержание солей в почвенном растворе. Таким образом, в растении содержится большое количество электролита. Если пропускать электрический ток от батареи с ЭДС 1.5В через растение и почву, то наибольшее его значение зафиксирует микроамперметр у крупных растений (рис. 17).

Например, у сосны 5-летнего возраста сила тока при замыкании цепи равна 20 мкА, а у 20-летнего дерева этого же вида – 80 мкА. Эта особенность прохождения электрического тока через растительные ткани и почву положена в основу разработанной методики.

На рис. 18 приведена схема прибора для определения массы подземных органов растений.

Он состоит из микроамперметра (1) (0–100 мкА), источника питания (2) с ЭДС 1.5 В, трех электродов заземления (3), одного контактного электрода (4), кнопочного включателя (5) и шунта (6) с коэффициентом  $\times 4$ . Электроды вы-

полнены из медной проволоки сечением  $\sim 3$  мм. Длина электродов заземления 100 мм. Они соединяются между собой параллельно и имеют общий вход.

У контактного электрода имеется иглообразный выступ длиной 4 мм и сечением  $\sim 1.5$  мм. При определении массы корневых систем больших деревьев возможны значительные показатели силы тока, превышающие 100 мкА, поэтому у микроамперметра предусмотрен шунт б. Общий вид прибора и схема его подключения к растению и почве показаны на рис. 19.

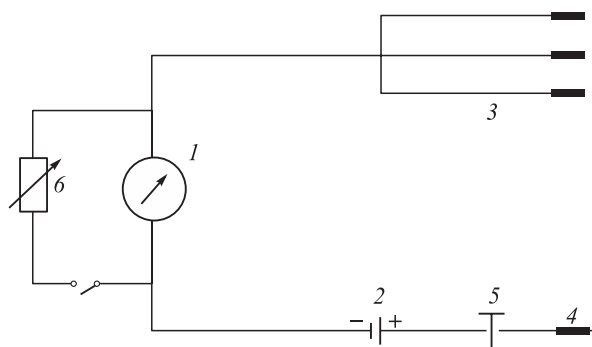


Рис. 18. Схема прибора на электрометрическом принципе для измерения массы корней древесных растений (Якушев, 1988).

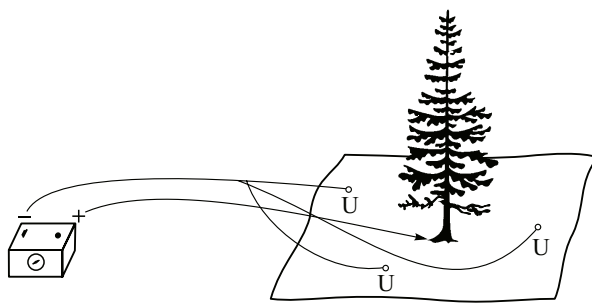


Рис. 19. Схема подключения прибора на электрометрическом принципе к растению и почве при определении массы подземных органов у древесных растений (Якушев, 1988).

Электроды с соблюдением полярности подключаются к прибору: электроды заземления к клемме (-), а контактный электрод – к клемме (+). Затем контактный электрод вводится в корневую шейку дерева, на которой на небольшом участке (~1 см<sup>2</sup>) снимается кора до луба. В середину этого зачищенного участка вставляется электрод с таким расчетом, чтобы в луб и древесину погрузился его иглообразный выступ. Для избежания шунтирующего эффекта флоремы необходимо снимать не только кору, но и луб. После этого на расстоянии ~ 2 м от ствола дерева с трех сторон в виде звездочки в почву вводятся электроды заземления. После нажатия на кнопочный включатель со шкалы микроамперметра снимается отсчет (отклонение стрелки от нулевого деления), обозначаемый индексом  $I_p$ .

При измерении  $I_p$  растения в течение сезона его значение изменяется. Это зависит от состояния влажности почвы. Чтобы исключить влияние условий увлажнения, лопатой откапывают несколько проводящих корней рядом произрастающего дерева того же вида, которое по параметрам близко к модельному. От выкопанных корней отрезаются секатором или пилой три эталонных отрезка длиной 20 см. Диаметр отрезка корня должен быть равен 1/10 толщины дерева у корневой шейки (в случае первого класса возраста) и на высоте 1.3 м у более взрослых. Этот отрезок корня (по ходу его роста) вставляется в почву вблизи ствола дерева на всю глубину (20 см), тщательно присыпается почвой, которая затем уплотняется. Верхний срез корня очищается от почвы и в его сердцевину вводится иглообразный выступ контактного электрода, предварительно извлеченный из корневой шейки дерева. Затем кнопочным включателем цепь замыкается (так как электроды заземления все время остаются в почве) и с микроамперметра снимается отсчет  $I_k$ . Все три эталонных отрезка последовательно нумеруют, заземляют и определяют их проводимость, записывая значения для каждого ( $I_{k1}$ ,  $I_{k2}$ ,  $I_{k3}$ ). Возможно, для более точной калибровки проводимости эталонных отрезков корней их нижние торцы необходимо изолировать от почвы, например, специальной быстро твердеющей мастикой.

Для получения достоверных результатов необходимо провести замеры у 10 модельных деревьев. Когда измеряется большое количество деревьев разного диаметра, то подобрать отрезки корней одинаковой толщины (равные 1/10 толщины дерева) невозможно. Можно делать отступление на 10–15 % в ту или иную сторо-

ну от среднего значения, но при этом в расчеты необходимо внести поправки, о которых будет сказано ниже.

Для дальнейших расчетов массы корней требуется знать объем каждого эталонного отрезка корня. При помощи штангенциркуля в нескольких местах отрезка корня замеряют его диаметр, вычисляют среднее значение и умножением полученной площади сечения на длину отрезка получают его объем. Расчет может быть продублирован ксилотрированием отрезков с использованием мерного цилиндра с водой. После определения объема каждого отрезка корня их высушивают в термостате при 100–105 °С и определяют сухую массу.

**Вывод формулы для расчета массы корней.** Зная ЭДС батареи ( $E = 1.5$  В) и показания микроамперметра при определении силы тока в заземленных эталонных отрезках корней ( $I_k$ ), можно вычислить их сопротивление:

$$R_k = E/I_k. \quad (5)$$

Таким же образом вычисляется сопротивление всей массы корней растения:

$$R_p = E/I_p. \quad (6)$$

При вычислении  $R_k$  и  $R_p$  допускается элемент условности, поскольку в эти величины фактически входит и сопротивление почвогрунта. Сопротивлением батареи и микроамперметра пренебрегают, так как оно по сравнению с сопротивлением корней ничтожно мало. Удельное сопротивление корней определяется по формуле

$$\rho = (R_k \cdot S_k) / l_k, \quad (7)$$

после постановки в нее выражения (5) получаем

$$\rho = (E \cdot S_k) / (I_k \cdot l_k), \quad (8)$$

где  $l_k$  – длина отрезка корня, м;  $S_k$  – среднее сечение отрезка, мм<sup>2</sup>.

Зная удельное сопротивление корней, можно вычислить среднее сечение ( $x$ ) всей корневой системы дерева длиной  $l$  м

$$R_p = \rho (l/x); \quad (9)$$

отсюда

$$x = (\rho \cdot l) / R_p. \quad (10)$$

После подстановки в (10) значений  $\rho$  по (8) и  $R_p$  по (6) получаем

$$\begin{aligned} x &= (S_k \cdot E \cdot I_p \cdot l) / (I_k \cdot l_k \cdot E) = \\ &= (I_p \cdot S_k \cdot l) / (I_k \cdot l_k). \end{aligned} \quad (11)$$

Для условной длины корней  $l$  и их площади сечения  $S_k$  можно рассчитать массу корней дерева  $P_p$  в граммах. Получаем общий вид формулы:

$$P_p = [(I_p \cdot S_k \cdot l^2) / (I_k \cdot l_k)] \cdot d, \quad (12)$$

где  $d$  – плотность эталонного отрезка корня.

Совершенно ясно, что растение и почва далеки от идеальной электротехнической системы, поэтому приведенная формула (12) принимается за основу с последующей корректировкой. Для этого масса корней у древесных пород определяется электрометрически, затем корни этих же растений учитывались методом раскопок (Рахтеенко, 1963). В результате сопоставления этих данных был рассчитан поправочный коэффициент  $F$  (в качестве множителя). Он численно равен возрасту дерева  $A$ , деленному на 4 ( $F = A/4$ ). Выше отмечалось, что для получения точного результата диаметр эталонного отрезка корня должен быть равным 1/10 толщины дерева. Отступления допустимы до 15 % в ту и иную сторону, но с обязательной поправкой  $V_0 / V$ , где  $V_0$  – теоретический объем отрезка корня при соответствии требуемому диаметру ствола. Например, диаметр ствола дерева равен 80 см, тогда диаметр отрезка корня должен быть 8 см, а его объем –  $3.14 \times 4^2 \times 20 = 1005$  (см<sup>3</sup>). Фактически измеренный объем эталонного корня  $V$ , например, равен 850 см<sup>3</sup>. В этом случае поправка на объем эталонного корня равна  $1005/850 = 1.18$ .

С учетом поправочных коэффициентов формулу (12) можно записать в виде

$$P_p = (I_p \cdot S_k \cdot l^2 \cdot A \cdot d \cdot V_0) / (I_k \cdot l_k \cdot 4 \cdot 1.015A \cdot V). \quad (13)$$

После преобразования (13) окончательный вид расчетной формулы:

$$P_p = (I_p \cdot P_k \cdot A \cdot V_0) / (I_k \cdot 0.16 \cdot 1.015A \cdot V). \quad (14)$$

При модификации (13) принята условная длина корней  $l = 1$  и  $l_k = 0.2$  м. Плотность эталонного отрезка корня  $d$  заменена согласно формуле  $d = P / V = P / (S_k \cdot l_k)$ . Таким образом, в формуле (14)  $P_p$  – общая масса корней, определяемая на основании электрометрических измерений, г;  $I_p$  – отсчет по микроамперметру для всей корневой системы дерева, мкА;  $I_k$  – отсчет по микроамперметру для эталонного отрезка корня, мкА;  $P_k$  – абсолютно сухая масса эталонного отрезка корня, г; 0.16 – постоянное число;  $A$  – возраст дерева; 1.015A – коэффициент пропорциональ-

ности;  $V_0$  – теоретический объем отрезка корня, диаметр сечения которого равен 1/10 толщины дерева, см<sup>3</sup>;  $V$  – фактический объем эталонного отрезка корня, определяемый в полевых условиях, см<sup>3</sup>.

**Проверка метода Б. И. Якушева.** В табл. 1 приведены результаты Б. И. Якушева (1988) по сопоставлению значений массы корней сосны, полученных электрометрическим методом по формуле (14) и путем раскопки и отмывки.

Для естественных насаждений данные А. А. Молчанова (1971), полученные методом раскопок для Европейской части России, сравнены с данными электрометрических измерений деревьев с аналогичными возрастом, высотой и диаметром в условиях Белоруссии.

Б. И. Якушев (1988) полагал, что различия в определении массы корней дерева двумя методами объясняются в большей мере неточностью метода раскопок (табл. 1), поэтому он рассчитал ошибку по отношению к данным электрометрических измерений, принимая их за истинные.

В 1981–1983 гг. в условиях степной зоны (Тургайский прогиб, Аман-Карагайский бор) были выполнены сравнительные исследования массы корневых систем сосны, определенной по методам И. С. Крепкого и Б. И. Якушева (Усольцев, Крепкий, 1984, 1994). Была принята первая версия метода Б. И. Якушева (1972), не предусматривающая введения поправочных коэффициентов, и расчет массы корней осуществлен по простому соотношению:

$$P_p = (I_p \cdot P_k) / I_k. \quad (15)$$

Исследования проведены в естественных сосняках и культурах в возрасте от 8 до 42 лет, произрастающих как на дерново-боровых, подстилаемых песками, так и на зональных темно-каштановых почвах, подстилаемых глинами и суглинками. Результаты сведены в табл. 2, в которой ошибки рассчитаны по отношению к данным раскопок.

Средние ошибки составили: случайная  $\pm 4.8$  %, систематическая  $+0.07$  %, ошибка для всех случаев 1.4 % (Усольцев, Крепкий, 1984).

Правда, сопоставление массы корневых систем деревьев дуба черешчатого в Винницкой области (Украина), определенной комплексным методом (раскопка, отмывка струей воды, взятие монолитов) и методом Б. И. Якушева (1972), показало наличие систематического 4.4%-го положительного смещения результатов второго по отношению к первому, а именно в возрасте 10, 15, 20, 25, 55 и 75 лет отклонения составили со-



**Таблица 1.** Сопоставление массы подземных органов сосны обыкновенной, полученной методом раскопок и электрометрическим в культурах и естественных насаждениях Белоруссии (Якушев, 1988)

Возраст, лет	Размещение растений, м	Диаметр ствола, см	Абсолютно сухая масса корней дерева (г), метод		Разница в определениях, г	Отклонение, %
			электрометрический	раскопок		
5	0.25 × 0.25	0.68	12.4	13.4	-1.0	-8.1
		0.66	7.0	7.2	-0.2	-2.8
		0.67	8.5	7.6	+0.9	+10.6
5	0.5 × 0.5	0.77	20.0	21.1	-1.1	-5.5
		0.75	22.7	24.2	-1.5	-6.6
		0.74	17.1	19.0	-1.9	-11.1
5	1.0 × 1.0	0.90	43.0	46.6	-3.6	-8.4
		1.00	71.6	70.2	+1.4	+1.9
		0.92	5.0	54.0	-4.0	-8.0
5	1.5 × 1.5	0.83	35.0	34.7	+0.3	+0.9
		0.76	23.9	23.8	-0.1	-0.4
		0.95	30.6	31.4	-0.8	-2.6
5	2.0 × 2.0	0.91	61.8	60.7	+1.1	+1.8
		0.90	42.2	12.6	-0.4	-0.9
		0.90	5.05	52.4	-1.9	-3.8
10	0.5 × 0.5	3.21	334	323	+11	+3.3
		2.92	210	199	+11	+5.2
		3.00	244	231	+13	+5.3
11	1.0 × 1.0	3.75	350	370	-20	-5.7
		4.03	451	470	-19	-4.2
		4.70	800	763	+17	+2.1
15	1.0 × 1.0	5.40	1200	1134	+66	+5.5
		5.85	1398	1304	+98	+7.0
		5.75	1130	1224	-94	-8.3
25	Естественные сосняки	9.9	3800	3982	-182	-4.8
50		20	16790	18500*	-1710	-10.2
120		40	66490	60300*	+6460	+9.7
200		50	83100	72500*	+10600	+12.8

\* По А. А. Молчанову (1971).

ответственно +5.0; +0.7; +5.6; +5.3; +6.3; +3.5 % (Guź, 1990). Возможная причина смещений – потеря части мелких корней в струе воды, поскольку положительные смещения имели место при использовании не только метода Б. И. Якушева (1972), но и метода регрессий – в среднем на +5.5 % (Guź, 1990).

Приведенные данные позволяют рекомендовать электрометрический метод для множественных определений массы подземных органов деревьев с приемлемой точностью. Можно отметить лишь два недостатка электрометрического метода. Во-первых, это невозможность учесть долю тонких корней в общей массе, определяющих продукционный потенциал расти-

тельного сообщества. Эта доля чрезвычайно изменчива и, как уже упоминалось выше, в сухих условиях достигает экстремально высоких значений (Усольцев, Крепкий, 1986; Усольцев, 1988) (табл. 3). Во-вторых, в сомкнутом насаждении корневые системы имеют свойство срастаться, и вода, элементы питания и даже грибковые инфекции перемещаются от одного дерева к другому (Laitakari, 1929; Kuntz, Riker, 1956; Ovington, Madgwick, 1959). Это свойство обнаружено у более 150 видов древесных растений (Крамер, Козловский, 1983). Доля сросшихся корневых систем может достигать в естественных сосняках 16 %, в 20-летних культурах сосны – 79 % (Макаренко, 1962), в 12-летних культурах дуба –

**Таблица 2.** Сопоставление массы подземных органов сосны обыкновенной, полученной методом раскопок и электрометрическим в культурах и естественных насаждениях Тургайского прогиба (Усольцев, Крепкий, 1984, 1986)

Возраст, лет	Происхождение	Почвы	Диаметр, см	Высота, м	Абсолютно сухая масса корней дерева (кг), метод		Разница в определениях, кг	Отклонение, %
					электрометрический	раскопок		
8	К	Д-б	3.03	2.53	1.97	1.90	+0.07	+3.7
8	К	Д-б	2.11	2.52	0.57	0.513	+0.057	+11.1
15	К	Т-к	4.54	4.74	2.59	2.38	+0.21	+8.8
20	Е	Д-б	3.55	3.60	1.31	1.45	-0.14	-9.6
20	Е	Д-б	3.05	3.00	0.83	0.82	+0.01	+1.2
20	Е	Д-б	2.35	3.00	0.64	0.59	+0.05	+8.5
20	Е	Д-б	3.15	2.70	0.96	0.95	+0.01	+1.0
22	Е	Д-б	1.25	3.53	0.112	0.089	+0.023	+25.8
22	Е	Д-б	2.07	4.31	0.160	0.198	-0.038	-19.2
22	Е	Д-б	4.39	6.72	1.207	1.189	+0.018	+1.5
22	Е	Д-б	3.03	6.20	0.595	0.536	+0.059	+11.0
22	Е	Д-б	4.96	5.81	1.324	1.279	+0.045	+3.5
22	Е	Д-б	1.19	3.10	0.078	0.070	+0.008	+11.4
22	Е	Д-б	2.59	5.72	0.513	0.525	-0.012	-2.3
22	К	Т-к	7.66	8.20	5.65	5.64	+0.01	+0.2
22	К	Т-к	9.85	9.10	12.70	12.64	+0.06	+0.5
23	К	Т-к	11.4	10.0	16.00	15.56	+0.44	+2.8
24	К	Т-к	8.95	10.4	10.45	10.39	+0.06	+0.6
26	К	Т-к	8.36	9.80	7.62	8.21	-0.59	-7.2
40	Е	Т-к	15.5	15.0	34.16	33.70	+0.46	+1.4
42	Е	Д-б	8.00	12.0	8.00	7.80	+0.20	+2.6
42	Е	Д-б	7.56	10.9	3.86	3.90	-0.04	-1.0

Примечание. К – культуры; Е – естественные сосняки. Почвы: Т-к – темно-каштановые, Д-б – дерново-боровые.

**Таблица 3.** Соотношение массы всех корней и тонкой их фракции, полученной методом раскопки и отмывки в культурах и естественных насаждениях сосны обыкновенной Тургайского прогиба (Усольцев, Крепкий, 1984, 1986)

Возраст, лет	Происхождение	Почвы	Диаметр, см	Высота, м	Абсолютно сухая масса хвои, кг	Абсолютно сухая масса корней, кг		Отношение массы тонких корней	
						общая	тонких, < 1мм	к общей массе	к массе хвои
8	К	Д-б	3.03	2.53	0.546	1.90	1.50	0.79	2.75
8	К	Д-б	2.11	2.52	0.260	0.513	0.406	0.79	1.56
15	К	Т-к	4.54	4.74	0.580	2.38	1.79	0.75	3.09
20	Е	Д-б	3.55	3.60	0.221	1.45	1.18	0.81	5.34
20	Е	Д-б	3.05	3.00	0.37	0.82	0.67	0.82	1.81
20	Е	Д-б	2.35	3.00	0.054	0.59	0.48	0.81	8.89
20	Е	Д-б	3.15	2.70	0.157	0.95	0.77	0.81	4.90
22	Е	Д-б	1.25	3.53	0.010	0.089	0.062	0.70	6.20
22	Е	Д-б	2.07	4.31	0.063	0.198	0.138	0.70	2.19
22	Е	Д-б	4.39	6.72	0.415	1.189	0.828	0.70	2.00
22	Е	Д-б	3.03	6.20	0.167	0.536	0.374	0.70	2.24
22	Е	Д-б	4.96	5.81	0.425	1.279	0.891	0.70	2.10
22	Е	Д-б	1.19	3.10	0.029	0.070	0.049	0.70	1.69
22	Е	Д-б	2.59	5.72	0.103	0.525	0.366	0.70	3.55
22	К	Т-к	7.66	8.20	1.41	5.64	4.07	0.72	2.89
22	К	Т-к	9.85	9.10	2.37	12.64	9.31	0.74	3.93
23	К	Т-к	11.4	10.0	2.16	15.56	6.89	0.44	3.19
24	К	Т-к	8.95	10.4	1.82	10.39	8.18	0.79	4.49
26	К	Т-к	8.36	9.80	0.676	8.21	5.31	0.65	7.85
42	Е	Д-б	8.00	12.0	0.569	7.80	4.65	0.60	8.17
42	Е	Д-б	7.56	10.9	0.470	3.90	2.33	0.60	4.96
40	Е	Т-к	15.5	15.0	2.67	33.70	22.33	0.66	8.36

Примечание. К – культуры; Е – естественные сосняки. Почвы: Т-к – темно-каштановые, Д-б – дерново-боровые.

75 %, в 19-летних культурах березы – 80 % и в 14-летних культурах ясеня – 95 % (Савельева, 1969). В таких случаях масса корней, полученная электрометрическим методом, может быть существенно завышена.

Последний недостаток, в отличие от первого из упомянутых, в принципе устраним: достаточно по данным 10–20 замеров массы корней деревьев разного размера установить зависимость  $I_p$  от диаметра ствола и представить ее в виде графика. С учетом высокой точности оценки массы корней деревьев, не сросшихся корнями, эта зависимость должна быть довольно тесной, и факт срастания легко установить по отсчету на приборе, значительно «выскакивающему» относительно графика. Соответственно в качестве модельных могут быть взяты лишь деревья, отсчеты по прибору которых находятся вблизи значений теоретической линии графика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов биомассы необходимо знать закономерности динамики не только количественных, но и качественных их характеристик, прежде всего плотности древесины растущих деревьев как их ключевой экологической характеристики. Поскольку получение квалиметрических характеристик деревьев довольно трудоемко, наши знания об их изменении недостаточны, а специфика растущего дерева как объекта изучения определяет необходимость применения неразрушающих методов оценки, особенно в селекционных программах, требующих большого количества измерений.

Наибольшее распространение получили методы неразрушающего контроля растущих деревьев, сочетающие достаточную простоту процедуры и необходимую точность проводимых измерений, основанные на применении пилондин-тестера, резистометра, ригидометра, акустических устройств, радиационные методы и ближняя инфракрасная или NIR-спектроскопия.

Пилондин-метод как один из наиболее простых и доступных, востребован в селекционных программах, однако отбор по показателю плотности, получаемому пилондин-тестером, оказался эффективным не для всех древесных видов, а изменчивость плотности, объясняемая этим методом, варьирует от 27 до 92 %. Квалиметрия методом сопротивления бурению древесины на базе резистографа как более чувствительно-

го прибора по сравнению с пилондин-тестером также нашла широкое применение в селекционных программах, но оба метода основаны на локальном зондировании, и его экстраполяция на всё дерево дает смещения оценок. Применение ригидометр-конструкции, подвергающей усилию изгиба ствол дерева целиком с целью определения модуля упругости и связанной с ним плотности древесины, лишено недостатка, присущего двум вышеупомянутым методам. Но метод оказался сравнительно трудоемким для выполнения множественных замеров при реализации селекционных программ, а плотность древесины объясняется экспериментально установленным модулем упругости на уровне 46 %. Акустические методы оценки модуля упругости и плотности древесины, основанные на измерении скорости прохождения звука сквозь нее, позволяют зондировать ствол в продольном и поперечном направлении и довольно чувствительны к наличию пороков древесины, и варьирование плотности древесины объясняется скоростью распространения звука в ней в большинстве случаев на уровне 26–76 %. Метод позволяет снять противоречие целевых установок селекции, направленных одновременно на повышение скорости роста и плотности древесины. Радиационные методы требуют применения дорогого оборудования и успешно регистрируют внутрикольцевую плотность, тогда как в большинстве случаев предпочтительна информация об общей плотности древесины ствола. Преимущество NIR-спектроскопии перед всеми остальными методами состоит в возможности оценивать химический состав древесины и выход целлюлозы, но она не дает прямой оценки и требует специальной калибровки.

Таким образом, любая техника имеет свои ограничения, важно уметь выбрать наиболее пригодную для того или иного метода неразрушающего контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. О квалиметрии. М.: Изд. стандартов, 1973. 172 с.
- Алметов А. Н. Приростной безвинтовой бурав для извлечения кернов из растущих деревьев // Молодежь и охрана природы: Материалы республиканской научно-практической конференции. Йошкар-Ола, 1999. С. 86–87.
- Алметов А. Н. Совершенствование конструкции бурава для извлечения кернов древесины из растущих деревьев различных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 24 с.

- Берлинер М. А.* Измерения влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с.
- Букач О. В., Мякинкова Л. Л.* Микробные топливные элементы: состояние исследований и практическое применение (обзор) // *Инноватика и экспертиза*. 2014. Вып. 2 (13). С. 51–59.
- Воейкова Т. А., Емельянова Л. К., Новикова Л. М., Шакулов Р. С., Сидорук К. В., Смирнов И. А., Ильин В. К., Солдатов П. Е., Тюрин-Кузьмин А. Ю., Смоленская Т. С., Дебабов В. Г.* Интенсификация процесса получения биоэлектричества в микробных топливных элементах при использовании мутантов *Shewanella oneidensis* MR-1 с повышенной редуцирующей активностью // *Микробиология*. 2013. Т. 82. Вып. 4. С. 402–407.
- ГОСТ 16483.7-71.* Древесина. Методы определения влажности; введение 1973-01-01. М.: Стандартиформ, 2006. 4 с.
- ГОСТ 18353-79.* Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов; введен 1980-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1987. 12 с.
- ГОСТ 23829-85.* Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения; введен 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 16 с.
- ГОСТ 26266-90.* Преобразователи ультразвуковые; введение 1991-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1998. 16 с.
- Гурвич А. Г.* Теория биологического поля. М.: Сов. наука, 1944. 155 с.
- Дебабов В. Г.* Микробный электросинтез // *Биотехнология*. 2017. Т. 33. № 3. С. 9–28.
- Еремин А. Л.* К анализу моделей объединения и появления новой информации в интеллектуальных системах // *Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий*. Краснодар: ЦНТИ, 2016. С. 17–27.
- Ермолов И. Н., Ермолов М. Н.* Ультразвуковой контроль. М.: Эхо-Импульс, 2006. 208 с.
- Зарудный И. Н.* Биоэлектрический потенциал как метод определения жизнеспособности подроста древесных пород // *Науч. тр. ЛЛТА*. 1970. № 127. С. 35–41.
- Исаева Л. Н.* Влажность древесины растущих деревьев в различных районах произрастания // *Древесина и древесные материалы*. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1974. С. 18–28.
- Каневский И. Н., Сальникова Е. Н.* Неразрушающие методы контроля. Владивосток: ДВГТУ, 2007. 243 с.
- Карасев В. Н.* Физиология растений. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 304 с.
- Карасев В. Н., Карасева М. А.* Температурный режим деревьев сосны обыкновенной, поврежденных пожаром // *Материалы научной конференции по итогам научно-исследовательских работ МарПИ за 1974 г. Секц.: лесн. хоз-во*. Йошкар-Ола: МарПИ, 1975. С. 21–24.
- Карасев В. Н., Карасева М. А.* Эколого-физиологическая диагностика жизнеспособности деревьев хвойных пород // *ИВУЗ. Лесн. журн*. 2004. № 4. С. 28–33.
- Кирлиан В. Х., Кирлиан С. Д.* В мире чудесных разрядов. М.: Знание, 1964. 41 с.
- Колесникова А. А., Мазуркин П. М.* Изменение свойств древесины ели по радиусу ствола // *Деревообр. пром-сть*. 1997. № 5. С. 23–25.
- Коловский Р. А.* Биоэлектрические потенциалы древесных растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 176 с.
- Краммер П. Д., Козловский Т. Т.* Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 462 с.
- Кулешова Т. Э., Бушлякова А. В., Галль Н. Р.* Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений // *Письма в журн. тех. физ.* 2019. Т. 45. Вып. 5. С. 6–8.
- Курило Ю. А., Григорьев А. И.* Изучение электрического сопротивления древесных растений в условиях нефтяного загрязнения почвы (на примере березы повислой) // *Совр. пробл. науки и образов.* 2015. № 3. С. 1–8.
- Курило Ю. А., Григорьев А. И.* Применение электрометрического метода для диагностики влияния нефтешлама на жизнедеятельность березы повислой // *Лесоведение*. 2019. № 4. С. 304–310.
- Лавров М. Ф.* Совершенствование метода оценки качества древесины лиственницы, произрастающей в климатических условиях Якутии: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.21.05. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 15 с.
- Ланге Ю. В.* Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
- Ланге Ю. В., Воронков В. А.* Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения: Справочник. М.: Авт. изд., 2003. 120 с.
- Лехницкий С. Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
- Макаренко А. А.* Срастание корневых систем сосны в сухих борах Северного Казахстана // *Агробиология*. 1962. № 6. С. 623–624.
- Манкузо С., Виола А.* О чем думают растения: тайная жизнь, скрытая от посторонних глаз. М.: Эксмо, 2019. 208 с.
- Марченко И. С.* Биополе лесных экосистем. Брянск: Придесенье, 1995. 188 с.
- Медведев С. С.* Электрофизиология растений. СПб.: СПбГУ, 1997. 122 с.
- Мелехов В. И., Бабич Н. А., Корчагов С. А.* Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: АГТУ, 2003. 110 с.
- Молчанов А. А.* Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.
- Никшинов В. Д.* Исследование механических свойств древесины неразрушающими методами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. М.: МЛТИ, 1966. 24 с.
- Перельгин Л. М.* Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 318 с.
- Полубояринов О. И.* Влияние лесохозяйственных мероприятий на качество древесины. Л.: ЛЛТА, 1974. 96 с.
- Полубояринов О. И.* Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976а. 160 с.
- Полубояринов О. И.* Квалиметрия древесного сырья в процессе лесовыращивания: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Л.: ЛЛТА, 1976б.
- Полубояринов О. И., Некрасова Г. Н., Фёдоров Р. Б.* О взаимосвязи влажности и плотности древесины растущих деревьев // *ИВУЗ. Лесн. журн*. 1982. № 2. С. 7–11.
- Радж Б., Радженоран В., Паланиччи П.* Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 576 с.
- Рахтеенко И. Н.* Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений. Минск: АН БССР, 1963. 254 с.

- Роне В. М. Изменчивость плотности древесины и длины трахеид в потомстве ели обыкновенной // Лесоведение. 1970. № 5. С. 78–82.
- Савельева Л. С. Срастание корневых систем древесных пород. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 72 с.
- Симоненко А. А. Методы и средства таможенного контроля плотности древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. СПб.: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2014. 20 с.
- Уголев Б. Н. Испытания древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 251 с.
- Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 253 с.
- Усольцев В. А., Крепкий И. С. Закономерности соотношений надземной и подземной фитомассы в сосняках Кустанайской области // Вестн. с.-х. науки Казахстана. 1984. № 3. С. 73–79.
- Усольцев В. А., Крепкий И. С. Соотношения надземных и подземных фракций фитомассы у сосны Аман-Карагайского бора // Лесовосстановление в Казахстане. Алма-Ата: Кайнар, 1986. С. 191–199.
- Усольцев В. А., Крепкий И. С. Регрессионный анализ вертикальнофракционного распределения массы корней в сосняках Аман-Карагайского бора // Экология. 1994. № 2. С. 21–33.
- Успенский В. В. Изменчивость плотности древесины сосны и ее значение в весовой таксации // ИВУЗ. Лесн. журн. 1980. № 6. С. 9–12.
- Федюков В. И. Научные основы всеобщего обеспечения качества и сертификации лесоматериалов спецназначения: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 08.00.20. М.: Всерос. НИИ сертиф., 1998. 39 с.
- Федюков В. И., Салдаева Е. Ю., Цветкова Е. М. Комплексная оценка технического качества древесины на корню // Лесн. вестн. 2016. № 4. С. 48–51.
- Ходоров Б. И. Проблема возбудимости. Л.: Медицина, 1969. 302 с.
- Шарапов Е. С., Чернов В. Ю. Сравнительный анализ способов определения плотности древесины с помощью рентгеновского излучения и устройства для измерения сопротивления сверлению // Лесн. вестн. 2014. № 2. С. 89–95.
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КГУ, 2000. 80 с.
- Якушев Б. И. Электрометрический способ оценки массы подземных органов растений // Докл. АН БССР. 1972. Т. 16. № 9. С. 848–850.
- Якушев Б. И. Исследование растений и почв: эколого-физиологические методы. Минск: Наука и техника, 1988. 69 с.
- Achim A., Paradis N., Salenikovich A., Power H. Using acoustic tools to improve the efficiency of the forestry wood chain in eastern Canada // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products, 4–7 May 2010, Edinburgh. The Final Conf. COST Action E53, 2010. 10 p.
- Achim A., Paradis N., Carter P., Hernández R. E. Using acoustic sensors to improve the efficiency of the forest value chain in Canada: A case study with laminated veneer lumber // Sensors. 2011. V. 11. Iss. 6. P. 5716–5728.
- Acuna M., Murphy G. Geospatial and within tree variation of wood density and spiral grain in Douglas fir // For. Prod. J. 2006. V. 56. N. 4. P. 81–85.
- Adams T., Aitken S., Balduman L., Schermann N. Pilodyn repeatability study, in Pacific Northwest // Tree Improvement Res. Coop. Ann. Rep., 1992–1993. Corvallis, OR: Oregon St. Univ., 1993. P. 29–35.
- Aguiar A., Almeida M. H., Borralho N. Genetic control of growth, wood density and stem characteristics of *Pinus pinaster* in Portugal // Silva Lusitana. 2003. V. 11. Iss. 2. P. 131–139.
- Aichholzer A., Schuberth C., Mayer H., Arthaber H. Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz // Eur. J. Wood Prod. 2018. V. 76. P. 89–103.
- Al Hagrey S. A. Geophysical imaging of root-zone, tree trunk, and moisture heterogeneity // J. Exp. Bot. 2007. V. 58. Iss. 4. P. 839–854.
- Allison R. B. Development of bioacoustic nondestructive testing instruments for early detection of bark beetle infestation // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 264–269.
- Amishev D., Murphy G. In-forest assessment of veneer grade Douglas fir logs based on acoustic measurement of wood stiffness // For. Prod. J. 2008. V. 58. N. 11. P. 42–47.
- Andrews M. K. Wood quality measurement – *son et lumiere* // N. Z. J. For. 2002. V. 47. P. 19–21.
- Andrews M. K. Which acoustic speed? // Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp. Nondestructive Testing of Wood / F. C. Beall (Ed.). Madison, Wisconsin: For. Prod. Soc., 2003. P. 159–165.
- Apiolaza L. A. Very early selection for solid wood quality: Screening for early winners // Ann. For. Sci. 2009. V. 66. P. 601.
- Armstrong J. P., Skaar C., de Zeeuw C. The effect of specific gravity on several mechanical properties of some world woods // Wood Sci. Tech. 1984. V. 18. N. 2. P. 137–146.
- Aslezaeim N. Effect of cultural intensity and planting density on wood properties of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). PhD thesis. Mississippi St. Univ., 2016. 160 p.
- Auty D., Achim A. The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands // Forestry. 2008. V. 81. Iss. 4. P. 475–487.
- Baar J., Tippner J., Gryc V. The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method // Eur. J. Wood Prod. 2012. V. 70. N. 5. P. 767–769.
- Baquir M., Naqvi K. H., Paras A., Malik D., Paras A. A Step towards soil and wastewater treatment along with green power generation using plant microbial fuel cell: A mini review // J. Emerg. Technol. Innov. Res. 2019. V. 6. Iss. 6. P. 32–34.
- Bieker D., Rust S. Electric resistivity tomography shows radial variation of electrolytes in *Quercus robur* // Can. J. For. Res. 2010. V. 40. N. 6. P. 1189–1193.
- Blakemore P. The use of hand-held electrical moisture meters with commercially important Australian hardwoods. Part 1: Executive summary, methods, results, conclusion

- & recommendations. Forest & Wood Prod. Res. & Develop. Corp., 2003. 89 p.
- Böhm W.* Methods of studying root systems. New York: Springer Verlag, 1979. 188 p.
- Bolte A., Hertel D., Ammer Ch., Schmid I., Nörr R., Kuhr M., Redde N.* Freilandmethoden zur Untersuchung von Baumwurzeln // Forstarchiv. 2003. Bd. 74. S. 240–262.
- Bouffier L., Charlot C., Raffin A., Rozenberg P., Kremer A.* Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? // Ann. For. Sci. 2008. V. 65. Iss. 1. P. 106.
- Brazeo N. J., Marra R. E., Göcke L., Van Wassenaeer P.* Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography // Forestry. 2011. V. 84. Iss. 1. P. 33–39.
- Brazier J. D., Mobbs I. D.* The influence of planting distance on structural wood yields of unthinned Sitka spruce // Forestry. 1993. V. 66. Iss. 4. P. 333–352.
- Bucur V.* Acoustics of wood. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer-Verlag, 2006. 393 p.
- Bucur V., Feeney F.* Attenuation of ultrasound in solid wood // Ultrasonics. 1992. V. 30. N. 2. P. 76–81.
- Butler M. A., Dahlen J., Eberhardt T. L., Montes C., Antony F., Daniels R. F.* Acoustic evaluation of loblolly pine tree and lumber-length logs allows for segregation of lumber modulus of elasticity, not for modulus of rupture // Ann. For. Sci. 2017. V. 74. Iss. 1. Article number 20. 15 p.
- Butnor J. R., Doolittle J. A., Kress L., Cohen S., Johnsen K. H.* Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // Tree Physiol. 2001. V. 21. Iss. 17. P. 1269–1278.
- Calderón L.* Estudio sobre la influencia del contenido de humedad de la madera en ensayos no destructivos para *Pinus nigra* Arn., *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L. // Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E. U. I. T. Forestal (UPM). Madrid, 2012. 109 p.
- Carter P.* Acoustic technology – enhanced tools for research and operations // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 58–70.
- Cavalcanti N. M. O., Bertoldo C., Ferreira J. P. O., Gonçalves R.* Physical and mechanical characterization of roots // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 252–256.
- Ceraldi C., Mormone V., Ermolli E. R.* Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics // Mater. Struct. 2001. V. 34. P. 59–64.
- Chan J. M., Walker J. C., Raymond C. A.* Effects of moisture content and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiata pine sapwood boards // Wood Sci. Technol. 2011. V. 45. Iss. 4. P. 609–626.
- Chantre G., Rozenberg P.* Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within-profile and within-ring density parameters in Douglas-fir wood? // Proc. CTIA – IUFRO Int. wood quality workshop: timber management toward wood quality and end-product value / S. Y. Zhang, R. Gosselin, G. Charet (Eds.). Sainte-Foy, Quebec, Canada: Forintek Canada Corp., 1997. P. 41–47.
- Chantre G., Sutter-Barrot E., Gouma R., Bouvet A.* De l'intérêt de l'utilisation du Pilodyn dans l'étude de la qualité du bois: application à l'épicéa commun et à l'épicéa de Sitka // Ann. Res. For. AFOCEL, 1992. P. 145–177.
- Charette P., Lu P., Tang F., Zhang S. Y.* Evaluation of the resistograph for wood density estimate and the use of multi-trait selection index for genetic selection in jack pine // Proc. 31<sup>st</sup> Meeting Can. For. Gen. Ass.: Adaptation and Conservation in the Era of Forest Tree Genomics and Environmental Change, Quebec City, Quebec, 25–28 August 2008 / J. D. Simpson (Ed.). Fredericton, N.B.: Nat. Res. Canada, Can. For. Serv., 2008. P. 1–88.
- Chauhan S., Walker J., Chauhan S.* Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine // For. Ecol. Manag. 2006. V. 229. Iss. 1–3. P. 388–394.
- Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M. A., Chambers J. Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.-P., Nelson B., Ogawa H., Puig H., Riéra B., Yamakura T.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // Oecologia. 2005. V. 145. Iss. 1. P. 87–99.
- Chen Z.-Q., Karlsson B., Lundqvist S.-O., Gil M. R. G., Olsson L., Wu H. X.* Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce // Ann. For. Sci. 2015. V. 72. Iss. 4. P. 499–508.
- Cherelli S., Ballarin A.* Nonconventional approach to evaluate the quality of heartwood and sapwood // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 517.
- Chloupek O.* The relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots // Biol. Plant. 1972. V. 14. N. 3. P. 227–230.
- Chloupek O.* Die Bewertung des Wurzelsystems von Senfpflanzen auf Grund der dielektrischen Eigenschaften und mit Rücksicht auf den Endertrag // Biol. Plant. 1976. V. 18. N. 1. P. 44–49.
- Chloupek O.* Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance // Plant and Soil. 1977. V. 48. N. 2. P. 525–532.
- Cockrell R. A.* A study of the screw-holding properties of wood // Bull. New York St. Coll. For. Syracuse. N. 44. N. Y. Tech. Publ., 1933. 27 p.
- Costa C. P., Gonçalves R., Bertoldo C., Cavalcanti N. M. O., Reis M. N., Garcia G. H.* Comparison among velocity of ultrasound wave propagation in roots, branches and stem // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 520–524.
- Cown D. J.* Comparison of the Pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees // N. Z. J. For. Sci. 1978. V. 8. N. 3. P. 384–391.
- Cown D. J.* Use of the Pilodyn wood tester for estimating wood density in standing trees. Influence of site and tree age // N. Z. For. Serv., For. Res. Inst. 1982. V. 13. 9 p.
- Dahlen J., Diaz I., Schimleck L., Jones P. D.* Near-infrared spectroscopy prediction of southern pine No. 2 lumber

- physical and mechanical properties // Wood Sci. Technol. 2017. V. 51. P. 309–322.
- Dahmen S., Ketata H., Ben Ghazlen M. H., Hosten B. Elastic constants measurement of anisotropic olive wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave // Ultrasonics. 2010. V. 50. N. 4. P. 502–507.
- Davidson R. W. Effect of temperature on the resistance of wood // For. Prod. J. 1958. V. 8. N. 5. P. 160.
- De Palma A., Pareti G. Between radical change and conservation: the investigation of bioelectric phenomena in Germany in the late nineteenth century // Nuncius. 2010. V. 25. Iss. 1. P. 69–100.
- Divos E., Szalai L. Tree evaluation by acoustic tomography // Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp. Nondestructive Testing of Wood, 19–21 Aug. 2002, Berkeley, CA, 2002. P. 251–256.
- Dobbertin M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review // Europ. J. For. Res. 2005. V. 124. Iss. 4. P. 319–333.
- Donegan E., Sola G., Cheng Z., Birigazzi L., Gamarra J. G.-P., Henry M., Vieilledent G., Chiti T. GlobAllomeTree's wood density database // FAO UNO Tech. Rep. Rome, Italy, 2014. 29 p.
- Dündar T., Akkılıç H., Büyüksarı Ü. Effects of the clone differences and initial plant density on the acoustic measurements in hybrid poplar trees // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 386–394.
- Eckard J. T. Rapid screening for solid wood quality traits in clones of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) by indirect measurements. MSc Thesis, North Carolina St. Univ., Raleigh, NC, USA, 2007. 153 p.
- Eckard J. T., Isik F., Bullock B., Li B., Gumpertz M. Selection efficiency for solid wood traits in *Pinus taeda* using time-of-flight acoustic and micro-drill resistance methods // For. Sci. 2010. V. 56. Iss. 3. P. 233–241.
- El-Hadad A., Brodie G. I., Ahmed B. S. The effect of wood condition on sound wave propagation // Open J. Acoustics. 2018. V. 8. N. 3. P. 37–51.
- Essien C., Cheng Q., Via B. K., Loewenstein E. F., Wang X. An acoustics operations study for loblolly pine (*Pinus taeda*) standing saw timber with different thinning history // Bioresources. 2016. V. 11. Iss. 3. P. 7512–7521.
- Essien C., Via B., Gallagher T., McDonald T., Eckhardt L. G. Applying discriminant analysis and acoustic tool to assign loblolly pine families into susceptibility classes // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 504–511.
- Evans R., Ilic J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density // For. Prod. J. 2001. V. 51. Iss. 3. P. 53–57.
- Farrell R., Innes, T., Nolan G. Sorting plantation *Eucalyptus nitens* logs with acoustic wave velocity. Project No PN07.3018. Victoria, Australia: For. Wood Prod. Austral. Ltd., 2008. 27 p.
- Fernández J. E., Cuevas M. V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review // Agr. For. Meteorol. 2010. V. 150. Iss. 2. P. 135–151.
- Forsén H., Tarvainen V. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. Espoo, Tech. Res. Centre Finland, VTT Publ., 2000. V. 420. 79 p.
- Fromm J., Lautner S. Electrical signals and their physiological significance in plants // Plant Cell Environ. 2007. V. 30. N. 3. P. 249–257.
- Fukatsu E., Tamura A., Takahashi M., Fukuda Y., Nakada R., Kubota M., Kurinobu S. Efficiency of the indirect selection and the evaluation of the genotype by environment interaction using Pilodyn for the genetic improvement of wood density in *Cryptomeria japonica* // J. For. Res. 2011. V. 16. Iss. 2. P. 128–135.
- Fundova I. In situ wood quality assessment in interior spruce. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MSc in the Faculty of graduate studies (Forestry). The University of British Columbia, Vancouver, 2012. 80 p.
- Fundova I., Funda T., Wu H. X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn // PLoSONE. 2018. V. 13. N. 9. Article number 204518.
- Gagliano M., Mancuso S., Robert D. Towards understanding plant bioacoustics // Trends Plant Sci. 2012. V. 17. N. 6. P. 323–325.
- Gantz C. H. Evaluating efficiency of the Resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species. MSc Thesis, North Carolina St. Univ., 2002. 78 p.
- Gao S., Wang X., Wiemann M. C., Brashaw B. K., Ross R. J., Wang L. A critical analysis of methods for rapid and non-destructive determination of wood density in standing trees // Ann. For. Sci. 2017. V. 74. Iss. 2. Article number 27.
- Gapare W. J., Baltunis B. S., Ivković M., Wu H. X. Genetic correlations among juvenile wood quality and growth traits and implications for selection strategy in *Pinus radiata* D. Don. // Ann. For. Sci. 2009. V. 66. N. 6. P. 606–606.
- Garcia G., Gonçalves R., Ruy M., Lorensani R. G. M. Acoustic characterization of wood from tree branches // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 513.
- Garzon P. C., Keijzer F. Plants: Adaptive behavior, root-brains and minimal cognition // Adaptive Behavior. 2011. V. 19. Iss. 3. P. 155–171.
- Gibert L., Scott G., Ferràndez-Cañadell C. Evaluation of the Olduvai subchron in the Orce ravine (SE Spain). Implications for Plio-Pleistocene mammal biostratigraphy and the age of Orce archeological sites // Quatern. Sci. Rev. 2006. V. 25. Iss. 5–6. P. 507–525.
- Gillis C. M., Stephens W. C., Peralta P. N. Moisture meter correction factors for four Brazilian wood species // For. Prod. J. 2001. V. 51. Iss. 4. P. 83–86.
- Glass S. V., Zelinka S. L. Moisture relations and physical properties of wood // Wood handbook: wood as an engineering material. Chapter 4. Centennial Ed. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2010. P. 4.1–4.19.
- Gonçalves R., Batista F. A. F., Lorensani R. G. M. Selecting eucalyptus clones using ultrasound test on standing trees // For. Prod. J. 2013. V. 63. Iss. 3–4. P. 112–118.

- Gora E. M., Yanoviak S. P. Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines // *Can. J. For. Res.* 2015. V. 45. N. 3. P. 236–245.
- Görlacher R. Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein «in situ»-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte // *Holz als Roh- und Werkstoff.* 1987. V. 45. P. 273–278.
- Görlacher R., Hättich R. Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrwiderstandsmessung // *Bauen mit Holz.* 1990. V. 92. P. 455–459.
- Gough G., Barnes R. D. A comparison of three methods of wood density assessment in a *Pinus elliottii* progeny test // *South Afr. For. J.* 1984. V. 128. N. 1. P. 22–25.
- Grabianowski M., Manley B., Walker J. C. F. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber // *Wood Sci. Technol.* 2006. V. 40. Iss. 3. P. 205–216.
- Grammel R. Zusammenhänge zwischen Wachstumsbedingungen und holztechnologischen Eigenschaften der Fichte // *Forstwissenschaftliches Centralblatt.* 1990. V. 109. P. 119–129.
- Greaves B. L., Borralho N. M. G., Raymond C. A., Farrington A. Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens* // *Can. J. For. Res.* 1996. V. 26. N. 9. P. 1643–1650.
- Guź M. M. Kompleksowa metoda badań systemów korzeniowych roślin drzewiastych // *Acta Agr. Silv. Ser. Silv.* 1990. V. 29. P. 17–29.
- Gwaze D., Stevenson A. Genetic variation of wood density and its relationship with drill resistance in shortleaf pine // *South J. Appl. For.* 2008. V. 32. Iss. 3. P. 130–133.
- Hanhijärvi A., Ranta-Maunus A. Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Rep. Combigrade-project – Phase 2. Tech. Rep. VTT Publ. 686, VTT Tech. Res. Centre Finland, Vuorimiehentie, Finland, 2008. 55 p.
- Hannrup B., Cahalan C., Chantre G., Grabner M., Karlsson B., Bayon I. L., Jones G. L., Müller U., Pereira H., Rodrigues J. C., Rosner S., Rozenberg P., Wilhelmsson L., Wimmer R. Genetic parameters of growth and wood quality traits in *Picea abies* // *Scand. J. For. Res.* 2004. V. 19. Iss. 1. P. 14–29.
- Hans G., Redman D., Leblon B., Nader J., La Rocque A. Determination of log moisture content using early-time ground penetrating radar signal // *Wood Mater. Sci. Eng.* 2015. V. 10. Iss. 1. P. 112–129.
- Hansen C. P. Application of the Pilodyn in forest tree improvement. DFSC Ser. Tech. Notes. TN 55. Danida For. Seed Centre, Humlebaek, Denmark, 2000. 11 p.
- Hapla F. Radiographisch-densitometrische Holzeigenschaftsuntersuchungen an Douglasien aus unterschiedlich durchforsteten Versuchsflächen // *Holz als Roh- und Werkstoff.* 1985. V. 43. P. 9–15.
- Hasegawa M., Takata M., Matsumura J., Oda K. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood // *Ultrasonics.* 2011. V. 51. N. 3. P. 296–302.
- Hassan K. T., Horaacek P., Tippner J. Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques // *BioRes.* 2013. V. 8. Iss. 2. P. 1634–1645.
- Hayes M., Chen J. A portable stress wave measurement system for timber inspection // *Proc. Electronics Conf. (EN-ZCON).* Hamilton, N. Z., 2003. P. 1–6.
- Herman M., Dutilleul P., Avella-Shaw T. Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density, and mean tracheid length in norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Wood Fiber Sci.* 1998. V. 30. Iss. 1. P. 6–17.
- Hoffmeyer P. The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood // *Proc. 4th Symp. Non-Destructive Testing of Wood.* Pullman, Washington, USA, 1978. P. 47–66.
- Hong Z., Fries A., Lundqvist S.-O., Gull B. A., Wu H. X. Measuring stiffness using acoustic tool for Scots pine breeding selection // *Scand. J. For. Res.* 2015. V. 30. Iss. 4. P. 363–372.
- Hruska L., Čermak J., Šustek S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar // *Tree Physiol.* 1999. V. 19. Iss. 2. P. 125–130.
- Huang C.-L., Lindstrom H., Nakada R., Ralston J. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics – a selective review // *Holz Roh-Werkst.* 2003. V. 61. N. 5. P. 321–335.
- Ikedo K., Arima T. Quality evaluation of standing trees by a stress-wave propagation method and its application II. Evaluation of sugi stands and application to production of sugi structural square sawn timber // *Mokuzai Gakaishi.* 2000. V. 46. P. 189–196.
- Ikedo K., Suzuki Y., Sugiyama A., Hoshikawa T. Estimation of the moisture content of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) large diameter logs by measuring relative permittivity and phase attenuation of low frequency (52 Mhz) electromagnetic wave // *Proc. 20th Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249.* Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 496–503.
- Ishiguri F., Matsui R., Iizuka K., Yokota S., Yoshizawa N. Prediction of the mechanical properties of lumber by stress-wave velocity and Pilodyn penetration of 36-year-old Japanese larch trees // *Holz Roh. Werkst.* 2008. V. 66. Iss. 4. P. 275–280.
- Isik F., Li B. Rapid assessment of wood density of live trees using Resistograph for selection in tree improvement programs // *Can. J. For. Res.* 2003. V. 33. N. 12. P. 2426–2435.
- Ivković M., Wu H. X., McRae T. A., Powell M. B. Developing breeding objectives for radiata pine structural wood production. I. Bioeconomic model and economic weights // *Can. J. For. Res.* 2006. V. 36. N. 11. P. 2920–2931.
- James W. L. Effect of temperature on readings of electric moisture meters // *For. Prod. J.* 1968. V. 18. N. 10. P. 23–31.
- James W. L. Electric moisture meters for wood. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-6. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 1988. 17 p.
- James W. L., Yen Y.-H., King R. J. A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle of wood // *Res. Note FPL-0250,* 1985. P. 1–9.
- Jeon E., Choi S., Yeo K.-H., Park K. S., Rathod M. L., Lee J. Development of electrical conductivity measurement technology for key plant physiological information using microneedle sensor // *J. Micromech. Microeng.* 2017. V. 27. N. 8. Article number 085009.
- Jessome A. P. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Sainte-Foy, QC, Canada: Forintek Canada Corp., 2000. 27 p.
- Johansson J., Hagman O., Fjellner B.-A. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by micro-



- wave scanning of sawn timber // *J. Wood Sci.* 2003. V. 49. Iss. 4. P. 312–316.
- Jung D.-H., Park S. H., Han X. Z., Kim H.-J. Image processing methods for measurement of lettuce fresh weight // *J. Biosyst. Eng.* 2015. V. 40. Iss. 1. P. 89–93.
- Kettunen P. O. Wood structure and properties. Zurich, Switzerland: Trans. Tech. Publ. Ltd., Stäfa: 2006. 401 p.
- Kimberley M. O., Cown D. J., McKinley R. B., Moore J. R., Dowling L. J. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine // *N. Z. J. For. Sci.* 2015. V. 45. Iss. 1. Article number 22.
- Kimberley M., McKinley R., Cown D., Moore J. Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir // *N. Z. J. For. Sci.* 2017. V. 47. Iss. 1. Article number 15.
- King J. N., Yeh F. C., Heaman J. C., Dancik B. P. Selection of wood density and diameter in controlled crosses of coastal Douglas-fir // *Silvae Genet.* 1988. V. 37. P. 152–157.
- King R. J., Yen Y. H. Probing amplitude, phase, and polarization of microwave field distributions in real time // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech. MTT.* 1981. V. 29. P. 1225–1231.
- Kloiber M., Kotlíňová M., Tippner J. Estimation of wood properties using pin pushing in method with various shapes of the penetration pin // *Acta Univ. Agr. Silv. Mendelianae Brun.* 2009. V. 57. N. 2. P. 53–60.
- Koizumi A. Studies on the estimation of the mechanical properties of standing trees by non-destructive bending test // *Bull. Coll. Exp. For., Fac. Agr., Hokkaido Univ.* 1987. V. 44. N. 4. P. 1329–1415.
- Kollmann F. F. P., Côté W. A. Solid wood. Berlin: Springer, 1984. 592 p.
- Koppán A., Szarka L., Wesztergom V. Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree // *Compt. Rendus Acad. Sci.* 2000. V. 323. N. 6. P. 559–563.
- Korell U., Blofeld O. Die Anwendung radiometrischer Methoden für Dichte- und Feuchtemessungen an Hackschnitzeln // *Wissenschaftliche Tagung der Sektion Forstwirtschaft vom 16. Okt. bis 18. Okt. 1978. Vorträge III.* Tech. Univ. Dresden, 1978. P. 109–116.
- Kothiyal V., Raturi A. Estimating mechanical properties and specific gravity for five-year-old *Eucalyptus tereticornis* having broad moisture content range by NIR spectroscopy // *Holzforschung.* 2011. V. 65. N. 5. P. 757–762.
- Krajnc L. The influence of silvicultural practices on mechanical properties of softwood timber. Thesis submitted to the Nat. Univ. Ireland Galway as fulfilment for the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Coll. Engineer. Inform., Nat. Univ. Ireland Galway, 2019. 186 p.
- Kumar S., Burdon R. D., Stovold G. T., Gea L. D. Implications of selection history on genetic architecture of growth, form, and wood-quality traits in *Pinus radiata* // *Can. J. For. Res.* 2008. V. 38. N. 9. P. 2372–2381.
- Kuntz J. E., Riker A. J. The use of radio-active isotopes to ascertain the role of root grafting in the translocation of water, nutrients and disease inducing organisms among forest trees // *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva.* 1956. V. 12. P. 144–145.
- Laitakari E. The root system of pine. A morphological investigation // *Acta For. Fenn.* 1929. V. 33. N. 1. P. 1–380.
- Lasserre J.-P., Mason E. G., Watt M. S. The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* [D. Don] corewood stiffness in an 11-year old experiment // *For. Ecol. Manag.* 2005. V. 205. N. 1–3. P. 375–383.
- Lasserre J.-P., Mason E. G., Watt M. S., Moore J. R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood // *For. Ecol. Manag.* 2009. V. 258. Iss. 9. P. 1924–1931.
- Launay J., Ivkovich M., Pâques L., Bastien C., Higelin P., Rozenberg P. Rapid measurement of trunk MOE on standing trees using RIGIDIMETER // *Ann. For. Sci.* 2002. V. 59. Iss. 5. P. 465–469.
- Launay J., Rozenberg P., Pâques L., Dewitte J.-M. A new experimental device for rapid measurement of the trunk equivalent modulus of elasticity on standing trees // *Ann. For. Sci.* 2000. V. 57. Iss. 4. P. 351–359.
- Legg M., Bradley S. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 139. N. 2. P. 588–604.
- Lenz P., Auty D., Achim A., Beaulieu J., MacKay J. Genetic improvement of white spruce mechanical woodtraits – early screening by means of acoustic velocity // *Forests.* 2013. V. 4. Iss. 3. P. 575–594.
- Li L., Wu H. X. Efficiency of early selection for rotation-aged growth and wood density traits in *Pinus radiata* // *Can. J. For. Res.* 2005. V. 35. N. 8. P. 2019–2029.
- Lindström H., Reale M., Grekin M. Using non-destructive testing to assess modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* trees // *Scand. J. For. Res.* 2009. V. 24. Iss. 3. P. 247–257.
- Liu C., Zhang S., Cloutier A., Rycabel T. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics // *For. Ecol. Manag.* 2007. V. 242. Iss. 2–3. P. 648–655.
- Livingston A. K., Cameron A. D., Petty J. A., Lee S. L. Effect of growth rate on wood properties of genetically improved Sitka spruce // *Forestry.* 2004. V. 77. Iss. 4. P. 325–334.
- Llana D. F., Hermoso E., Izquierdo S. T., Bobadilla I., Iñiguez-Gonzalez G. The effect of moisture content on nondestructive probing measurements // *Proc. 19th Int. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symp. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-239,* 2015. P. 187–191.
- Llana D. F., Hermoso E., Bobadilla I., Iñiguez-Gonzalez G. Influence of moisture content on the results of penetration and withdrawal resistance measurements on softwoods // *Holzforschung.* 2018. V. 72. N. 7. P. 549–555.
- Lorensani R. G. M., Gonçalves R., Müller G., da Silva Alves C., Martins G. A., Ruy M., da Veiga N. S. Evolution of eucalyptus clone's parameters obtained nondestructively in nursery seedlings up to cutting age // *Proc. 20th Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249.* Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017a. P. 370–376.
- Lorensani R. G. M., Gonçalves R., Merlo E., Santaclara O., Touza M., Guaita M., Lario F. J. Prediction of wood properties in trees from parameters obtained nondestructively in nursery seedlings // *Proc. 20th Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249.* Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017b. P. 377–385.
- Louzada J. L. P. C., Fonseca F. M. A. The heritability of wood density components in *Pinus pinaster* Ait. and the imp-

- lications for tree breeding // *Ann. For. Sci.* 2002. V. 59. Iss. 8. P. 867–873.
- Lowell E. C., Todoroki C. L., Dykstra D. P., Briggs D. G. Linking acoustic velocity of standing Douglas-fir trees to veneer stiffness: a tree-log-product study across thinning treatments // *N. Z. J. For. Sci.* 2014. V. 44. N. 1. P. 1–16.
- Lundgren N., Hagman O., Johansson J. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber II: evaluation of models generated on a pixel level // *J. Wood Sci.* 2006. V. 52. Iss. 1. P. 39–43.
- Ma T., Inagaki T., Tsuchikawa S. Calibration of SilviScan data of *Cryptomeria japonica* wood concerning density and microfibril angles with NIR hyperspectral imaging with high spatial resolution // *Holzforschung.* 2017. V. 71. N. 4. P. 341–347.
- Ma T., Inagaki T., Tsuchikawa S. Non-destructive evaluation of wood stiffness and fiber coarseness, derived from SilviScan data, via near infrared hyperspectral imaging // *J. NIR Spectroscopy.* 2018. V. 26. N. 6. P. 398–405.
- MacDonald E. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce // *Forestry.* 2002. V. 75. Iss. 2. P. 107–138.
- Mai T. C., Razafindratsima S., Sbartai Z. M., Demontoux F., Bos F. Non-destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency // *Constr. Build. Mater.* 2015. V. 77. P. 213–217.
- Malavasi U. C., Davis A. S., Malavasi M. M. Estimating water in living woody stems – a review // *Cerne.* 2016. V. 22. N. 4. P. 415–422.
- Maldonado I. B., Herrero M. E., González G. Í., Martitegui F. A., Montesinos D. B., Monteagudo J. P. Density estimation by screw withdrawal resistance and probing in structural sawn coniferous timber, and modulus of elasticity assessment // *Inf. Constr.* 2007. V. 59. P. 107–116.
- Mamdy C. Contribution à l'étude du module d'élasticité de troncs d'arbres sur pied; utilisation en amelioration génétique des arbres forestiers // Rapport DEA Matière condensée et diluée, ESEM Orléans, INRA Orléans, 1995. 47 p.
- Mamdy C., Rozenberg P., Franc A., Launay J., Scherman N., Bastien J. C. Genetic control of stiffness of standing Douglas fir; from the standing stem to the standardized wood sample, relationships between modulus of elasticity and wood density parameters. Part 1 // *Ann. For. Sci.* 1999. V. 56. P. 133–143.
- Marra G., Pellerin R., Galligan W. Nondestructive determination of wood strength and elasticity by vibration // *Holz Roh- Werkst.* 1966. V. 24. N. 10. P. 460–466.
- Martin P., Collet R., Barthelemy P., Roussy G. Evaluation of wood characteristics: internal scanning of the material by microwaves // *Wood Sci. Technol.* 1987. V. 21. P. 361–371.
- Martinez-Sala R., Rodriguez-Abad I., Barra R. D., Capuz-Lladro R. Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique // *Constr. Build. Mater.* 2013. V. 38. Iss. 9. P. 903–911.
- Matheson A. C., Gapare W. J., Ilic J., Wu H. X. Inheritance and genetic gain in wood stiffness in radiata pine assessed acoustically in young standing trees // *Silvae Gen.* 2008. V. 57. P. 56–64.
- Mattheck C., Bethge K., Albrecht W. How to read the results of resistograph M. // *Arboricultural J.* 1997. V. 21. P. 331–346.
- McLain T. E. Design axial withdrawal strength from wood: I. Wood screws and lag screws // *For. Prod. J.* 1997. V. 47. N. 5. P. 77–84.
- Meder R., Trung T., Schimleck L. Seeing the wood in the trees: Unleashing the secrets of wood via near infrared spectroscopy // *J. NIR Spectroscopy.* 2010. V. 18. Iss. 1. P. 5–7.
- Michalikova M., Prauzek M. A hybrid device for electrical impedance tomography and bioelectrical impedance spectroscopy measurement // *IEEE 27<sup>th</sup> Can. Conf. Electr. Comput. Engineer. (CCECE).* 2014. P. 1–4.
- Micko M. M., Wang E. I. C., Taylor F. W., Yanchuk A. D. Determination of wood specific gravity in standing white spruce using a Pilodyn tester // *For. Chron.* 1982. V. 58. N. 4. P. 178–180.
- Milota M. R. Specific gravity as a predictor of species correction factors for a capacitance-type moisture meter // *For. Prod. J.* 1994. V. 44. P. 63–68.
- Milota M. R. Calibration of moisture meters for western hardwood species // *For. Prod. J.* 1996. V. 46. N. 1. P. 39–42.
- Mochan S., Moore S., Connolly T. Using acoustic tools in forestry and the wood supply chain. *For. Commis., Tech. Note* 18, 2009. 6 p.
- Moon S., Perron J. T., Martel S. J., Holbrook W. S., St. Clair J. A model of three-dimensional topographic stresses with implications for bed-rock fractures, surface processes, and landscape evolution // *J. Geophys. Res.: Earth Surface.* 2017. V. 122. N. 4. P. 823–846.
- Moore J., Achim A., Lyon A., Mochan S., Gardiner B. Effects of early respacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber // *For. Ecol. Manag.* 2009. V. 258. Iss. 7. P. 1174–1180.
- Moore J. R., Cown D. J., McKinley R. B., Sabatia C. O. Effects of stand density and seedlot on three wood properties of young radiata pine grown at a dry-land site in New Zealand // *N. Z. J. For. Sci.* 2015. V. 45. N. 4. P. 1–15.
- Moqsud M., Yoshitake A. J., Bushra Q. S., Hyodo M., Omine K., Strik D. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation // *Waste Manag.* 2015. V. 36. P. 63–69.
- 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 // *Can. J. For. Res.* 2009. V. 39. N. 8. P. 1421–1429.
- Muneri A., Asada T., Tomita K., Kusunoki K., Szota C. Between-tree variation in stem volume, wood density, fibre length and Kraft pulping properties of *Eucalyptus globulus* and the utility of field-portable NIR spectroscopy and wood cores in evaluating pulpwood quality properties of standing trees // *Appita J.* 2011. V. 64. Iss. 4. P. 356–361.
- Murphy G., Cown D. Stand, stem and log segregation based on wood properties: A review // *Scand. J. For. Res.* 2015. V. 30. Iss. 8. P. 1–47.
- Nadezhdina N., Čermak J. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems in large trees // *J. Exp. Bot.* 2003. V. 54. Iss. 387. P. 1511–1521.
- Nepveu G. L'utilisation du torsiomètre en forêt: influence de l'opérateur et de l'appareil // *Ann. Sci. For.* 1979. V. 36. N. 4. P. 347–51.
- Nicholls J. W. P., Roget D. K. Tests on a field method for the determination of wood density // *Austral. For.* 1977. V. 40. N. 2. P. 144–150.

- Notivol E., Gil L. A., Pardos J. A. A method for estimating wood density in standing trees and its variability in *Pinus pinaster* // *Investig. Agr. Sist. Recur. For.* 1992. V. 1. P. 41–47.
- 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 // *Proc. 19<sup>th</sup> Int. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symp.* / R. J. Ross, R. Gonçalves, X. Wang (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-239. USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., Madison, WI, 2015. P. 154–161.
- Oliveira J. T., Wang X., Vidaurre G. B. Assessing specific gravity of young *Eucalyptus* plantation trees using a resistance drilling technique // *Holzforschung.* 2017. V. 71. N. 2. P. 137–145.
- Ovington J. D., Madgwick H. A. I. The growth and composition of natural stands of birch. 1. Dry-matter production // *Plant and Soil.* 1959. V. 10. N. 3. P. 271–283.
- Palma S. S. A., Gonçalves R., Trinca A. J., da Costa C. P., Martins G. A. Interference of pith, knots and interpolation system in ultrasonic tomography images // *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood* / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 194–201.
- Pâques L. E., Rozenberg P. Ranking larch genotypes with the Rigidimeter: relationships between modulus of elasticity of standing trees and of sawn timber // *Ann. For. Sci.* 2009. V. 66. N. 4. Article number 414.
- Paradis N., Auty A., Carter P. A. Using a standing-tree acoustic tool to identify forest stands for the production of mechanically-graded lumber // *Sensors.* 2013. V. 13. Iss. 3. P. 3394–3408.
- Park C. Y., Kim S. J., Lee J. J. Evaluation of specific gravity in post member by drilling resistance test // *J. Kor. Wood Sci. Technol.* 2006. V. 34. Iss. 2. P. 1–9.
- Park H. J., Park J. H., Park K. S., Ahn T. I., Son J. E. Non-destructive measurement of paprika (*Capsicum annuum* L.) internal electrical conductivity and its relation to environmental factors // *Horticult. Sci. Technol.* 2018. V. 36. Iss. 5. P. 691–701.
- Parkinson K. J. Bioelectric potentials in plants. Doctoral thesis. Durham: Durham Univ., 1963. 371 p.
- Peltola H., Kipeläinen A., Sauvala K., Räisänen T., Ikonen V. P. Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine // *Silva Fenn.* 2007. V. 41. N. 3. P. 489–505.
- Piene H., Fensom D. S., McIsaac J. E., Thompson R. G., Alexander K. G. Electrical resistance and capacitance measurements on young, spaced and unspaced, defoliated and protected, balsam fir trees // *Can. J. For. Res.* 1984a. V. 14. N. 6. P. 811–817.
- Piene H., Thompson R. G., McIsaac J. E., Fensom D. S. Electrical resistance measurements of young balsam fir trees in relation to specific volume increment, foliar biomass, and ion content of bark and wood // *Can. J. For. Res.* 1984b. V. 14. N. 2. P. 177–180.
- Polge H. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Applications dans les domaines Technologique et Physiologique. Thèse de Doctorat. Univ. de Nancy, France, 1966. 206 p.
- Polge M., Keller R. Première appréciation de la qualité du bois en forgé par utilisation d'un torsiomètre // *Ann. Sci. For.* 1970. V. 27. N. 2. P. 197–223.
- Pot D., Chantre G., Rozenberg P., Rodrigues J. C., Jones G. L., Pereira H., Hannrup B., Cahalan C., Plomion C. Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) // *Ann. For. Sci.* 2002. V. 59. N. 5–6. P. 563–575.
- Pressler M. R. Der forstliche Zuwachsbohrer neuester Construction und dessen praktische Bedeutung und Anwendung für die forstliche Forschungs-, Taxations-, Pflege- und Nutzungs-Technik // *Tharander Jahrbuch.* 1866. V. 17. N. 3. P. 113–209.
- Proceedings of 10<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing, 2010 (ECNDT).* Moscow, Russia, 7–11 June 2010. Vol. 1 of 5. NY: Curran Associates, Inc., 2011. 29 p.
- Raschi A., Tognetti R., Ridder H. W., Beres C. Water in the stems of sessile oak (*Quercus petraea*) assessed by computer tomography with concurrent measurements of sap velocity and ultrasound emission // *Plant Cell Environ.* 1995. V. 18. Iss. 5. P. 545–554.
- Raymond C. A., Joe B., Anderson D. W., Watt D. J. Effect of thinning on relationships between three measures of wood stiffness in *Pinus radiata*: Standing trees vs. logs vs. short clear specimens // *Can. J. For. Res.* 2008. V. 38. N. 11. P. 2870–2879.
- Razafindratsima S., Sbartai Z. M., Demontoux F. Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content // *Wood Sci. Technol.* 2017. V. 51. Iss. 6. P. 1421–1431.
- Reis M. N., Palma S. S. A., Ziller D. P., Gonçalves R., Esteban M., Íñiguez-González G., Basterrechea M. A. Association of ultrasonic tomography and drilling resistance in decay evaluation of trees // *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. non-destructive testing and evaluation of wood* / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 187–193.
- Rinn F. Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung // *Holz-Zentralblatt.* 1989. V. 115. N. 34. P. 529–530.
- Rinn F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection // *Holztechnologie.* 2012. V. 53. Iss. 3. P. 24–29.
- Rinn F., Schweingruber F. H., Schär E. RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood : comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different species // *Holzforschung.* 1996. V. 50. Iss. 4. P. 303–311.
- Ross R. J. (Ed.). *Nondestructive evaluation of wood*, 2<sup>nd</sup> Ed. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-238. Madison, WI: USDA For. Serv., For. Prod. Lab., 2015. 169 p.
- Rozenberg P., Franc A., Mamdy C., Launay J., Schermann N., Bastien J. C. Genetic control of stiffness of standing Douglas-fir; from the standing stem to the standardised wood sample, relationships between modulus of elasticity and wood density parameters. Part II // *Ann. For. Sci.* 1999. V. 56. N. 2. P. 145–154.
- Rozenberg P., Van de Sype H. Genetic variation of the Pilo-dyn-girth relationship in Norway pine spruce (*Picea abies* L. (Karst)) // *Ann. For. Sci.* 1996. V. 53. N. 6. P. 1153–1166.
- Rudnicki M., Wang X., Ross R. J., Allison R. B., Perzynski K. Measuring wood quality in standing trees: a review //

- USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-248, 2017. 11 p.
- Ruggirello M. Nondestructive testing of ponderosa pine wood quality influence of stand and tree-level variables on acoustic velocity and wood density. Submitted to the Faculty of the North. Arizona Univ. School of Forestry in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Forestry, 2017. 36 p.
- Sambuelli L., Socco L. V., Godio A., Nicolotti G., Martinis R. Ultrasonic, electric and radar measurements for living trees assessment // *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 2003. V. 44. N. 3–4. P. 253–279.
- Sánchez E. M., Caballé G., Gonçalves R., Mansini R., Santaclara O., Guaita M., Leza F. J. L. Solid wood quality prediction capacity with acoustic methods in young trees // *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood* / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017a. P. 395–401.
- Sánchez E. M., Charpentier J. P., Segura V., Bertoldi I., Caballé G., Santaclara O. The potential of portable NIRS devices for rapid, nondestructive measurement of basic wood density on standing trees // *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood* / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017b. P. 525.
- Sandoz J.-L., Benoit Y. Timber grading machine using ultrasonic and density measurements: Triomatic // *15<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing of wood*, Duluth, 10–12 Sept., 2007. Duluth, MN, USA, 2007. P. 10–12.
- Sandoz J.-L., Benoit Y., Demay L. Wood testing using acoustic-ultrasonic // *12<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing of wood*, Sopron, 13–15 Sept., 2000. Sopron: Univ. West. Hungary, 2000. P. 97–104.
- Savill P. S., Sandels A. J. The influence of early respacing on the wood density of Sitka spruce // *Forestry*. 1983. V. 65. N. 2. P. 109–120.
- Schajer G. S. Lumber strength grading using X-ray scanning // *For. Prod. J.* 2001. V. 6. N. 3. P. 43–50.
- Schajer G. S., Orhan F. B. Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves // *Europ. J. Wood Wood Prod.* 2006. V. 64. Iss. 6. P. 483–490.
- Schepper V. D., Dusschoten D. V., Copini P., Jahnke S., Steppe K. MRI links stem water content to stem diameter variations in transpiring trees // *J. Exp. Bot.* 2012. V. 63. Iss. 7. P. 2645–2653.
- Schermann N. Étude des paramètres génétiques de trois populations de Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), analyse d'un diallèle 16'16, conséquences pour la stratégie d'amélioration génétique de l'espèce. Thèse Inst. Nat. Agron. Paris Grignon-INRA Orléans, France, 1994. 117 p.
- Schimleck L. R., Kube P. D. A., Raymond C., Michell A. J., French J. Estimation of whole-tree kraft pulp yield of *Eucalyptus nitens* using near-infrared spectra collected from increment cores // *Can. J. For. Res.* 2005. V. 35. N. 12. P. 2797–2805.
- Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L. A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation // *Forests*. 2019. V. 10. Iss. 9. Article number 728. 50 p.
- Schweingruber E. H. Dendroökologische Holzanatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Berne: Paul Haupt Verlag, 2001. 472 p.
- Senalik C. A., Wacker J. P., Wang X., Rodrigues B. P., Jalinoos F. Assessing ability of ground-penetrating radar to detect internal moisture and fungal decay in Douglas-fir beams // *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood* / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 286–297.
- Shortle C. W., Shigo A. L., Berry P., Abusamra J. Electrical resistance in tree cambium zone: Relationship to rates of growth and wound closure // *For. Sci.* 1977. V. 23. Iss. 3. P. 326–329.
- Shupe T. F., Wu Q., Hartley I. D. Calibration of moisture meters for southern hardwoods // *For. Prod. J.* 2002. V. 52. N. 718. P. 59–62.
- Silva Oliveira J. T., Wang X., Vidaurre G. B., Rodrigues B. P. Relationship between wood moisture content and drilling resistance in eucalypt trees // *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. non-destructive testing and evaluation of wood* / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 470.
- Simic K., Gendvilas V., O'Reilly C., Harte A. M. Predicting structural timber grade-determining properties using acoustic and density measurements on young Sitka spruce trees and logs // *Holzforschung*. 2019. V. 73. Iss. 2. P. 139–149.
- Sivasankar P., Seedeve P., Poongodi S., Sivakumar M., Murugan T., Sivakumar L., Sivakumar K., Balasubramanian T. Characterization, antimicrobial and antioxidant property of exopolysaccharide mediated silver nanoparticles synthesized by *Streptomyces violaceus* MM72 // *Carbonhydrate Polymers*. 2018. V. 181. P. 752–759
- Smith D. M., Allen S. J. Measurement of sap flow in plant stems // *J. Exp. Bot.* 1996. V. 47. Iss. 12. P. 1833–1844.
- Smith D. M., Larson B. C., Keltly M. J., Ashton P. M. S. The practice of silviculture: Appl. for. ecol. 9<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. 537 p.
- Smith S. M., Morrell J. J. Correcting Pilodyn measurement of Douglas-fir for different moisture levels // *For. Prod. J.* 1986. V. 36. P. 45–46.
- Smith K. T., Ostrofsky W. D. Cambial and internal resistance of red spruce trees in eight diverse stands in the northeastern United States // *Can. J. For. Res.* 1993. V. 23. N. 2. P. 322–326.
- Sofianto I. A., Inagaki T., Ma T., Tsuchikawa S. Effect of knots and holes on the modulus of elasticity prediction and mapping of sugi (*Cryptomeria japonica*) veneer using near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) // *Holzforschung*. 2019. V. 73. N. 3. P. 259–268.
- Sparks J. P., Gaylon S., Campbell R., Black A. Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study // *Oecologia*. 2001. V. 127. Iss. 4. P. 468–475.
- Sprague J. R., Talbert J. T., Jett J. B., Bryant R. L. Utility of the Pilodyn in selection for mature wood specific gravity in loblolly pine // *For. Sci.* 1983. V. 29. N. 4. P. 696–701.
- Strik D. P. B. T. B., Hamelers (Bert) H. V. M., Snel J. F. H., Buisman C. J. N. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell // *Int. J. Energy Res.* 2008. V. 32. Iss. 9. P. 870–876.

- Taki S., Nobori Y., Caceres M. L. L. Method for estimation of stem carbon fixation of Japanese black pine by combining stem analysis and soft X-ray densitometry // J. For. Res. 2014. V. 19. N. 1. P. 226–232.
- Tattar T. A., Saufley G. C. Comparison of electrical resistance and impedance measurements in wood in progressive stages of discoloration and decay // Can. J. For. Res. 1973. V. 3. N. 4. P. 593–595.
- Taylor F. W. Rapid determination of southern pine specific gravity with a Pilodyn tester // For. Sci. 1981. V. 27. P. 59–61.
- Tiitta M., Tomppo L. Air-coupled ultrasound and electrical impedance spectroscopy applications for wood // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 514.
- Todoroki C. L., Lowell E. C. Validation of models predicting modulus of elasticity in Douglas-fir trees, boles, and logs // N. Z. J. For. Sci. 2016. V. 46. Article number 11.
- Trejo J. L. D. Using acoustic measurements and inventory data to estimate stiffness in standing Douglas-fir trees. MSc. Thesis. Corvallis, OR: Oregon St. Univ., 2015. 35 p.
- Trewavas A. Aspects of plant intelligence // Ann. Bot. 2003. V. 92. N. 1. P. 1–20.
- Tsehaye A. Within- and between-tree variations in the wood quality of radiata pine. PhD thesis, School of Forestry, Univ. Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1995. 290 p.
- Veres I. A., Sayir M. B. Wave propagation in a wooden bar // Ultrasonics. 2004. V. 42. N. 1. P. 495–499.
- Vihirmaa L. Influence of site factors and climate on timber properties of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Environ., Agr. and Analyt. Chem. Chem. Dep., Univ. Glasgow, 2010. 372 p.
- Villeneuve M., Morgenstern E. K., Sebastian L. P. Estimation of wood density in family tests of jack pine and black spruce using the Pilodyn tester // Can. J. For. Res. 1987. V. 17. P. 1147–1149.
- Vincent M., Krause C., Koubaa A. Variation in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood quality after thinning // Ann. For. Sci. 2011. V. 68. Iss. 6. P. 1115–1125.
- Voeikova T. A., Emel'yanova L. K., Novikova L. M., Shakulov R. S., Sidoruk K. V., Debabov V. G., Smirnov I. A., Il'in V. K., Soldatov P. E., Tyurin-Kuz'min A. Y., Smolenskaya T. S. Intensification of bioelectricity generation in microbial fuel cells using *Shewanella oneidensis* MR-1 mutants with increased reducing activity // Microbiology. 2013. V. 82. N. 4. P. 410–414 (Original Russian Text © T. A. Voeikova, L. K. Emel'yanova, L. M. Novikova, R. S. Shakulov, K. V. Sidoruk, I. A. Smirnov, V. K. Il'in, P. E. Soldatov, A. Yu. Tyurin-Kuz'min, T. S. Smolenskaya, V. G. Debabov, 2013, publ. in Mikrobiologiya. 2013. V. 82. N. 4. P. 402–407).
- Vogt U. K. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. // J. Exp. Bot. 2001. V. 52. P. 1527–1536.
- Waghorn M. J., Watt M. S., Mason E. G. Influence of tree morphology, genetics, and initial stand density on outerwood modulus of elasticity of 17-year-old *Pinus radiata* // For. Ecol. Manag. 2007. V. 244. N. 1–3. P. 86–92.
- Wang S.-Y., Chuang S.-T. Experimental data correction of the dynamic elastic moduli, velocity and density of solid wood as a function of moisture content above the fiber saturation point // Holzforschung. 2000. V. 54. P. 309–314.
- Wang T., Aitken S. N., Rozenberg P., Carlson M. R. Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships // Can. J. For. Res. 1999. V. 29. P. 434–445.
- Wang X. Acoustic measurements on trees and logs: A review and analysis // Wood Sci. Technol. 2013. V. 47. P. 965–975.
- Wang X., Carter P., Ross R. J., Brashaw B. K. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials – A path to increased profitability // For. Prod. J. 2007. V. 57. P. 6–14.
- Wang X., Ross R. J., McClellan M., Barbour R. J., Erickson J. R., Forsman J. W., McGinnis G. D. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method // Wood Fiber Sci. 2001. V. 33. P. 522–533.
- Wang X., Senalik C. A., Ross R. J. (Eds.). Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. 539 p.
- Wang X., Verrill S., Lowell E., Ross R. J., Herian V. L. Acoustic sorting models for improved log segregation // Wood and Fiber Sci. 2013. V. 45. N. 4. P. 343–352.
- Watanabe K., Kobayashi I., Kuroda N., Harada M., Noshiro S. Predicting oven-dry density of Sugi (*Cryptomeria japonica*) using near infrared (NIR) spectroscopy and its effect on performance of wood moisture meter // J. Wood Sci. 2012. V. 58. P. 383–390.
- Watt M. S., Zoric B., Kimberley M. O., Harrington J. Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial // Can. J. For. Res. 2011. V. 41. N. 7. P. 1422–1431.
- Wengert G., Bois P. Evaluation of electric moisture meters on kiln-dried lumber // For. Prod. J. 1997. V. 47. N. 6. P. 60–62.
- Wessels C. B., Malan F. S., Rypstra T. A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber // Europ. J. For. Res. 2011. V. 130. P. 881–893.
- Williamson G. B., Wiemann M. C. Measuring wood specific gravity correctly // Am. J. Bot. 2010. V. 97. P. 519–524.
- Wilson P. J. Accuracy of a capacitance-type and three resistance-type pin meters for measuring wood moisture content // For. Prod. J. 1999. V. 49. P. 29–32.
- Wu H. X., Ivković M., Gapare W. J., Baltunis B. S., Powell M. B., McRae T. A. Breeding for wood quality and profit in radiata pine: a review of genetic parameters // N. Z. J. For. Sci. 2008. V. 38. P. 56–87.
- Yanchuk A. D., Kiss G. K. Genetic variation in growth and wood specific gravity and its utility in the improvement of interior spruce in British Columbia // Silvae Genet. 1993. V. 42. P. 141–148.
- Yang J.-L., Ilic J., Wardlaw T. Relationships between static and dynamic modulus of elasticity for a mixture of clear and decayed eucalypt wood // Austral. For. 2003. V. 66. N. 3. P. 193–196.

- Yin Y., Nagao H., Liu X., Nakai T. Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic based nondestructive methods // J. Wood Sci. 2010. V. 56. N. 1. P. 33–40.
- Yu L., Liang Y., Zhang Y., Cao J. Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-squares // J. For. Res. 2020. V. 31. P. 1053–1060.
- Yue X., Wang L., Ge X., Wang X. Quantitative detection of internal decay degree for standing trees based on three NDT methods – electric resistance tomography, stress wave imaging and resistograph techniques // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. Ross J. (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 167–179.
- Zhang H., Feng D., Wang X. Ultrasonic method for evaluating wood quality of poplar seedlings // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Symp. nondestructive testing and evaluation of wood / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross (Eds.). Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-249. Madison, WI: USDA, For. Serv., For. Prod. Lab., 2017. P. 360–369.
- Zhang H., Guo Z., Su J. Application of a drill resistance technique for rapid determining wood density. Progress of machining technology // Key Eng. Mater. 2009. V. 407–408. P. 494–499.
- Zhang S. Y. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories // Wood Sci. Tech. 1995. V. 29. P. 451–465.
- Zhang S. Y., Chauret G., Ren H. Q., Desjardins R. Impact of plantation black spruce initial spacing on lumber grade yield, bending properties and MSR yield // Wood Fiber Sci. 2002. V. 34. N. 3. P. 460–475.
- Zhang S. Y., Chauret G., Swift D. E., Duchesne I. Effects of pre-commercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada // Can. J. For. Res. 2006. V. 36. N. 4. P. 945–952.
- Zobel B. J., Jett J. B. Genetic controls in wood formation // Genetics of wood production. Berlin: Springer-Verlag, 1995. P. 26–49.
- Zobel B. J., van Buijtenen J. P. Wood variation, its causes and control. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 363 p.

## QUALIMETRY OF FOREST TREES

### 1. OVERVIEW OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

V. A. Usoltsev

Ural State Forest Engineering University  
Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: Usoltsev50@mail.ru

When studying the biological productivity of forests and developing standards for accounting for all components of biomass, it is necessary to know the laws of the dynamics of the wood density of growing trees as their key environmental characteristics that require the use of non-destructive methods. The pilodyn method, as one of the simplest and most accessible, is in demand in breeding programs, but the selection based on the density indicator obtained by the pilodyn tester was not effective for all tree species, and the density variability explained by this method varies in the range from 27 to 92 %. Qualimetry by the method of wood drilling resistance based on a resistograph, as a more sensitive device compared to a pilodyn tester, has also been widely used in breeding programs, but both methods are based on local probing, and its extrapolation to the entire tree gives biases of estimates. The use of the rigidimeter design does not have the drawback inherent in the two methods mentioned above. But, the method proved to be relatively time-consuming to perform multiple measurements. The acoustic method for assessing the modulus of elasticity and density of wood is sensitive to the presence of wood defects and allows you to remove the contradiction of selection targets aimed at simultaneously increasing the growth rate and density of wood. Radiation methods require the use of expensive equipment and successfully register the intra-ring density. The advantage of NIR-spectroscopy over all other methods is the ability to evaluate the chemistry of wood and the yield of cellulose, but it does not give a direct assessment and requires special calibration. Thus, any technique has its limitations, and it is important to be able to choose the technique that is most suitable for a particular.

**Keywords:** wood qualimetry, growing trees, pilodyn-tester, resistograph, rigidimeter, acoustic and radiation methods, NIR-spectroscopy.

**How to cite:** Usoltsev V. A. Qualimetry of forest trees: 1. Overview of non-destructive testing methods // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 1. P. 81–126 (in Russian with English abstract and references).