

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»
(УГЛТУ)

В. А. Усольцев, И. С. Цепордей

**КВАЛИМЕТРИЯ ФИТОМАССЫ
ЛЕСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ.
МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ,
БАЗА ДАННЫХ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Монография

Екатеринбург
2023

УДК 630*52:674.038.15

ББК 43.62

У76

Рецензенты:

кафедра лесоводства и лесопаркового хозяйства Оренбургского государственного аграрного университета *Г. Т. Бастаева*;

А. А. Маленко, д-р с.-х. наук зав. кафедрой «Лесное хозяйство» Алтайского государственного аграрного университета

Усольцев, Владимир Андреевич.

У76 Квалиметрия фитомассы лесных деревьев. Методы неразрушающего контроля, база данных и ее приложения : монография / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет ; Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. – 182 с.

ISBN 978-5-94984-891-3

При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов биомассы необходимо знание квалиметрии древесины растущих деревьев как их ключевой экологической характеристики, требующей применения неразрушающих методов. Дан аналитический обзор неразрушающих методов оценки квалиметрических показателей древесины. Выполнен анализ методов сопротивления бурению древесины, радиационных методов, спектроскопии в ближнем инфракрасном спектре, биопотенциалов растений. Дана характеристика составленной авторами базы данных о квалиметрических показателях фитомассы деревьев, произрастающих на территории Евразии.

Предназначен для специалистов в области разработки и управления лесным кадастром, разработки систем лесного мониторинга и экологических программ разного уровня, а также для преподавателей, аспирантов и студентов по специальности «Лесное хозяйство».

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 630*52:674.038.15

ББК 43.62

ISBN 978-5-94984-891-3

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2023

© Усольцев В. А., Цепордей И. С., 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава 1. Методы неразрушающего контроля	13
1.1. Плотность древесины. Общие сведения	13
1.2. Пилодин-метод	15
1.3. Квалиметрия методом сопротивления бурению древесины	20
1.4. Ригидометр-метод	27
1.5. Акустические методы	32
1.6. Радиационные методы	57
1.7. Ближняя инфракрасная спектроскопия	60
1.8. Микроволновое сканирование	62
1.9. Влияние влажности древесины на точность оценки ее плотности	64
1.10. Определение влажности древесины	66
1.11. Биопотенциалы в диагностике состояния растений	69
1.12. Биотоки и микробные топливные элементы ...	75
1.13. Электрометрический метод определения массы корней деревьев	78
1.14. Радиолокационное зондирование	90
Выводы по первой главе	90
Глава 2. База данных и ее приложения	93
2.1. Общие сведения	93
2.2. Базисная плотность древесины и коры в географических градиентах	99
2.3. Содержание сухого вещества в фракциях фитомассы в географических градиентах	116
Выводы по второй главе	129
Заключение	131
Библиографический список	132

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 углеродо-депонирующей способности. При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов фитомассы необходимо знать закономерности динамики не только количественных, но и качественных их характеристик, изменяющихся с возрастом, экологическими и другими факторами. Это, прежде всего, плотность и влажность фитомассы деревьев. Их исследования связаны с областью квалиметрии, или науки о количественной оценке качества (Азгальдов, Райхман, 1973). Поскольку многие из квалиметрических 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 лесоводственного и селекционного контроля названных характеристик и, как следствие, повысить его эффективность (Симоненко, 2014).

В настоящее время во всем мире проводятся исследования и разработки, направленные на изучение потенциального использования широкого спектра неразрушающих технологий для оценки древесины и материалов на ее основе, от оценки растущих деревьев до деревянных конструкций. В июне 2010 года 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, 10th European Conference on Non-Destructive Testing, 2010). В сентябре

2017 года в США прошел международный симпозиум по неразрушающей оценке и тестированию растущих деревьев, круглых сортиментов, пиломатериалов и деревянных конструкций (Wang et al., 2017), что свидетельствует об актуальности проблемы неразрушающего контроля, в том числе квалиметрии растущих деревьев.

Оценка качества древесины отдельных деревьев и лесных насаждений в целом стала важной процедурой при выполнении лесохозяйственных мероприятий, поскольку лесное хозяйство и деревообрабатывающая промышленность испытывают растущее экономическое давление, требующее максимизации извлекаемых из древесины полезностей (Acoustic assessment..., 2007). По этой причине оценка количества и качества древесины имеет решающее значение для определения производственного потенциала деревьев (Simplified methods..., 2012; Proto et al., 2014). Были предприняты значительные усилия для разработки надежных неразрушающих технологий, способных прогнозировать внутренние свойства древесины отдельных растущих деревьев и оценивать качество древесины в лесах. Кроме того, недавно были предложены неразрушающие технологии, включающие применение миниризотронов и радиолокации для оценки распространения и роста корней растений (Root system investigation..., 2013, Estimating belowground biomass and root..., 2015). Использование таких технологий не только повышают рентабельность лесной отрасли, но и может помочь лесоведам принимать экономические и экологические управленческие решения по уходу за деревьями и древостоями, улучшать технологию прореживаний и сплошных рубок, а также эффективно распределять древесные ресурсы для оптимального использования (Acoustic assessment..., 2007; Proto et al., 2014).

Кроме технического применения, методы неразрушающего контроля древесины имеют некоторые социальные приложения. Деревья в городском сообществе обладают значительными экологическими, экономическими и социальными функциями и позволяют сделать город более пригодным для жизни и комфортным для его жителей (Connecting people with ecosystems..., 2000). Однако, поскольку большие физические деревянные сооружения находятся в непосредственной близости от плотного скопления людей и построек, разрушение дерева может нанести вред. Управляющие городскими лесами

используют биологические и инженерные принципы для определения структурной устойчивости дерева и оценки вероятности разрушения. Методы неразрушающего контроля путем определения местоположения и количественной оценки гнили и других дефектов древесины используются для измерения физического состояния деревьев в городских лесопосадках в целях обеспечения общественной безопасности и защиты собственности. Эти методы представляют особую ценность для управляющих городскими лесами и древесиноведам, ответственных за общую безопасность жителей города, дорожный транспорт и инженерные коммуникации. Методы неразрушающего контроля, используемые в городских лесах, включают визуальные осмотры, акустические методы зондирования, таймеры волн напряжения и мультисенсорную томографию, тестирование на сопротивление бурению, статические и динамические испытания на растяжение, радиационные методы, дистанционное зондирование с воздуха, включая использование беспилотных летательных аппаратов (Bucur, 2006; Wang, Allison, 2008; Allison, Wang, 2015), томографию электрического сопротивления и инфракрасную термографию (Allison et al., 2020).

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..., 1986; ГОСТ..., 1987; Каневский, Сальникова, 2007).

Для оптимального использования наших лесных ресурсов необходимы детальные знания об изменениях квалиметрических показателей лесной фитомассы и их влиянии на стоимость конечного продукта. Например, результаты исследования квалиметрии стволов тонкомерных древостоев сосны желтой в северных районах штата Аризона (США) позволили существенно повысить их потребительскую 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 технику, наиболее пригодную для того или иного применения (Non-Destructive Evaluation Techniques..., 2019).

Известно, что все методы прямой оценки объема ствола деревьев путем наземного лазерного сканирования потенциально дают возможность предсказывать фитомассу деревьев с учетом базисной плотности древесины. В частности, с использованием данных наземного лазерного сканирования с трех позиций были рассчитаны модели ствола как совокупности цилиндров, объем которых рассчитан по их регистрируемой толщине. Отклонения фактических замеров диаметров от полученных сканированием составили от 1,3 до 0,6 см (Three-dimensional reconstruction..., 2004). По результатам наземного сканирования четырех пробных площадей была получена цифровая модель с учетом изменения плотности вдоль оси ствола. С помощью операции кластеризации и регистрируемых координат деревьев были оценены диаметр и высота каждого дерева. Сравнение полученных значений диаметров ствола с данными, измеренными вручную, показало стандартное отклонение от 1,2 до 2,5 см (Application of terrestrial laser scanners..., 2006).

Затем был разработан алгоритм, называемый алгоритмом разрезания облака точек, согласно которому можно вычислить диаметр, высоту, площадь сечения стволов и объем деревьев. Данные были собраны в режиме одиночного сканирования, а затем переданы в воксельный домен. После создания цифровой модели определено сечение на высоте 1,3 м для оценки диаметра ствола. Сравнение с фактическими ручными измерениями диаметра ствола и высоты дерева показало, что метод наземного лазерного сканирования объясняет 91 % варьирования диаметра ствола, но лишь 57 % варьирования высоты дерева (Moskal, Zheng, 2011).

Дальнейшее усовершенствование результатов наземного сканирования было направлено на моделирование ветвящихся структур деревьев. Впервые полученные сканированием облака точек были модифицированы в виде цилиндрических фрагментов ствола и ветвей в режиме множественного сканирования с помощью нелинейной подгонки по методу наименьших квадратов. Были извлечены параметры отдельных деревьев, но при этом ствол и ветви обнаруживались лишь

частично. Стандартная ошибка оценки диаметров составила 1,8 см (Pfeiffer et al., 2004).

В общей системе координат с 34 позиций сканирования было зарегистрировано 120 деревьев на площади 0,65 га. После ручной оцифровки осей ствола и ветвей по программе «Автокад» все сканы обрабатывались в виде двумерной карты изображений, после чего применено автоматическое вычисление диаметров цилиндрических отрезков. Проверка показала наличие среднего отклонения от 2 до 6 мм, при этом стандартное отклонение составило от 1 до 2 см (A practical approach..., 2013).

Был также использован метод ручной обработки извлеченных облаков точек у одиночных облиственных деревьев. Каркас дерева служил основой для дальнейшего автоматического вычисления углов ветвления, длины и изгиба ветвей. Рассчитана потребность в пространстве для ветвей суммированием объема всех тетраэдров. Сравнение с наземными достоверными данными не проводилось. Дальнейшие исследования формы ветвей перспективны в плане получения более глубоких знаний о потенциале фотосинтеза деревьев, который связан с ростом их фитомассы (Bayer et al., 2013).

Дассо с соавторами (Terrestrial laser scanning..., 2012) определили объемы скелета 42 деревьев вручную с помощью программного обеспечения «Поливоркс». После автоматической идентификации цилиндрических отрезков с использованием сегментов длиной 25 см в качестве входных данных были вручную отсеяны неправильно оцененные цилиндрические отрезки. Сравнение расчетного объема с полученным по ручным измерениям выявило относительную погрешность в диапазоне 10 % для стволов и в диапазоне 30 % для ветвей диаметром более 7 см.

Сюй с соавторами (Xu et al., 2007) нашли способ вычисления древовидных структур, применив алгоритм Дейкстры (Dijkstra, 1959), который обычно используется для решения задачи определения кратчайших путей в соответствующих поисковых процедурах. Представленные методы «скелетизации» дерева работают автоматически, и «скелеты» могут быть использованы в качестве входных данных в алгоритмах моделирования деревьев, основанных на полученных

древовидных структурах (Terrestrial laser scanning..., 2012; A practical approach..., 2013; Bayer et al., 2013).

Хакенберг с соавторами (Highly accurate tree models..., 2014) использовали высококачественные данные наземного лазерного сканирования, полученные на деревьях, растущих в контролируемых условиях. Их метод предполагал использование сферической структуры ветвления дерева. Поверхности сфер разрезают сканированное облако точек дерева, в результате получают пространственно несвязанные подоблака точек, представляющие площади поперечного сечения ветвей. В эти подоблака вписывались круги, и устанавливались радиусы цилиндрических отрезков. Сравнение полученных моделей с облаком входных точек показало, что модели действительно покрывают до 99 % объема дерева с качеством подгонки с точностью до 1 мм.

В отличие от эксперимента, выполненного в контролируемых (идеальных) условиях (Highly accurate tree models..., 2014), был проведен эксперимент со сканированием более низкого качества вследствие воздействия ветра, осадков и эффекта окклюзии (отсутствие видимости части деревьев вследствие их заграждения вблизи стоящими деревьями) (Non destructive method..., 2015). Древовидная модель, построенная автоматически с помощью предложенного метода, описывает тонкую ветвящуюся структуру деревьев. Установлено, что посредством лазерного сканирования объемы отрезков ствола диаметром более 10 см могут быть оценены с точностью от 3 % до 34 %, а объем отрезков меньшего размера, особенно ветвей диаметром менее 4 см, часто сильно завышались. Поскольку ошибки определения объема и фитомассы ствола были одинаковыми, сделан вывод, что показатель базисной плотности является несущественным источником ошибок (Non destructive method..., 2015).

Ниже будут рассмотрены методы неразрушающего контроля, которые, во-первых, апробированы на растущих деревьях, и, во-вторых, не требуют спиливания дерева, хотя некоторые из названных методов, 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-, резисто-

граф-ригидометр-методы и т. п., 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; Non-Destructive Evaluation Techniques..., 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 (кернов) древесины у растущих деревьев получило развитие в Германии в середине XIX столетия (Pressler, 1866). Метод имел целью определение прироста ствола без его спиливания и получил широкое распространение в дендрохронологии (Методы дендрохронологии, 2000; Schweingruber, 2001), а 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 ствола данного дерева можно наблюдать ее значительное варьирование (Zobel, Jett, 1995). На этом принципе, 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; Genetic parameters..., 2004; Microwave testing..., 2018) и наиболее важны при селекции деревьев, направленной на улучшение качества конечного продукта (Роне, 1970; Developing breeding objectives..., 2006). Однако традиционные измерения этих характеристик являются либо дорогостоящими, либо разрушающими объект. Необходима разработка методов быстрого сканирования растущих деревьев (Inheritance and genetic gain..., 2008). Прежние программы селекции древесных видов были ориентированы только на увеличение прироста и приводили к сокращению оборота

рубки для плантационных культур. Такое снижение оборота рубки привело к тому, что деревья стали иметь повышенную долю ювенильной древесины, обладающей более низкой плотностью, более высоким углом микроволокон и более низким модулем упругости, что привело к снижению стоимости конечных продуктов (Amishev, Murphy, 2008; *Breeding for wood quality...*, 2008; Fundova, 2012). Поэтому 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; *Estimating solid wood...*, 2015), а для этого необходимы точные и недорогие методы неразрушающего контроля.

Глава 1

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1.1. Плотность древесины. Общие сведения

Плотность древесины играет значительную роль в изменении продолжительности жизни деревьев и считается важной характеристикой для понимания экологических стратегий растений (Swenson, Enquist, 2008; Westoby, Wright, 2006). Например, плотность древесины связана с механической поддержкой (The role of wood density..., 2006), смертностью деревьев (Growth and wood density predict..., 2008; The relationship between wood density and mortality..., 2010), а также косвенно – с устойчивостью к засухе (Trends in wood density and structure..., 2001). Кроме того, плотность древесины отражает основные стратегии роста и распределения углерода в растениях (The importance of wood traits..., 2010).

Например, древесные растения, которые растут в условиях ограниченного доступа воды или питательных веществ, обычно имеют меньшие размеры, низкие темпы роста и плотную древесину с высокой механической прочностью благодаря отложению ассимилятов в толстостенные ячейки волокон (Wood anatomy and wood density..., 2009; Variation in growth..., 2017; Stem growth rhythms..., 2016; Fibre wall and lumen fraction..., 2013). И наоборот, растения, которые развиваются в условиях с меньшим дефицитом влаги или на более богатых почвах, обычно растут быстрее, имеют более крупные формы и дают менее плотную древесину (Environment effects on wood density..., 2012; Tang et al., 2013; Properties of eucalyptus..., 2015).

С биологической точки зрения плотность определяется камбиальной активностью ствола, которая регулирует количество лигноцеллюлозного материала, депонируемого в нем (Spatial variation of wood density..., 2016). Как следствие, плотность древесины является ключевым фактором, определяющим качество древесины и ее практическое применение (Saranpää, 2003). Таким образом, благодаря связи с важными характеристиками (механическая устойчивость

и гидравлическая проводимость), плотность древесины имеет значительное практическое применение в лесоводстве при определении качества древесины и ее потенциального использования (He, Deane, 2016).

В дополнение к факторам окружающей среды на плотность древесины влияют генетические факторы, что приводит к значительным межвидовым и внутривидовым вариациям среди видов (Wiemann, Williamson, 2002).

В пределах вида плотность древесины также может варьировать в зависимости от высоты растения (Effects of live crown..., 2002; Interclonal, intraclonal and within-tree variation..., 2007), а также в радиальном направлении внутри ствола (Zobel, van Buijtenen, 1989; Radial variation in wood specific gravity..., 1993; Woodcock, Shier, 2002; Variation in wood density..., 2014; Rungwattana, Hietz, 2018).

По этим причинам имеется огромный научный интерес к исследованию межвидовой и внутривидовой изменчивости плотности древесины, особенно в тропических и субтропических лесах, встречающихся в различных почвенно-климатических условиях (Tree growth traits..., 2017; Basic wood density..., 2018). Тем не менее, взаимосвязь между плотностью древесины и типом местопроизрастания редко проверяется на соответствующем наборе данных, полученном с использованием стандартизированной методики (Páscoa et al., 2020).

Одним из важных применений плотности древесины является оценка фитомассы лесных насаждений и запасов углерода (Fearnside, 1997; Nogueira et al., 2005). Например, реалистичные оценки фитомассы отдельных деревьев могут быть получены с помощью аллометрических уравнений с использованием значений плотности древесины наряду с измерениями диаметра ствола и высоты дерева (Improved allometric models..., 2014; Nam et al., 2016). Они позволяют преобразовывать данные таксации лесов в оценки фитомассы и углерода, что имеет основополагающее значение для оценки экосистемных услуг, предоставляемых лесами, а также их реакции на вырубку или будущие климатические сценарии (Do dynamic global vegetation..., 2017; Seeing the woods..., 2018; Nam et al., 2018). Такие оценки особенно важны для тропических лесов, которые обладают основным запасом углерода на планете (A large and persistent carbon sink..., 2011).

До сих пор всесторонние и прямые измерения фитомассы в масштабе лесных насаждений основывались на деструктивном отборе проб, который является непомерно дорогим, отнимающим много времени и технически сложным. Кроме того, это является незаконным в районах, охраняемых экологическим законодательством. В результате большинство моделей и оценок плотности древесины и лесного углерода на уровне древостоя разрабатываются с использованием относительно небольших образцов деревьев, таких как древесина ветвей или небольшие древесные керны, взятые у основания деревьев (Baldwin, 1987; A review of the challenges..., 2015; Analysis of wood density profiles..., 2015).

Недостатком использования таких небольших выборок является то, что оценки становятся ненадежными или действительными только на местном уровне. В процессе оценки фитомассы лесных насаждений эти искажения могут усиливаться при использовании в моделях средних значений плотности древесины, полученных на других объектах (Wood density in forests..., 2007). Значения плотности древесины на уровне видов или родов часто берутся из глобальных баз данных (TRY – a global database of plant traits, 2011), включающих в себя значения плотности древесины из нестандартизированных методик отбора проб и с разных высот деревьев, что затрудняет сравнительный анализ (Wood density in forests..., 2007).

В результате данные о плотности древесины, измеренные непосредственно, по-прежнему не достаточны, особенно для тропических регионов (Páscoa et al., 2020).

Несмотря на предложения альтернативных методов оценки плотности древесины, например, по связи между плотностью древесины и поверхностью листвы (Swenson, Enquist, 2008) или по связи между плотностью древесины основного ствола и ветвей (He, Deane, 2016), для калибровки оценок сохраняется потребность в прямых измерениях множества деревьев, в том числе методами неразрушающего контроля.

1.2. Пилодин-метод

Общие положения. Пилодин-тестер был разработан в Швейцарии и первоначально предназначался для определения степени поражения телефонных столбов мягкой гнилью (Cown, 1978, 1982; Hansen, 2000).

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, она обратно пропорциональна плотности древесины (рис. 1).

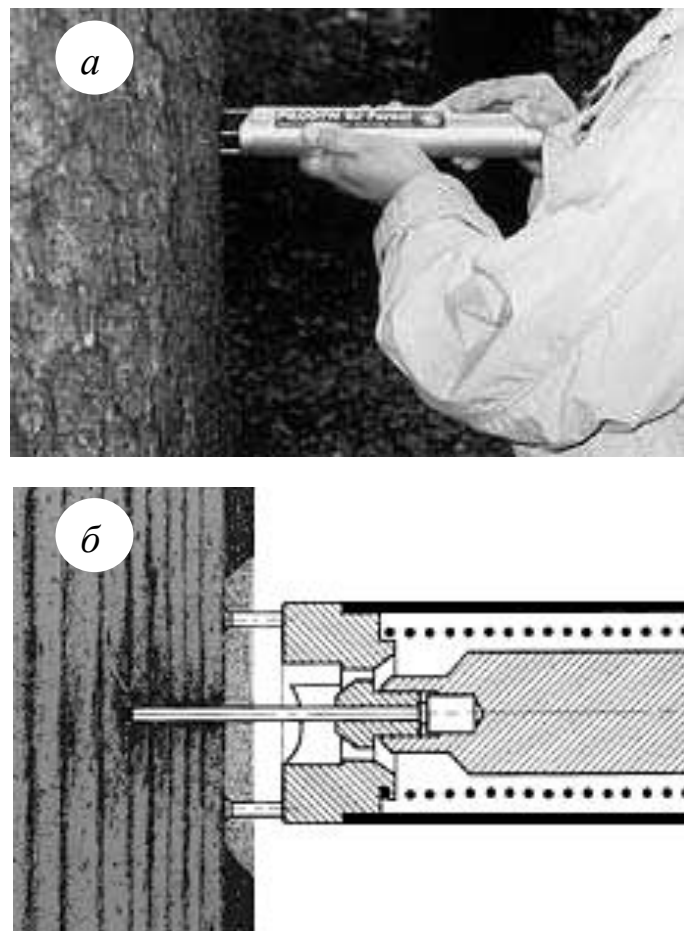


Рис. 1. Принцип работы (а) и схема (б) пилодин-тестера

Для применения в лесном хозяйстве рекомендуются модели «PILODYN 6J Bark» и «PILODYN 6J Forest». Обе модели работают по одному и тому же основному принципу, и их точность одинакова. Основное отличие двух 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» в Дании (Hansen, 2000).

Пилодин-тестер является перспективным инструментом для быстрой и экономичной оценки относительной плотности древесины в селекционных программах, когда требуются многочисленные и достаточно точные измерения.

Применение пилодин-метода в селекционных программах. Основные преимущества способа связаны с его быстротой и простотой и с неразрушающим отбором проб. Пилодин-тестер дает оценку не фактической, а относительной плотности древесины, которая может быть использована для ранжирования различных генетических единиц (например, клонов, семейств, провениенций) по данному показателю. Пилодин-метод оценки плотности древесины в селекционных программах был рекомендован несколькими исследователями (Selection of wood density..., 1988; Yanchuk, Kiss, 1993; Use of a Pilodyn..., 1996). В частности, в Зимбабве были выделены более 20 провениенций сосны в диапазоне глубин проникновения штифта от 20,2 до 24,6 мм. Сопоставление значений плотности древесины, полученных по извлекаемым кернам и по калибровочным показателям пилодина, свидетельствует о возможности использования метода для ранжирования провениенций и семейств. Использование пилодин-тестера для дифференциации объектов в пределах семейства по плотности древесины путем отбора проб у отдельных деревьев является более неопределенным, поскольку не все исследования подтверждают такую возможность (Hansen, 2000).

Далее, в селекционных программах в Нью-Брансуике была выявлена возможность применения пилодин-метода для сосны (Villeneuve et al., 1987). На примере 12 клонов криптомерии японской 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 (Efficiency of the indirect selection..., 2011). Использование пилодин-тестера в селекционной программе сосны ладанной позволило выявить наличие тесной генетической корреляции на уровне наследуемости 84 % (Utility of the Pilodyn..., 1983).

Однако значимой корреляции между плотностью древесины и глубиной проникновения иглы пилодин-тестера не было выявлено у 24-летней ели ситхинской (Effect of growth rate..., 2004), у 8-, 15-летней ели черной (Villeneuve et al., 1987) и у 12-, 14-летних дере-

вьев сосны приморской (Genetic control of pulp and timber properties..., 2002; Aguiar et al., 2003). Сделан вывод, что пилодин-тест не является надежным инструментом 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 кернов с помощью возрастного (приростного) бурава Пресслера, по измерению массы и объема которых в лабораторных условиях определяется их плотность. В экспериментах, проведенных П. Хоффмейром (Hoffmeyer, 1978) на деревьях пихты белой, получен коэффициент детерминации при оценке плотности древесины извлекаемого керна по глубине проникновения иглы, равный 0,50. Подобный эксперимент на стволах 10- и 30-летних деревьев сосны замечательной показал наличие коэффициента детерминации 0,92 и 0,74, соответственно (Cown, 1978, 1982), у ели европейской 0,81, туи гигантской 0,72, сосны Веймутова 0,71 и лиственницы европейской 0,69 (A critical analysis..., 2017), у сосны ладанной 0,66 (Taylor, 1981), у ели сизой 0,67 (Determination of wood specific gravity..., 1982), у трех видов сосен в Испании – от 0,48 до 0,50 (Density estimation..., 2007), у 10-летней сосны скрученной 0,27 (Selection for height growth..., 1999), у 34-летних деревьев сосны приморской разных провениенций 0,53 (Notivol et al., 1992), у 20-летней сосны ладанной (Utility of the Pilodyn..., 1983), 12-летней дугласии (Selection of wood density..., 1988), 15-летней ели Энгельмана (Yanchuk, Kiss, 1993) и у 7-летнего эвкалипта блестящего от 0,41 до 0,81 (Use of a Pilodyn..., 1996), а также у ели европейской в Германии 0,83 (Görlacher, 1987), у сосны Эллиота 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 370 кг/м³, 400 кг/м³ и 420 кг/м³, соответственно (Cown, 1982).

В практических целях важна плотность не столько древесины извлекаемого керна, 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 высоте груди (0,85 и 0,81, соответственно), а стандартная ошибка уравнения была ниже (7 и 13 кг/м³, соответственно). 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 (Cown, 1982).

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 обуславливает смещение оценок квалиметрических показателей. При измерении плотности древесины выше точки насыщения волокон влияния влажности на искомый показатель не обнаружено (Smith, Morrell, 1986; Influence of moisture content on the results..., 2018; The effect of moisture content..., 2015).

Плотность древесины изменяется по сечению ствола, и это влияет на точность определения ее среднего значения для ствола в целом. 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 помещен 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 волокон. Показатели базисной плотности являются наиболее точными, сопоставимыми 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 (GlobAllomeTree's wood density database..., 2014).

Наряду с понятием базисной плотности, широко применяется понятие удельного веса древесины (*wood specific gravity*). Плотность древесины – это масса древесины, приходящаяся на единицу ее объема, а удельный вес древесины – это безразмерное отношение плотности древесины к плотности воды. Поскольку плотность воды обычно составляет 1 г/см³, названные два показателя имеют одну и ту же величину, если измеряются при одинаковом содержании влаги (Glass, Zelinka, 2010; Williamson, Wiemann, 2010; GlobAllomeTree's wood density database..., 2014).

Предполагается, что при исследовании квалиметрии древесины растущих деревьев предпочтение оказывается «кажущейся» плотности, то есть плотности в свежем состоянии (A critical analysis..., 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 (Tree allometry and improved estimation..., 2005). Поскольку с помощью пилодин-тестера плотность древесины может быть косвенно измерена при относительно низких затратах, метод получил широкое распространение в лесоводственных исследованиях (Utility of the Pilodyn..., 1983; Villeneuve et al., 1987; De l'intérêt..., 1992; Pilodyn repeatability study..., 1993; Schermann, 1994; Rozenberg, van de Sype, 1996).

1.3. Квалиметрия методом сопротивления бурению древесины

Общие положения. Наряду с пилодин-методом, широкое распространение получила квалиметрия методом сопротивления бурению древесины, в частности торсиометр-метод (Polge, Keller, 1970; Nicholls, Roget, 1977; Nepveu, 1979) и резистограф-метод (Rinn et al., 1996; Chantre, Rozenberg, 1997; Лавров, 2015). Торсиометр-метод

основан на измерении крутящего момента на приростном бураве с помощью прикрепленной к нему калибровочной шкалы (рис. 2).

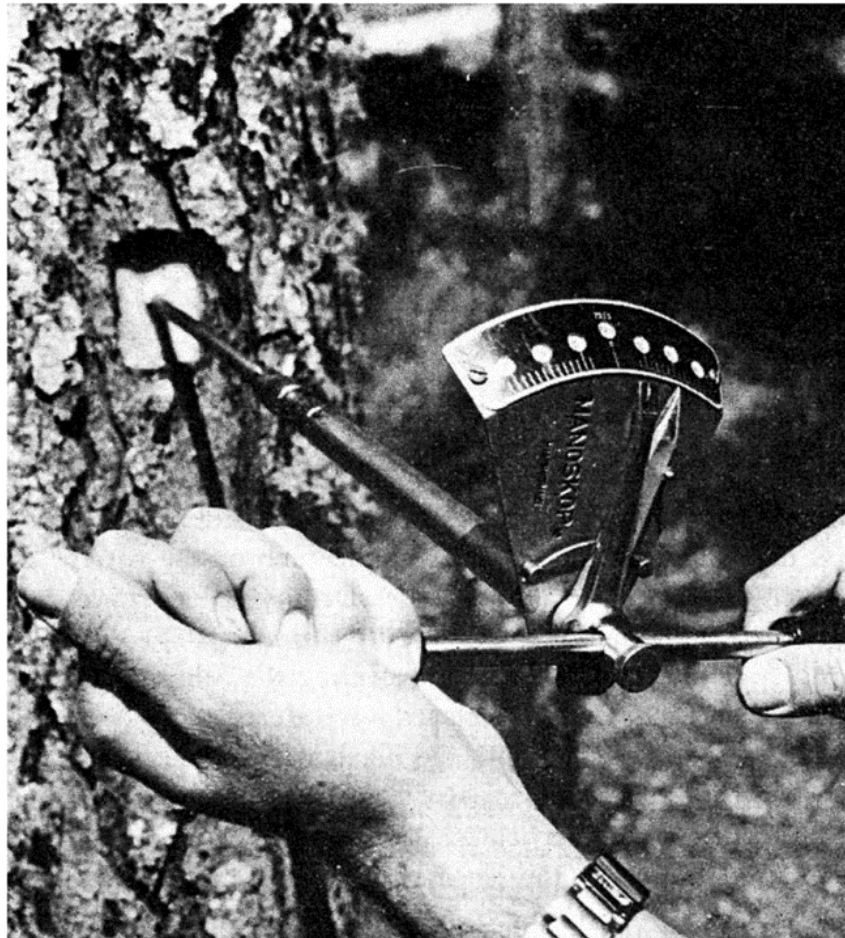


Рис. 2. Торсиомер, прикрепленный к возрастному бураву (Cown, 1978)

Резистограф представляет собой устройство, предназначенное для измерения мощности, необходимой для бурения отверстия в древесине ствола (рис. 3 и 4). С помощью ручной портативной дрели в ствол вводится иглообразное сверло. Его крутящий момент и (или) сопротивление тяге измеряются при прохождении через древесину и отображаются на графической бумаге или экране компьютера. Изменения амплитуды на графике показывают дисперсию плотности древесины и размер внутренней гнили относительно поперечного сечения. Метод и инструмент были разработаны Фрэнком Ринном (Rinn, 1989, 2012).

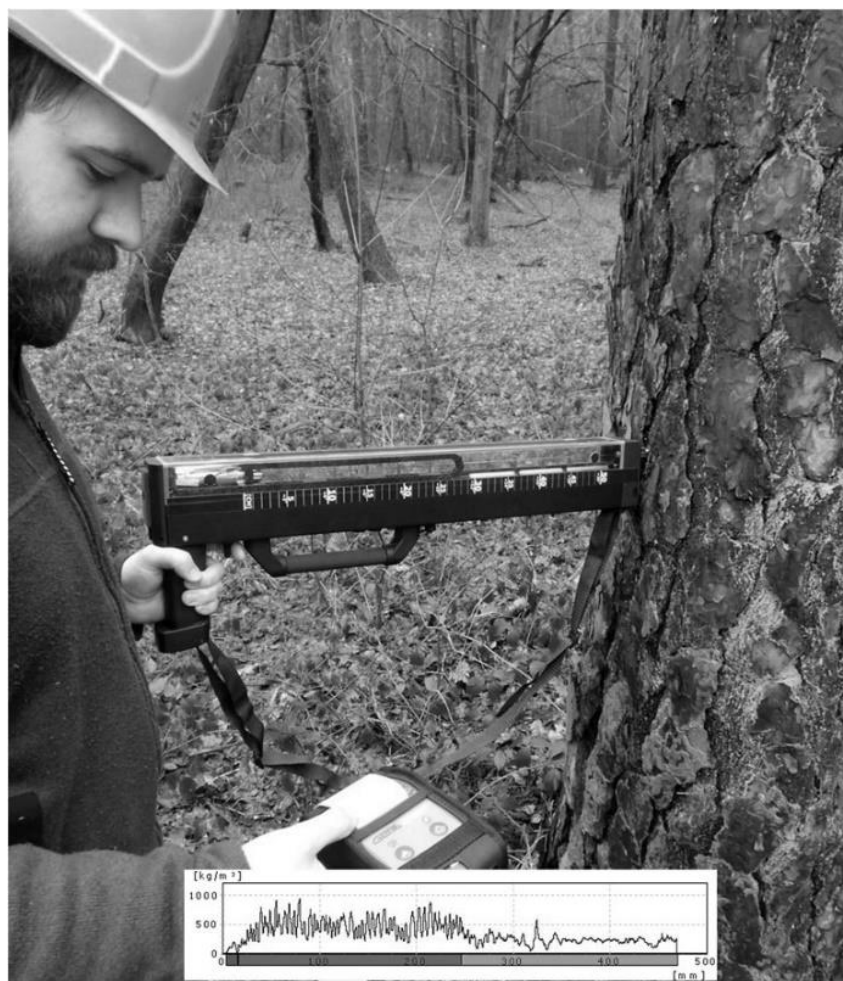


Рис. 3. Электронно-регулируемое резистивное сверление растущего дерева инструментом Resistograph® (A critical analysis..., 2017)

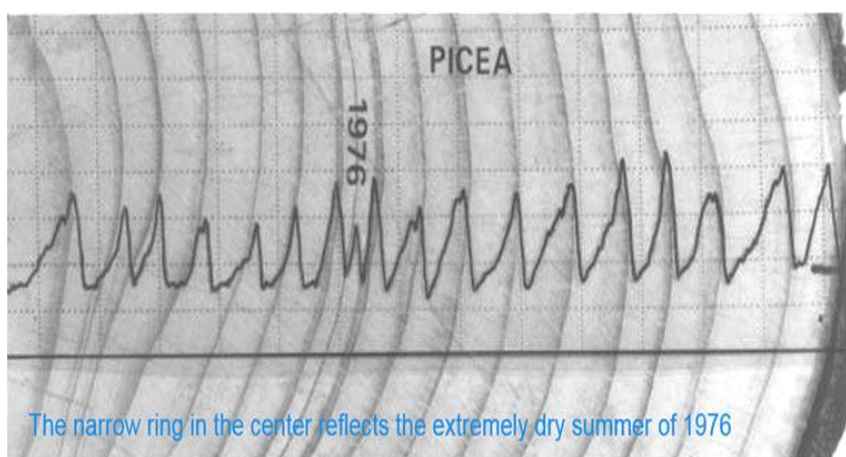


Рис. 4. Профилограмма изменения плотности внутри древесных колец, полученная резистивным бурением ствола ели европейской (A critical analysis..., 2017)

Резистограф-метод. В первом варианте бура с замером сопротивления бурению был 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 механизм (Rinn, 2012). После тысяч испытаний было установлено, что вал диаметром 1,5 мм и наконечником шириной 3 мм является хорошим компромиссом между минимизацией повреждений и максимизацией информации в профилях (Rinn 1989, 2012). В России В. И. Федюковым разработано устройство УНДПС-1 для неразрушающей диагностики физико-механических свойств древесины по величине сопротивления сверлению непосредственно в лесных условиях с одновременным извлечением керна для дальнейших исследований (Федюков и др., 2016).

Благодаря новым электронным усовершенствованиям инструмент Resistograph может одновременно измерять 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 (Mattheck 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 (A critical analysis..., 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 плотно-

стью древесины с коэффициентами детерминации 0,67 (Ceraldi et al., 2001), 0,44 (Zhang et al., 2009), 0,89 (Park et al., 2006), 0,93 (Can wood density..., 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 деревьев. 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; Evaluation of the resistograph..., 2008; Gwaze, Stevenson, 2008; Selection efficiency..., 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). Наблюдалась 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 щепу 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). Было рекомендовано использовать для оценки удельного веса древесины эвкалиптовых деревьев среднюю амплитуду сопротивления при бурении ствола лишь от коры до сердцевины, но не по всему радиусу (Oliveira et al., 2017).

При реализации французской селекционной программы было установлено, что пилотин-тестер не является надежным инструментом для оценки плотности древесины у молодых деревьев сосны приморской (Can wood density..., 2008), и был применен инструментарий на основе резистографа F-300S. Показания резистографа и плотность древесины кернов были ограничены внешним слоем, равным 5 см. Цель авторов состояла в том, чтобы по показаниям резистографа и

связанным с ними показателями плотности 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 (Can wood density..., 2008).

На основе данных исследования плотности древесины 622 деревьев сосны обыкновенной выполнена сравнительная оценка пилодин-тестирования и метода резистографа IML–RESI PD300. В качестве эталона использованы данные о плотности древесины, полученные на стационарной базе SilviScan (рис. 5). Для устранения завышения результата, вызванного трением бура о щепу, профили данных сверления были скорректированы. Аддитивные генетические корреляции эталонных данных со скорректированными результатами сверления и результатами пилодин-метода составили 0,96 и 0,71, соответственно. Тем самым показано, что для оценки плотности древесины сосны обыкновенной резистограф является более надежным инструментом по сравнению с пилодин-тестированием (Fundova et al., 2018).



Рис. 5. Общий вид установки SilviScan
(Non–Destructive Evaluation Techniques..., 2019)

В другом исследовании на примере елей сизой и Энгельманна с применением резистографа IML F300, ультразвукового устройства ST300TM, пилодин-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 является надежным неразрушающим инструментом для оценки плотности древесины ели *in situ* (Fundova, 2012).

Однако, 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; Genetic control of stiffness..., 1999. P. I.).

Влажность древесины в радиальном градиенте ствола, сопоставленная с результатами резистивного бурения, исследована у деревьев молодой эвкалиптовой плантации в Бразилии (Relationship between wood moisture..., 2017). Полученные результаты были 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 деревьев. В 5-миллиметровом периферийном слое ствола при объединении деревьев двух возрастов наилучший коэффициент корреляции между амплитудой и влажностью древесины составил минус 0,75. Более тесные связи исследуемых показателей выявлены у 64-месячных деревьев.

Торсиометр-метод основан на модифицированном возрастном бураве, активно применялся в исследованиях квалиметрии древесины в 1970-х гг. (Polge, Keller, 1970; Nicholls, Roget, 1977; Nepveu, 1979),

пока не были предложены более совершенные технологии. Сравнительный анализ торсиомер-метода и пилодин-метода в 10- и 30-летних клонах сосны замечательной показал существенное преимущество пилодин-метода. Коэффициент корреляции между величиной крутящего момента и плотностью древесины керна в 10- и 30-летних клонах составил 0,78 и 0,79, соответственно, а между глубиной проникновения пилодин-тестера и плотностью древесины минус 0,96 и минус 0,86. Объединенные данные пилодин-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, в ситуациях, в которых представляют интерес абсолютные значения плотности, необходимо периодически сверять результаты с данными кернов.

Сегодня торсиомер-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 пилодин-методом, вследствие более высокой чувствительности измерений.

1.4. Ригидомер-метод

С целью замера статических нагрузок и оценки структурной устойчивости и противостояния ветровалу деревьев было выполнено моделирование ветровой нагрузки городских деревьев путем нагибания стволов (Sinn, Wessolly, 1989). Для проведения эксперимента к верхней части кроны испытуемого дерева прикрепляли трос, прикрепленный к лебедке с динамометром или силомером, измеряющим величину прилагаемого усилия. Инклинометр регистрировал реакцию выкорчевывания, а эластометры измеряли упругие свойства древесины под нагрузкой (Mechanical stability of scots pine..., 2000; Brudi, Van Wassenaeer, 2002; Kane, Clouston, 2008; James et al., 2013).

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 (рис. 6), на стволе крепили консолеобразную конструкцию, к концу которой подвешивали груз, измеряли прогиб оси ствола под действием изгибающего момента и определяли соответствующий модуль упругости:

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

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 (Koizumi, 1987; Mamdy, 1995).

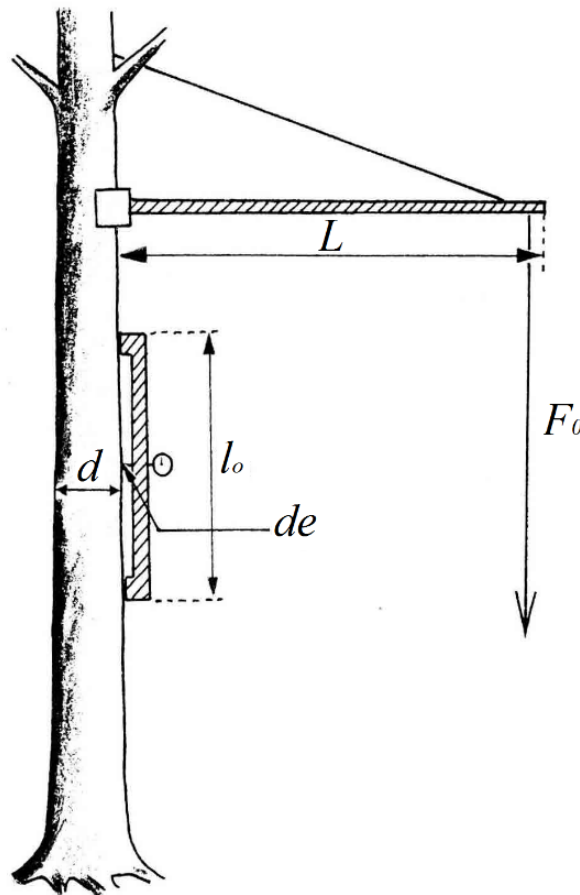


Рис. 6. Принципиальная схема ригидометр-конструкции (Genetic control of stiffness..., 1999. P. I.)

Согласно схеме эксперимента с 20 деревьями дугласии (5 клонов, по 4 дерева в каждом) во Франции были выполнены все необходимые измерения на растущих деревьях, и затем на выпиленных из этих же деревьев образцах получены значения модуля упругости свежей древесины и высушенной до влажности 12 %. Также в процессе рентгеновского микроплотностного анализа (X-ray method) была измерена плотность годовичных колец. 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, значения которого варьируются от 0,58 до 0,73. Был также установлен значительный клоновый эффект (Genetic control of stiffness..., 1999. P. I). Однако метод оказался слишком трудоемким и исключающим возможность выполнения множественных замеров при реализации селекционных программ (A new experimental device..., 2000).

В дальнейшем схема ригидометр-конструкции была усовершенствована (A new experimental device..., 2000). Принцип конструкции для испытания на чистый изгиб, обычно используемый в лаборатории для измерения модуля упругости, показан на рис. 7. Испытываемая балка помещается на опоры А и Б и нагружается двумя силами, равноудаленными от середины балки. При условии 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.

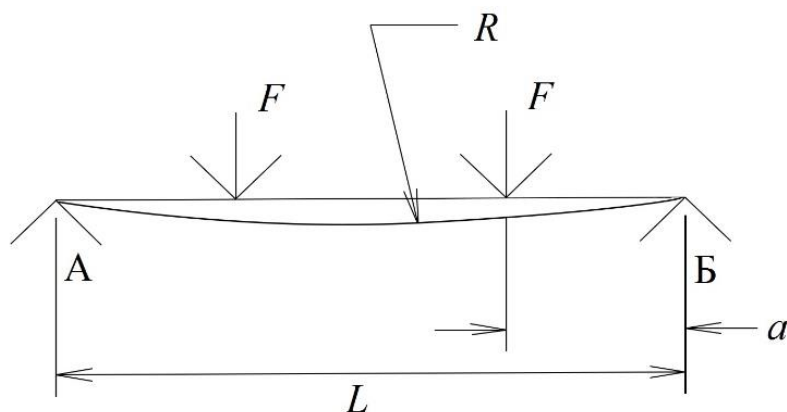


Рис. 7. Принцип испытания на чистый изгиб однородного цилиндрического бруса (A new experimental device..., 2000)

Экспериментальное устройство, разработанное на основе показанной схемы, состоит из двух независимых блоков (рис. 8). Первый предназначен для приложения изгибающей силы, 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. Портал крепится к стволу широкими стальными контактами 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 (A new experimental device..., 2000).

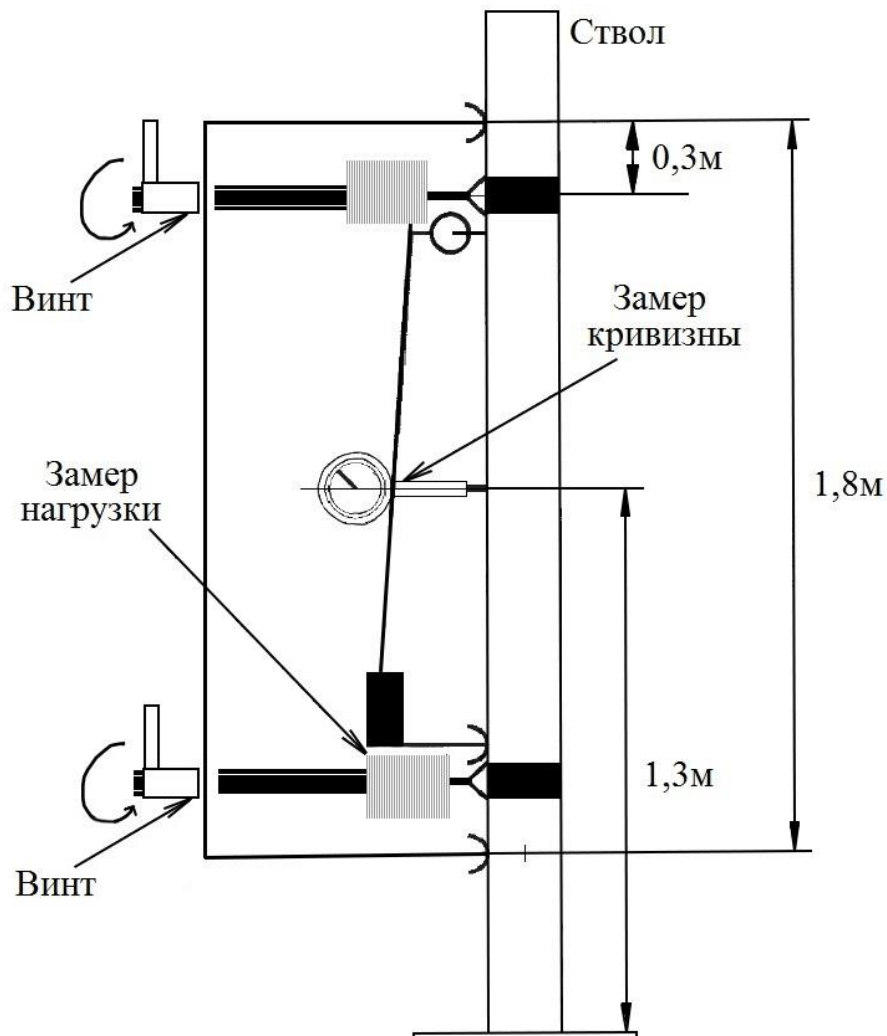


Рис. 8. Схема усовершенствованной ригидометр-технологии (A new experimental device..., 2000)

Устройство позволяет обработать до 50 деревьев в день. Величина модуля упругости (МОЕ), согласно схеме на рис. 8, рассчитывается по формуле (2):

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

где E – статический модуль упругости $МОЕ_{обр}$, МПа;

F – сила приложенная к брусу в данной точке, н;

a – расстояние от опоры до точки приложения нагрузки, мм;

d – диаметр образца (бруса), мм;

R – радиус кривизны, мм.

Коэффициент корреляции между показателями МОЕ, полученными на данном устройстве и на образцах, выпиленных из ствола, 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.

Сделан вывод, что предложенное устройство может быть эффективно использовано при массовых измерениях в различных селекционных программах (A new experimental device..., 2000; Rapid measurement..., 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 МОЕ образцов древесины. Показано, что МОЕ образца тесно связан с линейной комбинацией МОЕ ствола и положения образца на стволе. На среднем уровне генотипа МОЕ ствола 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.

Сделан вывод, что ригидометр является ценным инструментом для селекционеров, регулярно оценивающих и ранжирующих генотипы по квалиметрии древесины (Pâques, Rozenberg, 2009).

1.5. Акустические методы

Общие положения. Одна из причин того, что плотность, оцениваемая по дискам или кернам, является плохой оценкой качества древесины, заключается в том, что она не учитывает наличия сучков и других пороков в древесине. Поэтому системы, которые охватывают некоторый вертикальный диапазон ствола, имеют бóльшую возможность учета влияния пороков на качество древесины дерева и древостоя. Одним из возможных быстрых методов оценки качества древесины с учетом ее пороков является метод, основанный на скорости распространения акустических волн (СAB) в стволах деревьев (A new experimental device..., 2000; Bucur, 2006).

Акустические технологии хорошо зарекомендовали себя в качестве инструментов оценки материалов. Их использование получило широкое признание для контроля качества в деревообрабатывающей промышленности (Wang et al., 2007). С развитием портативных и простых в использовании инструментов, основанных на времени прохождения звуковой волны и резонансе, использование акустики в лесном секторе увеличилось, особенно в Новой Зеландии (Walker, Nakada, 1999; Tseheye et al., 2000; Chauhan, Walker, 2006), Австралия, США (Nondestructive evaluation of standing trees..., 2001, Assessment of decay in standing timber..., 2004), Венгрии (Nondestructive testing..., 2009; Divos, 2010) и Соединенном Королевстве (Searles, Effects of early respacing..., 2009). В Японии использовали ультразвуковые волны для оценки качества деревьев лиственницы и наблюдали значительные различия в акустических скоростях и значении модуля упругости для деревьев в древостоях разных местопроизрастаний и густот (Nakamura, 1996). Неразрушающие технологии, оборудование и процедуры оценки, возникшие в результате этих усилий, в настоящее время широко распространены, и их использование становится все более распространенным в лесной отрасли Европы (Acoustic evaluation of wood quality..., 2017).

Ортотропная природа древесины означает, что скорость звука зависит от направления его распространения (Effect of wood properties..., 2011). В продольном направлении ортотропной оси скорость звука самая высокая, а в тангенциальном направлении – наибо-

лее низкая (рис. 9). Соответственно, акустическое затухание в продольном направлении самое низкое (Vucur, Feeneu, 1992). По мере смещения канала продольного прохождения звука от ядра к наружным слоям его скорость увеличивается (траектории *a* на рис. 9).

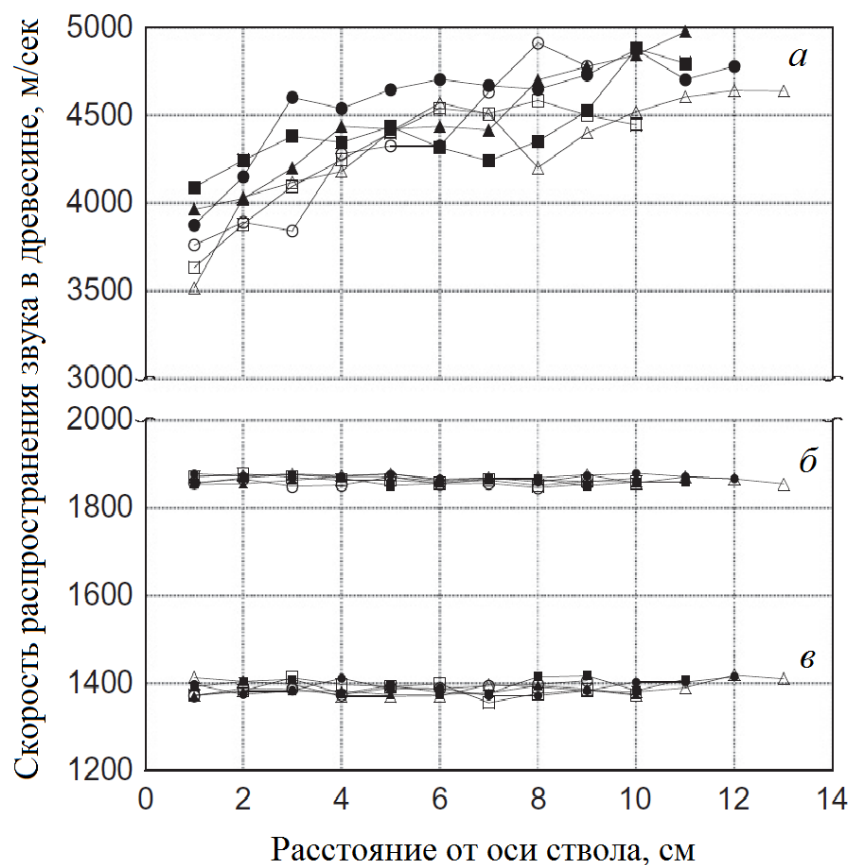


Рис. 9. Зависимость скорости распространения звука в трех ортотропных направлениях древесины кипарисовика японского: расстояние от оси ствола до центра сечения ствола: (*a*), (*б*) и (*в*) продольное, радиальное и тангентальное направления, соответственно, (Effect of wood properties..., 2011)

Механическое зондирование – это хорошо зарекомендовавший себя в лесном хозяйстве метод постукивания по стволу дерева деревянным или резиновым молотком и прослушивания характерного барабанного отклика, указывающего на наличие внутреннего дупла. Это происходит в результате ослабления или сглаживания звуковой волны по мере ее прохождения через полый поперечный участок ствола (Mucciardi et al., 2011; Luley, Ellison, 2017, 2018).

Таймеры акустических волн напряжения – это электронные портативные инструменты, которые используют принцип, согласно которому звуковые волны проходят через древесину с разной скоростью в зависимости от плотности (Assessment of decay in standing timber..., 2004). Кроме того, внутренние препятствия, такие как трещины или полости, увеличат воспринимаемое время прохождения сигнала, вызванного ударом волн напряжения, когда они распространяются по сечению ствола дерева. Таймеры волн напряжения используются на стоящих деревьях в городском лесу в качестве простого неразрушающего инструмента для определения внутреннего состояния древесины в пределах испытываемого поперечного сечения ствола (Mattheck, Bethge, 1993).

Таймеры волн напряжения состоят из двух акселерометров, прикрепленных к гвоздям, шурупам или шипам с неглубоким соединением с древесиной сразу за корой, размещенных на противоположных сторонах ствола или ветви, на которых отбирается образец (рис. 10).



Рис. 10. Принцип применения микросекундного таймера Fakopp при тестировании диска ствола (Allison et al., 2020)

Акселерометры подключены электрическими проводами к основной электронной плате, предназначенной для отображения времени

в микросекундах, за которое волна напряжения, вызванная ударом, проходит от стартового акселерометра до принимающего по стволу или ветви дерева. Затем это число делится на количество дюймов или сантиметров в траектории перемещения, чтобы определить время прохода сигнала за единицу измерения. Если известно ожидаемое время прохода сигнала у данного древесного вида, то можно провести сравнение и вынести суждение о структурном состоянии дерева (Vucur, 2004).

На рис. 11 показано использование микросекундного таймера Факорр в полевых условиях при тестировании клена в кампусе Университета Висконсин-Мэдисон.



Рис. 11. Использование микросекундного таймера Факорр в полевых условиях при тестировании клена в кампусе Университета Висконсин-Мэдисон (Allison et al., 2020)

Использование волн напряжения для обнаружения дефектов и гнилей в древесине основано на наблюдении, что движение звуковых волн через древесину напрямую связано с ее физическими и механическими свойствами. Волны напряжения распространяются в гнилой или дефектной древесине медленнее, чем в здоровой. У лиственных деревьев (дуб и клен) можно ожидать, что время прохождения волны напряжения по диаметру ствола составит от 7 до 9 микросек/см. Числа, превышающие это значение, указывают на наличие препятствия прохождению звуковой волны. Это может быть трещина, полость или гниль. На хвойных деревьях с меньшей плотностью древесины (ель или сосна) волна напряжения будет распространяться дольше, достигая значения от 10 до 12 микросек/см (Allison et al., 2020).

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 контроле 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..., 1998; И. Ермолов, М. Ермолов, 2006).

Акустические методы позволяют обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты ствола, они делятся на две категории:

- активные, использующие излучение и прием акустических колебаний;

- пассивные, основанные только на приеме колебаний (Ланге, 1991; Симоненко, 2014).

Достоинства акустических методов: возможность контроля при одностороннем доступе к изделию; 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 скорости акустической волны (СAB) в древесине в качестве показателя ее качества получила широкое признание в деревообрабатывающей промышленности 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 квалитметрической оценки в процессе формирования древо-стоя (Полубояринов, 1974; 1976б), что позволило осуществлять управление, планирование, заготовку и обработку древесины таким образом, чтобы максимизировать извлекаемую из лесных ресурсов стоимость (Acoustic assessment..., 2007; Ross, 2015; Carter, 2017).

Измерения САВ и их неопределенности. Измеренное у растущих деревьев значение САВ обычно используется при оценке модуля упругости по формуле (3):

$$MOE = \rho \cdot (AV)^2, \quad (3)$$

где MOE – динамический модуль упругости;

ρ – плотность свежей древесины;

AV – скорость распространения в древесине (САВ).

Величина ρ 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 (Influence of initial planting spacing..., 2009; Wang, 2013; Acoustic evaluation of loblolly pine..., 2017).

У растущих деревьев САВ оценивается измерением 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 передающий сенсорный зонд и приемный акселерометр, соответственно, и величина САВ определяется отношением d/t (Non-Destructive Evaluation Techniques..., 2019).

Сенсоры работают на частоте 1...2 кГц, акустическая энергия генерируется в дереве посредством удара молотком. Расстояние d (рис. 12) измеряется ультразвуковым сигналом, проходящим между передающим и приемным устройствами, и дистанционно фиксируется регистрирующим устройством (Paradis et al., 2013).

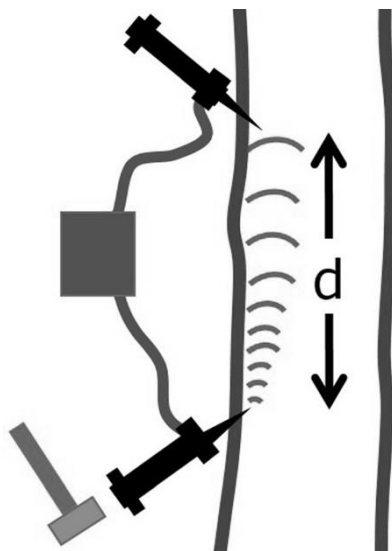


Рис. 12. Схема «ударного» метода измерения скорости распространения звуковой волны в древесине растущих деревьев (Legg, Bradley, 2016)

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 волнами. 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;

Elastic constants measurement..., 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 их 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 (Acoustic assessment..., 2007; Auty, Achim, 2008), тогда как квалиметрия древесины растущего дерева существенно изменяется по радиусу ствола (Колесникова, Мазуркин, 1997).

Поэтому при акустическом анализе квалиметрии древесины бревен и изделий в качестве альтернативного обычно находят применение резонансный и ультразвуковой методы (Mechanical properties assessment..., 2010; Vaar et al., 2012; Legg, Bradley, 2016), которые в отличие от зондирования только внешних слоев ствола, являются репрезентативными 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. 13а 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 (Relationship between acoustic variables..., 2009).

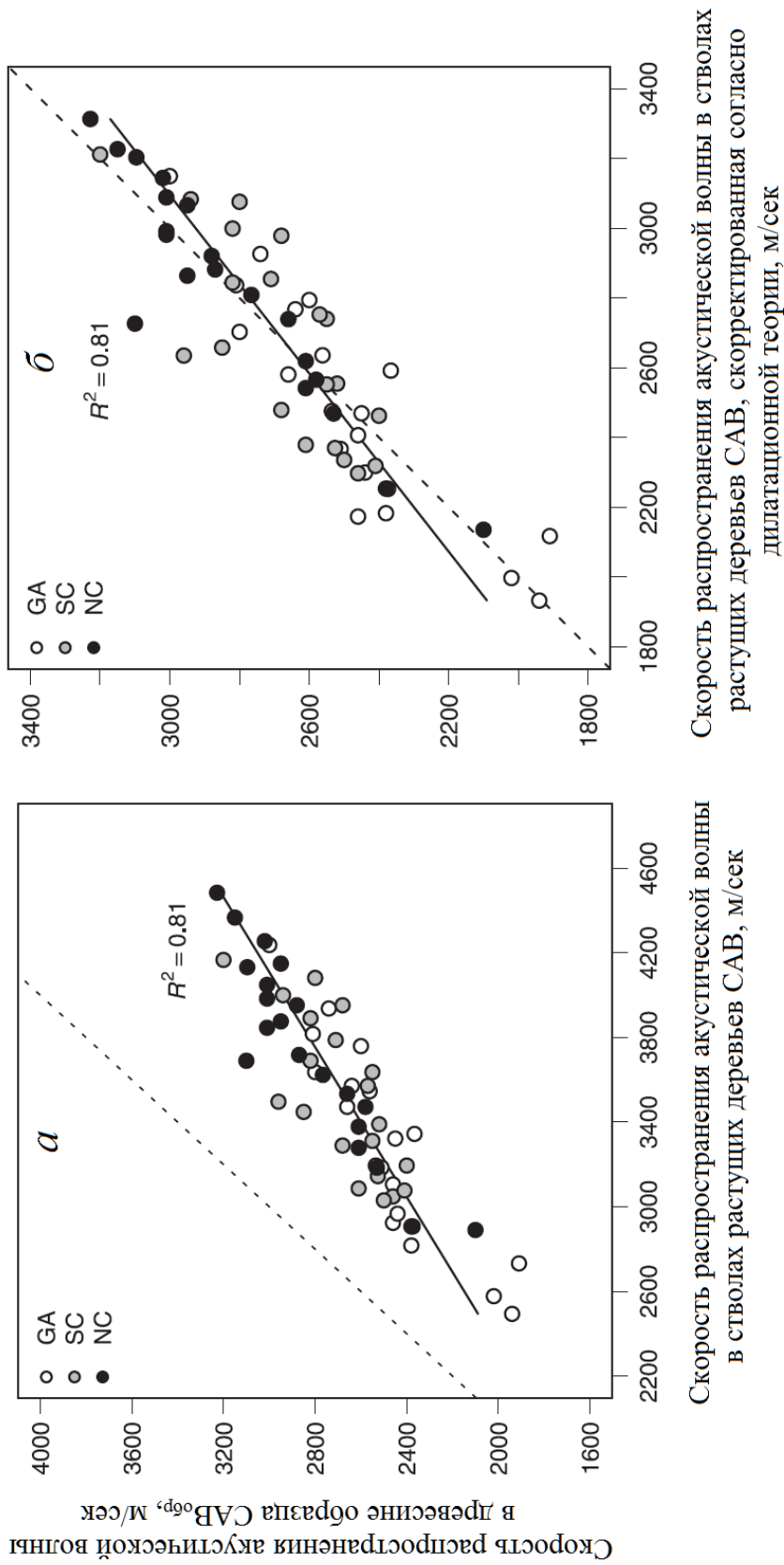


Рис. 13. Измеренные (а) и скорректированные (б) скорости распространения акустической волны в древесине растущих деревьев (САВ) сосны ладанной в сравнении со скоростями, измеренными в образцах, вырезанных из тех же стволов ($CAB_{корр}$) (Relationship between acoustic variables..., 2009)

Путем введения корректировочного коэффициента в значения САВ согласно дилатационной теории (Andrews, 2003) названное смещение было сведено практически к нулевому уровню (0,02 %) (рис. 13б).

Сравнение выполнено одновременно по трем происхождениям: GA, SC и NC – центральная Джорджия, Южная Каролина и Северная Каролина Атлантического побережья, соответственно. Пунктиром показана линия равных значений.

Перечисленные три метода представлены схемой на рис. 14. 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 методом 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. 14б).

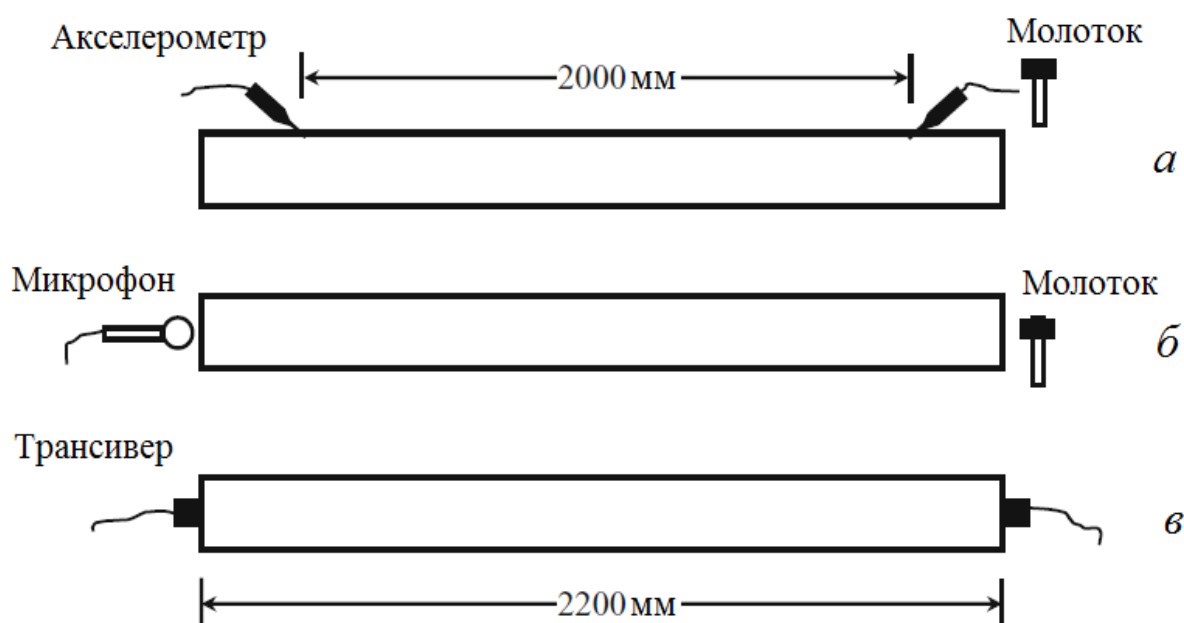


Рис. 14. Схема трех методов звукового зондирования древесины:
 а – измерение ударной волны (то же, что на рис. 10);
 б – резонансный метод; в – ультразвуковой метод
 (Mechanical properties assessment..., 2010)

Ультразвуковые сенсоры представляют собой акустические датчики трех категорий:

- передатчики;
- приемники;
- приемопередатчики (трансиверы).

Передатчики преобразуют электрические сигналы в ультразвук, приемники преобразуют 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 ультразвуковым таймером 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 (СВВ) вычислялась путем деления расстояния между сенсорами (d) на время прохождения волны (t) (см. рис. 14в).

В нашей стране методы ультразвуковых и резонансных звуковых испытаний древесины проводятся с 1960-х гг. (Уголев, 1965; Никишов, 1966; Перелыгин, 1969). За рубежом методами ультразвуковой томографии оценивается степень интерференции, вызванной наличием сучков и смещением сердцевины (Interference of pith..., 2017). Путем измерения продольной и радиальной скоростей волн оценивается базисная плотность древесины корней (Physical and Mechanical Characterization of Roots..., 2017), стволов эвкалиптовых клонов (Evolution of *Eucalyptus* clone's parameters..., 2017) и нескольких потомств сеянцев сосны приморской (Prediction of wood properties in trees..., 2017), определяется квалиметрия древесины молодых тополей 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 (67 % изученных видов), в корнях и ветвях (33 %), в стволе и ветвях (50 % видов)

(Comparison among..., 2017). Однако каких-либо закономерностей в изменении скорости распространения волны в различных компонентах дерева (корень, ветви и ствол) не было найдено.

Многочисленными исследованиями установлено, что «ударный» метод определения САВ завышает значения МОЕ по сравнению с резонансным и ультразвуковым методами, примененными на растущих деревьях и бревнах (Yang et al., 2003; Baar et al., 2012; Hassan et al., 2013). Это завышение составило 32 % по сравнению со скоростью, измеренной по всему сечению образца древесины, вырезанного из того же ствола (Relationship between acoustic variables..., 2009). Поэтому практикуется корректировка менее точных (смещенных) результатов посредством более точных путем прямого сопоставления (рис. 13а, б) (Ikeda, Arima, 2000; Chauhan et al., 2006; Grabianowski et al., 2006; Acoustic assessment..., 2007; Wang et al., 2007; Relationship between acoustic variables..., 2009; Legg, Bradley, 2016; Predicting structural timber..., 2019).

В работе В. И. Федюкова (1998) представлены результаты комплексных лесоводственно-дендроакустических исследований, позволивших разработать неразрушающие способы отбора резонансного сырья на корню и в лесоматериалах. Автором разработаны, изготовлены и внедрены 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 диапазонах 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, процент поздней древесины, количество годичных колец), прочность, динамический модуль упругости, низшая собственная частота колебаний образца консольного крепления. На основе теоретического исследования и анализа методов диагностики для неразрушающей ранней диагностики технического качества подроста предложено устройство «Резонанс-4», позволяющее оптимизировать процесс определения свойств древесины (Федюков и др., 2016).

Мультисенсорная акустика. Известны многодатчиковые акустические приборы (Application and comparison of three tomographic..., 2003), применяющие тот же принцип, что и таймер одноканальной волны напряжения, но отличающиеся использованием до двенадцати акселерометров или более. Они располагаются по окружности ствола для создания матрицы измерений с результатами, обработанными программным обеспечением компьютерной проекции и отображаемыми визуально в виде томографа (рис. 15).



Рис. 15. Тестирующая мультисенсорная акустическая томография для регистрации распространения внутренних дефектов в стволе крупного дерева (Allison et al., 2020)

Каждый из акселерометров по очереди отправляет сигнал, а компьютер измеряет время прохождения сигнала по каждому из других акселерометров. Эта информация обрабатывается полевым компьютером, создающим компьютерно-томографическое представление изменяющихся скоростей волн напряжения по измеренному поперечному сечению ствола. Это самокалибрующаяся шкала, показывающая несколько цветов, представляющих квадранты воспринимаемого изменения плотности от наиболее плотной к наименьшей. При интерпретации результатов эксперимента важно знать, что изображение томографа не является точным представлением местоположения и площади какого-либо внутреннего дефекта, а скорее отображением измеренных изменений скорости звука в поперечном сечении (Allison et al., 2020). Например, трещина может вызвать тень звуковой волны, превышающую фактический дефект. Однако при тщательной интерпретации акустический томографический инструмент может помочь определить степень, тип и приблизительное местоположение дефектной и здоровой древесины (Divos, Szalai, 2002; Wang et al., 2009; Modeling permafrost thaw..., 2014; Rinn, 2017; Ostrovsky et al., 2017).

Примеры неразрушающей квалиметрии 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 (Using Acoustic Sensors..., 2011). При измерении САВ бездефектных участков ствола получены довольно устойчивые оценки модуля упругости МОЕ (Nondestructive evaluation of standing trees..., 2001). Для древесных видов России связь МОЕ с $MOE_{обр}$ характеризовалась величиной R^2 , варьируемой 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 (Перелыгин, 1969).

На основе проведенных испытаний акустических методов на деревьях сосны обыкновенной в Шотландии рассчитаны линейные зависимости модулей МОЕ и MOR от величины САВ, измеренной на выпиленных образцах ствола растущих деревьев с помощью Hitman

ST300, объясняющие 53 и 59 % общей изменчивости искомых показателей, соответственно. Аналогичные зависимости MOE и MOR от плотности древесины при 12 %-й влажности объясняли 41 и 49 % изменчивости, соответственно. Для оценки влияния камбиального возраста дерева на MOE и MOR рассчитана нелинейная модель с коэффициентами детерминации 0,58 и 0,54, соответственно. Значимого различия сосен естественного и искусственного происхождений по показателям MOE и MOR не установлено, возможно вследствие несоблюдения требуемой чистоты эксперимента (Auty, Achim, 2008). В то же время у ели черной в плантациях квалиметрические показатели древесины были существенно ниже, чем в естественных древостоях (Impact of plantation..., 2002).

В отличие от изложенных результатов эксперимента с сосной, у молодых деревьев дугласии во Франции не было обнаружено никакой связи между MOE 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 от 0,015 до 0,16 (Ruggirello, 2017). В то же время у ели сизой в Канаде зависимость MOE 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 (Using acoustic tools..., 2010). У дугласии в США зависимость MOE от САВ характеризовалась коэффициентом детерминации 0,740, 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 MOE дугласии до 88 % (Trejo, 2015).

Отмеченное низкое значение коэффициента детерминации при определении MOE 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 (Acoustic sorting models..., 2013). Но низкий коэффициент детерминации (0,164) в зависимости MOE от плотности свежей древесины в выше упомянутом эксперименте (Trejo, 2015) трудно объяснить, поскольку плотность древесины

является одним из ключевых детерминантов МОЕ (Zobel, van Buijtenen, 1989; Cell wall structure..., 2003), и в бездефектной древесине она определяет 60...70 % изменчивости (Genetic control of stiffness..., 1999. P. II; Evans, Пис, 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 величины 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; Effect of thinning on relationships..., 2008), другие же отмечают отсутствие между ними какой-либо связи (Chauhan, Walker, 2006; Influence of initial planting spacing..., 2009).

Линейная модель зависимости МОЕ ели черной в Канаде от трех независимых переменных (квадрат величины 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 (Wood Quality Characterization..., 2021). Содержание влаги в древесине также варьирует в пределах 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) (Nondestructive evaluation of standing trees..., 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 4-факторная модель, включающая только структурные независимые переменные (диаметр ствола, длину кроны, сбеги ствола и густоту древостоя) – лишь 55 % изменчивости (Modeling lumber..., 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 величине 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 (Acoustic characterization..., 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° к одному и тому же срезу). Результаты показали, что существуют различия в скоростях звука между древесными видами. 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 (Acoustic characterization..., 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 окончаниям, но при фиксированном месте взятия образца на ветви получена устойчивая зависимость (Hsu, 2003).

Корреляция квалитетрии и САВ в связи с прореживаниями.
В число основных лесохозяйственных мероприятий входит регулиро-

вание густоты древостоев прореживанием (рубки ухода), а также селекция перспективных форм и клонов (Savill, Sandels, 1983; The practice of silviculture..., 1997; Effects of stand density and seedlot..., 2015).

Был представлен обзор наилучших методов прореживания древесины твердых пород (Hawe, Short, 2016), но до сих пор не ясно, повышает или снижает прореживание качество древесины хвойных пород (Krajnc et al., 2019a), хотя в древостоях лиственных пород прореживание всегда рекомендуется. Деревья, срубленные при первом прореживании, имеют небольшой диаметр и считаются низкокачественными. Древесина твердых пород, получаемая при прореживании, в основном используется для производства энергии (Doran, 2012; Mockler, 2013) или в виде щепы в производстве древесных плит или в целлюлозно-бумажной промышленности (Llana et al., 2020).

Оценке влияния прореживаний древостоев на квалитетную древесину посвящены многочисленные исследования, и в целом выявлено их отрицательное влияние на ее плотность у ели европейской (Grammel, 1990; Herman et al., 1998), у дугласии (Harpla, 1985), сосны замечательной (Modelling variation in wood density..., 2015), сосны ладанной (Aslezaeim, 2016), у ели ситхинской (Nondestructive evaluation of standing trees..., 2001; MacDonald, 2002; Vihermaa, 2010), сосны обыкновенной (Мелехов и др, 2003; Effects of early thinning regime..., 2007). Авторы объясняют это изменение увеличением радиального прироста и доли ранней древесины у деревьев после прореживаний. Однако другая часть исследователей пришла к противоположному выводу в отношении ели ситхинской (Moore et al., 2009), дугласии (Modelling the variation in wood density..., 2017) и ели черной (Vincent et al., 2011). Отсутствие какого-либо влияния прореживаний на величину МОЕ было показано у деревьев тсуги западной (Nondestructive evaluation of standing trees..., 2001). Поскольку у сосны ладанной были обнаружены отрицательные корреляции между МОЕ и скоростью роста (от минус 0,21 до минус 0,48), сделано предположение, что одновременное повышение прочности древесины и скорости роста дерева в селекционных экспериментах является проблематичным (Eckard, 2007).

Для снятия этой неопределенности проведено крупномасштабное исследование древостоев дугласии, ели европейской и ели 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 величина 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 разный. Снижение плотности древесины в результате прореживаний редко превышало 20 % и 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 (Linking acoustic velocity..., 2014).

В 60-летних плантациях калабрийской сосны, расположенных в Варко-Сан-Мауро в Италии, были заложены четыре пробные площади, включающие контроль и секции слабого, промежуточного и сильного прореживания (Acoustic evaluation of wood quality..., 2017). Прореживания проводились с интервалом в 8–10 лет. Был применен акустический метод оценки качества древесины растущих деревьев как практичный и недорогой (Lindström et al., 2009). Установлена тесная связь между МОЕ растущих деревьев, диаметром их ствола и режимом прореживания древостоя. Минимальные МОЕ оказались в секции без прореживания (на контроле) и секции сильного прореживания и максимальные в секциях слабого и умеренного прореживания. Показано, что диаметр ствола оказывает значительное влияние на результат измерения акустических волн и имеет существенную связь с МОЕ. Полученные результаты подтверждают, что методы неразрушающего волнового воздействия могут быть использованы для отслеживания изменений свойств древесины у растущих деревьев, и тем самым помогут лесоведам и промышленным пред-

приятным в управлении лесными насаждениями для достижения желаемых качеств древесины и волокон (Nondestructive evaluation of standing trees..., 2001). Кроме того, информация, полученная с помощью акустических методов, может быть актуальна для селекции деревьев, оценки перед конечной рубкой и поддержки принятия решений во время прореживания. Благодаря постоянному прогрессу и усовершенствованию эта технология может помочь в управлении качеством древесины, оценке ценности леса и улучшении качества древесины лесов будущего (Wang et al., 2007; Acoustic evaluation of wood quality..., 2017).

Корреляция квалитетрии и САВ в селекционных программах. Наибольшее распространение оценка САВ в древесине растущих деревьев получила в программах селекционных испытаний деревьев, где требуется большое количество измерений (Inheritance and genetic gain..., 2008; Apiolaza, 2009; Lindström et al., 2009; Genetic improvement..., 2013; Measuring stiffness..., 2015).

С целью оценки квалитетрических характеристик свойств древесины в раннем возрасте в терминах селекции и генетического совершенствования вида выполнено исследование древесины 9-летней сосны приморской (Solid wood quality..., 2017). Измерения САВ проводились на растущих деревьях в продольном и радиальном направлениях, а на выпиленных образцах был применен стандартный метод испытаний на упругость (МОЕ) и разрыв (МОР). Не установлено достоверной корреляции плотности древесины ни с МОЕ ($r = 0,16$), ни с МОР ($r = 0,20$). Но САВ в продольном и тангенциальном направлениях имела значительную положительную корреляцию как с МОЕ, так и с МОР 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 коэффициент детерминации 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 наследуемость по плотности древесины (Genetic improvement..., 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 легко определяемых показателей (диаметр на высоте груди, отношение высоты к диаметру, плотность древесины) улучшает оценку МФА. Сделан вывод, что определение САВ в ювенильном возрасте вполне подходит для оценки качества древесины в контексте селекции деревьев (Genetic improvement..., 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 восьми 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 влияния 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 в диапазоне 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 ре-

зистографа была высокой для отбора клонов по плотности древесины, умеренной для МОР и довольно низкой для МОЕ (Eckard, 2007).

Измерения САВ в древесине (инструмент TreeSonic) были хорошо воспроизводимыми и имели умеренные и очень значимые средние корреляции с механическими свойствами, но слабые с плотностью древесины. Таким образом, САВ была высокоэффективна при отборе клонов по МОЕ, умеренной по МОР и слабой 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.

Сделан вывод, что акустические методы и резистивное бурение могут быть уверенно 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 экологически обусловленных ошибок в измерениях (Eckard, 2007).

В США была исследована возможность использования акустического инструмента и статистических методов для дифференциации 17-летних деревьев сосны ладанной, восприимчивых и толерантных к корневым грибам (Applying discriminate analysis..., 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 (Applying discriminate analysis..., 2017).

Корреляция квалитетрии и САВ в селекционных программах в контексте неопределенности их целевых установок. Как отмечалось выше, прореживания, с одной стороны, направлены на увеличение пространства и скорость роста деревьев, но, с другой стороны, снижают квалитетрию древесины вследствие увеличения ширины годичных колец и доли ранней древесины. Селекция перспективных форм и клонов направлена, с одной стороны, на отбор быстрорастущих форм, а с другой, – на отбор форм, обладающих повышенными механическими свойствами (Implications of selection history..., 2008;

Genetic correlations..., 2009; Effects of stand density and seedlot..., 2015).

С целью снятия этих очевидных неопределенностей в Новой Зеландии было исследовано влияние густоты древостоев сосны замечательной и результатов селекционных экспериментов прошлых лет на квалиметрию ее древесины (Effects of stand density and seedlot..., 2015). Проведен трехфакторный эксперимент, включающий четыре градации культур по начальной густоте, каждая из которых включала 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.

Установление положительной корреляции модуля упругости и густоты древостоев сосны замечательной (Effects of stand density and seedlot..., 2015) подтвердило аналогичные выводы, полученные другими исследователями как по сосне замечательной (Lasserre et al., 2005; Effect of thinning on relationships..., 2008; Waghorn et al., 2007; Influence of stocking..., 2011), так и по другим видам (Brazier, Mobbs, 1993; Effects of pre-commercial thinning..., 2006; Effects of early respacing..., 2009). Чтобы не снижать квалиметрические показатели древесины, рекомендовано избегать интенсивных ранних прореживаний культур сосны замечательной (Effects of stand density and seedlot..., 2015).

В Турции было изучено влияние различий клонов и исходной густоты посадки путем акустических измерений САВ с помощью микросекундного таймера Fakopp и определения механических свойств древесины 12-летних гибридных тополей. Было задействовано 100 модельных деревьев, по пять от каждого клона, и в каждом клоне по пять градаций начальной густоты. Для исследования взяты отрезки стволов длиной 1 м. Базисная плотность клонов варьировала от $0,32 \text{ г/см}^3$ до $0,42 \text{ г/см}^3$. Существенные различия между клонами выявлены также по величине САВ. Что касается густоты посадки, то связи искомым показателей с ней не обнаружено. Сделан вывод, что измерения САВ (мониторинг квалиметрии), выполненные на расту-

щих деревьях, имеют перспективный потенциал при формировании гибридных тополевых насаждений (Dündar et al., 2017).

Сравнение технологии САВ с другими неdestructивными методами. Группой исследователей оценивалась пригодность использования ультразвукового инструментария и пилодин-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 пилодин-методом и плотностью древесины ($r = -0,96$), а также между САВ и углом микроволокон ($r = -0,94$). Сочетание измерений пилодин-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 (Estimating solid wood..., 2015).

На примере лиственницы японской выполнено сравнение САВ-методологии и пилодин-тестирования (Prediction of the mechanical properties..., 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 МОЕ составил 0,834. Обнаружена значимая отрицательная корреляция (минус 0,859) между глубиной проникновения штифта (пилодин-метод) и средним MOR древесины. Регрессионная связь средних значений МОЕ и MOR древесины с независимыми переменными САВ и пилодин-отсчет, характеризуется высокими коэффициентами детерминации (Prediction of the mechanical properties..., 2008).

На северо-востоке Китая было протестировано 100 поперечных сечений деревьев ясеня и тополя четырьмя методами: 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 предпочтительно использовать на средней стадии разложения (Quantitative detection..., 2017).

На примере четырех лиственных видов оценивались различия скоростей звуковых волн между акустическим и резонансным методами. Различия в скоростях между акустическим и резонансным методами зависят от древесного вида и возраста. Включение в анализ диаметра ствола улучшает оценку прочности на изгиб, но не оценку твердости. Были обнаружены большие различия между скоростями, полученными акустическими и резонансными методами. Модели, основанные на обеих скоростях неразрушающего контроля вместе с учетом видового разнообразия, хорошо коррелируют с модулем упругости при изгибе, в то время как модели, включающие диаметр ствола, умеренно коррелируют с прочностью на изгиб. Включение плотности в модели не улучшает оценку (Llana et al., 2020).

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) (Association of ultrasonic tomography..., 2017). Результаты показали, что томография является информативной 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. Совмещая обе технологии, 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 еще 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, располагают еще как минимум 15 другими чувствами, которыми человек не располагает (Манкузо, Виола, 2019). До сих пор официальной наукой не признан (поскольку не объяснен) так называемый «эффект Кирлиан» (В. Кирлиан, С. Кирлиан, 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. Все это легло в основу понятия «интеллект растений», хотя физические носители этих «интеллектуальных» отношений у растений в большинстве своем пока не известны или не объяснены (Trewavas, 2003; Garzon et al., 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 (Effect of thinning on relationships..., 2008; Murphy, Cown, 2015; An acoustics operations study..., 2016). Оно является 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 (Non-Destructive Evaluation Techniques..., 2019).

1.6. Радиационные методы

Исследования по применению радиационных методов определения плотности древесины получили свое развитие в конце 1950 – начале 1960-х гг. Основанные на использовании β -, γ - 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 квалификации 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 β -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 β -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 годовичных слоев, а также плотности ранней и поздней древесины. Полученные графики также позволяют оценивать степень контрастности годовичных слоев и сравнивать изменчивость плотности образцов древесины разных деревьев. При этом основным недостатком β -лучевого метода является большая трудоемкость (Симоненко, 2014).

Метод γ -лучевого определения плотности в качестве источника излучения использует цезий-137. Он имеет большую проникающую способность и позволяет работать с образцами древесины в широком диапазоне толщин, до 90 см (Korell, Bloomfield, 1978). При исследовании плотности и однородности лимонного и красного был применен метод неразрушающего ослабления гамма-излучения (Cherelli, Ballarin et al., 2017). У изученных видов процент сердцевинной древесины был выше, чем заболонной. Результаты плотности не показали статистически подтвержденной разницы между сердцевиной и заболонью, и напротив, наблюдались статистические различия между показателями однородности для сердцевинных и заболонных участков.

Сделан вывод, что для эвкалиптовой древесины вполне оправданно включение показателя однородности плотности в качестве параметра качества.

Рентгеновский метод определения плотности древесины менее трудоемок, но требует более дорогого оборудования. При определении плотности древесины просвечивают мягкими рентгеновскими лучами 10–20 образцов. С негативов с помощью микрофотометра и записывающего устройства снимают графики распределения внутрикольцев-

вой плотности. Точность результатов при этом зависит от правильности приготовленных образцов и равномерности дозировки излучения (Симоненко, 2014).

Распространенный и надежный метод рентгеновского микроплотностного анализа (Genetic control of pulp and timber properties..., 2002; Louzada, Fonseca, 2002; Li, Wu, 2005) был использован для оценки плотности древесины сосны приморской на ранней стадии роста (Can wood density..., 2008). Оценки плотности ювенильной и спелой древесины были хорошо коррелированы, и относительная эффективность ранней селекции достигала приблизительно 80 % 12-летних деревьев. 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 обеспечивать хорошее изображение плотности и внутренней структуры, например, наличие сучьев в древесине, но также имеет тот недостаток, что метод относительно дорог и не подходит для полевых измерений (Hanhijärvi, Ranta-Maunus, 2008; Ruggirello, 2017).

Сравнительное исследование плотности 33- и 42-летних сосен Тунберга в Японии обычным методом с использованием кернов и денситометрии на основе мягкого рентгеновского излучения показало, что значения массы углерода у сосны, рассчитанные по двум методам, в двух префектурах Японии различаются на 27 % и 6 %, соответственно, 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 (см. рис. 5). Она включает в себя мультиспектральные и мультимодальные рабочие процессы, в частности, визуализацию проходящего света, объединение последовательных данных для формирования полных профилей квалиметрии по радиусу ствола, обычную рентгеновскую абсорбционную денситометрию с использованием сцинтилляционного детектора и обычную рентгеновскую дифрактометрию небольших участков образцов. SilviScan включает автоматизирован-

ный процесс измерения годовых колец кернов для получения значений плотности, угла наклона микроволокон, размерных характеристик клеток, а также степень косослойности древесины. Вследствие высокой точности получаемых результатов система служит базовой основой при сравнении разных методов неразрушающего контроля (Non-Destructive Evaluation Techniques..., 2019). Лоуренс Шимлек утверждает, что дифракционная система SilviScan может измерять за год миллиарды клеточных структур, то есть больше, чем общее число измерений угла микроволокон, измеренных методом микроскопии в течение любого количества лет (Non-Destructive Evaluation Techniques..., 2019).

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

1.7. 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 ($8333...4000 \text{ см}^{-1}$). Основное 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. Оценка квалиметрии растущих деревьев потенциально может быть выполнена с помощью отобранных на месте спектров, или на основе спектров, полученных на измельченных возрастных кервах в лаборатории (Non-Destructive Evaluation Techniques..., 2019).

Наибольшее распространение NIR-спектроскопия получила при квалиметрии цельного дерева по извлеченным кернам древесины (Estimation of whole-tree..., 2005), в том числе в селекционных про-

граммах (Meder et al., 2010). Тем не менее, при сравнении выхода целлюлозы, полученного по NIR-спектрам, записанным с растущих деревьев портативным прибором, оказалось, что оценки, полученные по древесине измельченных кернов на лабораторном спектрометре, дают лучшие результаты (Between-tree variation..., 2011).

Разработанная калибровка NIRS для базисной плотности древесины с помощью соответствующих портативных устройств обладает потенциалом получения ближних инфракрасных спектров у растущих деревьев (The potential of portable..., 2017). Подобный портативный прибор был применен на двух клонах эвкалипта в Испании, из которых предварительно были извлечены керны и определена их базисная плотность. В лаборатории были проанализированы профили микроплотности и получены их спектры в инфракрасном диапазоне.

Ближнее инфракрасное гиперспектральное изображение исследовали на пяти образцах древесины криптомерии японской. 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. Получены значимые различия между ранней и поздней древесиной (Ma et al., 2017, 2018). С использованием данных NIR-спектроскопии, полученных на образцах древесины кедра японского известной плотности, была построена модель для прогнозирования плотности сухой древесины (Predicting oven-dry density of Sugi..., 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 про-

гнозировании – 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 составили 0,80 и 0,78, соответственно (Mechanical properties of wood materials..., 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 квалитетными показателями удельного веса блока ($R^2 = 0,66$), модуля упругости ($R^2 = 0,58$) и модуля разрыва ($R^2 = 0,40$). Сделан вывод, что в целом NIR-спектроскопия обладает достаточно хорошей предсказательной способностью (Near-infrared spectroscopy prediction..., 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 сучья (Effect of knots and holes..., 2019).

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

1.8. Микроволновое сканирование

Когда древесина используется в качестве строительного материала, важнейшими ее характеристиками являются угол наклона волокон, содержание влаги и плотность. Влажность обычно определяется емкостными влагомерами с использованием высокочастотных сигналов или контактными влагомерами 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 наклона волокон 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 влажности и плотности микроволновым методом при отсутствии информации об угле отклонения волокон свойственны смещения оценок (Evaluation of wood characteristics..., 1987; Johansson et al., 2003; Lundgren et al., 2006). Интегральный учет анизотропных диэлектрических свойств древесины с использованием микроволновой технологии позволяет одновременно определять в отдельности плотность, влажность и угол наклона волокон (James et al., 1985; Schajer, Orhan, 2006). Определение угла наклона волокон влажной (7,6...14 %) и высушенной древесины дает среднеквадратичную ошибку $0,14^\circ$ и $0,40^\circ$, соответственно. 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 (Microwave testing..., 2018).

С целью изучения возможности калибровки прогностической 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 ее содержания. На каждом этапе все образцы взвешивались, сканировались с помощью микроволнового сенсора Satimo 9.4, и выполнялась компьютерная томография (КТ) с помощью медицинского сканера Siemens Somatom AR.T. Построена регрессионная модель, в которой в каче-

стве 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).

1.9. Влияние влажности древесины на точность оценки ее плотности

Известно, что влажность по отношению к сухой массе и базисная плотность у растущих деревьев являются взаимосвязанными показателями, причем характер взаимосвязи видоспецифичен. Если у сосны, ели и березы названные показатели изменяются вдоль по всему стволу обратно пропорционально, то у осины – прямо пропорционально, за исключением нижней 20 %-й доли длины ствола (Полубояринов и др., 1982). Применяя любой из неdestructивных методов оценки плотности древесины, мы получаем искомое значение в форме условного показателя, специфичного в каждом конкретном устройстве: в пилотин-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.

Были исследованы взаимосвязи между содержанием влаги, скоростью распространения звуковой волны, динамическим модулем упругости и модулем сопротивления сверлению. Используя листовницу Гмелина в качестве материала для изучения изменения свойств древесины при различном содержании влаги, были применены технологии звуковой волны напряжения и сопротивления сверлению. Результаты показали, что, когда содержание влаги в древесине не достигало точки насыщения волокон, свойства древесины резко снижались с увеличением влажности. Однако исследование также показало, что при влажности древесины выше, чем при насыщении волокон, свойства древесины снижались с увеличением влажности (Theoretical and Experimental Research..., 2020).

Содержание влаги является одним из наиболее важных факторов, влияющих на точность оценки плотности древесины (Исаева, 1974; Полубояринов, 1976а; Полубояринов и др., 1982; Glass, Zelinka, 2010), в том числе и при применении методов неразрушающего контроля растущих деревьев. Но в данном аспекте проблемы мы анализируем взаимовлияние других показателей, отличных от выше упомянутых 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 году при испытании нескольких опытных конструкций пилонин-тестера на растущих деревьях ели европейской, сосны обыкновенной и бука европейского было установлено, что в диапазоне влажности от 8 % до 24 % каждый процент повышения влажности увеличивал глубину проникновения штифта в древесину на 1...2 %, однако по достижении предела насыщения волокон влагой (около 30 %) влияние влажности становилось незначимым (Hoffmeyer, 1978). В аналогичных экспериментах с дугласией в диапазоне влажности от 6 % до 30 % при повышении влажности на 1 % глубина проникновения штифта увеличивалась на 0,19...0,26 мм, однако при влажности выше 30 % достоверного влияния влажности тоже не было обнаружено (Smith, Morrell, 1986).

При аналогичном исследовании влияния влажности древесины сосны черной в Испании в диапазоне от 65,1 % до 8,3 % с помощью пилонин-тестера и резистографа установлено отсутствие влияния влажности на показания обоих приборов за пределами точки насыщения волокон (30 %). В диапазоне влажности от 8 до 30 % связь показаний резистографа с влажностью была на уровне коэффициента детерминации 0,512, тогда как связь показаний пилонин-тестера с влажностью – лишь 0,154 (The effect of moisture content..., 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 на 71 % и у сосны Веймутова на 23 % (Cockrell, 1933).

В экспериментах с использованием пилонин-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 Факорр показало существенное видоспецифичное увеличение сопротивления бурению при снижении влажности в том же диапазоне. Для каждого вида было выведено корректировочное уравнение второго порядка (Calderón, 2012).

Таким образом, при влажности древесины растущего дерева ниже уровня насыщения волокон, 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, 1976а). Однако, вопрос о влиянии их на показатели плотности, определяемые неразрушающими методами, практически не исследован.

1.10. 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 (MRI links stem water content..., 2012), рентгено-компьютерную томографию (Water in the stems..., 1995), дендрометрию ствола (Fernandez, Cuevas, 2010), определение диэлектрической проницаемости (Water content..., 2001) и др.

Метод магнитно-резонансной томографии (МРТ) – неинвазивный 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 (MRI links stem water content..., 2012). Суточные изменения содержания воды в стволе, вызывающие расширение или сжатие диаметра ствола, фиксируются дендрометрами. Однако их показания могут смещаться в условиях разной степени стресса, вызванного засухой (Fernandez, Cuevas, 2010), а также вследствие ростовых изменений ствола.

Диэлектрическая проницаемость древесины, зависящая от ее влажности, является важной характеристикой 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 (Assessment of the dielectric anisotropy..., 2013; Non-destructive evaluation of moisture content..., 2015; Determination of log moisture..., 2015), преимуществом которых является возможность выполнения прямых измерений. Характеристики используемого сигнала (передача или отражение) зависят от диэлектрических свойств древесины, которые также зави-

сят 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. Электрическое сопротивление и диэлектрические свойства древесины изменяются прямо пропорционально ее влагосодержанию при предельном значении 30 %, то есть 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-% повышении ее температуры (Davidson, 1958; James, 1968).

При содержании влаги менее 10 % в показаниях влагомеров возможны смещения по отношению к показателям, полученным термовесовым методом (Forsén, Tarvainen, 2000). Исследованиями 13 листовых видов Канады установлено, что в диапазоне влажности древесины от 6 до 26 % влагомеры обоих типов дают как положительные, так и отрицательные смещения, связанные с влажностью древесины, и их абсолютная величина обычно находится в пределах 2 % (Wengert, Bois, 1997; Shupe et al., 2002). Величина поправочного коэффициента зависит также от типа влагомера: при использовании

бесконтактного влагомера она 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).

1.11. 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, Paretì, 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, является фундаментальным свойством живой ткани. Возникающие в тканях и отдельных клетках живых организмов БЭП являются важнейшими факторами процессов возбуждения и торможения клеток. Эта энергетическая характеристика взаимодействия и движения зарядов в исследуемой живой системе измеряется 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 вслед-

ствие 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:

– внутриклеточный потенциал, фиксируется путем помещения электродов внутрь клетки и за ее пределами (рис. 16);

– БЭП растительной ткани (БЭП течения), определяется с помощью контакта электродов с разными точками растения, между которыми проводится измерение (рис. 17) (Parkinson, 1963; Fromm, Lautner, 2007; Кулешова и др., 2019).

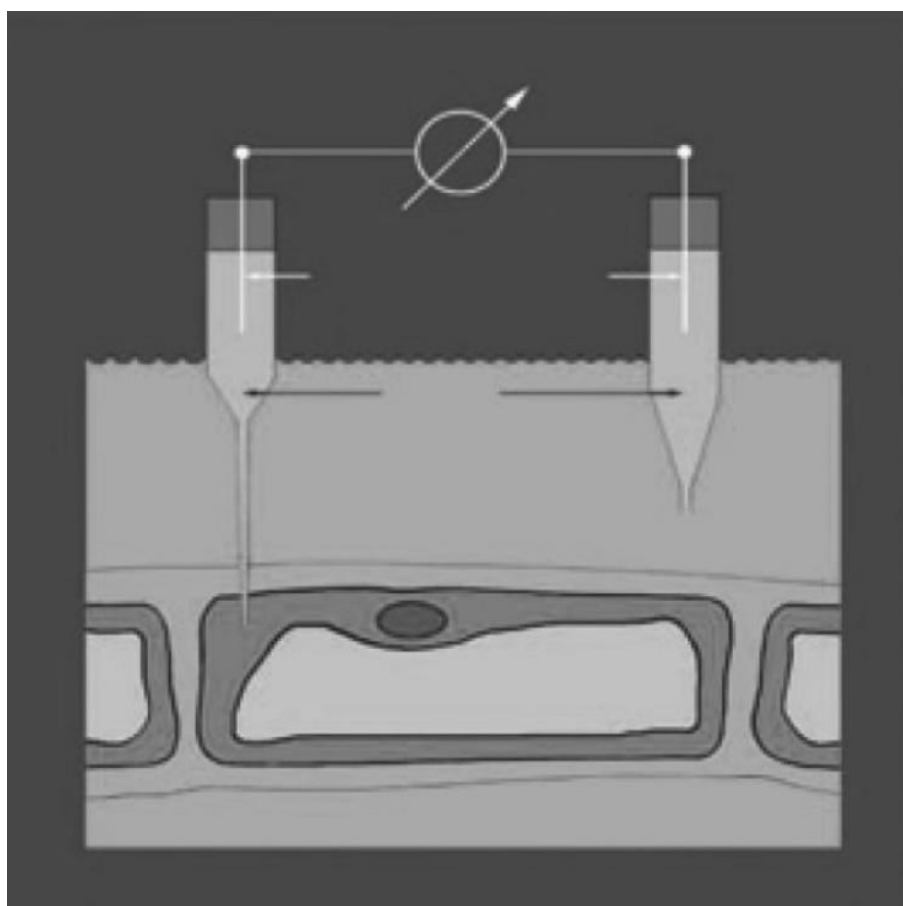


Рис. 16. Внутриклеточное измерение мембранного потенциала с помощью микроэлектрода, введенного в цитоплазму водорослевой клетки, в то время как электрод сравнения находится вне клетки (Fromm, Lautner, 2007)

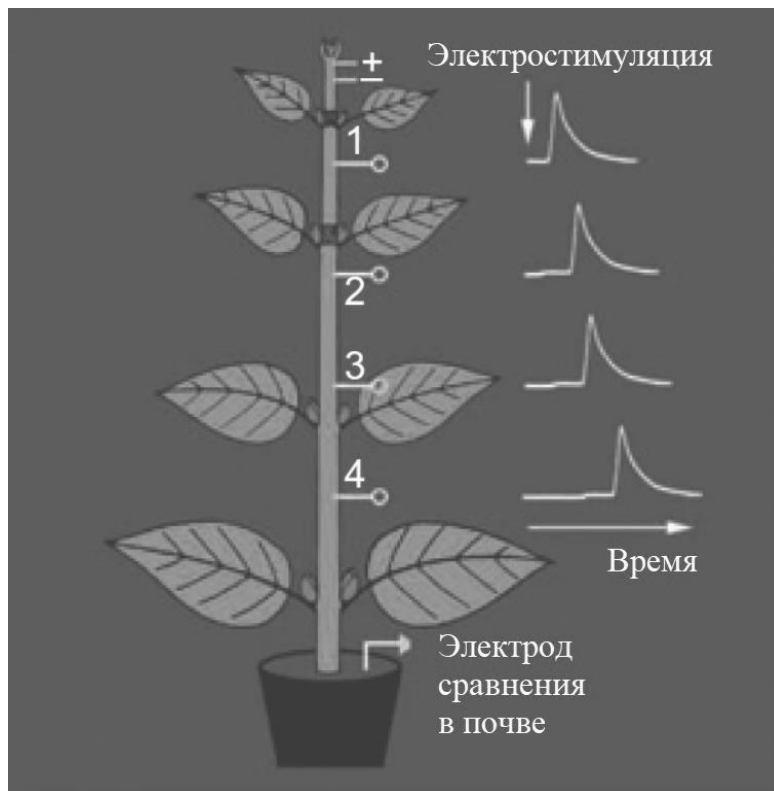


Рис. 17. Внеклеточное измерение БЭП растительной ткани с последовательной 4-ступенчатой электростимуляцией (Fromm, Lautner, 2007)

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 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 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, обеспечивающих 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 в цепи переменного тока) (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: ультразвуковую томографию и георадар (Ultrasonic, electric, and radar..., 2003; Al Hagrey, 2007).

С помощью моста Уитстоуна было установлено, что электрическое сопротивление в камбиальной зоне растений обратно пропорционально скорости их роста (Electrical resistance in tree cambium zone...,

1977). Однако разница в сопротивлении наблюдается лишь при значительных различиях в росте растений (Electrical resistance measurements..., 1984). Кроме того, у отдельных растений сопротивление недостаточно тесно коррелирует с ростом (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 факторы окружающей среды – атмосферное электричество, геомагнитное и электрическое поля Земли (Korrán et al., 2000).

Хотя было предпринято много попыток понять взаимосвязь между физиологическими и электрическими свойствами растений, степень корреляции условий окружающей среды с электропроводимостью растений до сих пор не ясна (Development of electrical conductivity..., 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 (Modeling the canopy photosynthetic rat..., 2016; Estimation of greenhouse..., 2018).

Было предложено измерять скорость транспирации растений по тепловому балансу движущегося потока пасоки (Карасев, Карасева, 1975; Smith, Allen, 1996). Движение воды в растении не имеет прямого отношения к быстрой реакции растений на окружающую среду или стресс, тем не менее, термобиофизический 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, характеризуемая у разных древесных видов величиной 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 так же 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 (Park et al., 2018) регрессионная модель для оценки электропроводимости (EC):

$$EC = 0,765T + 0,002IR + 0,012 (R^2 = 0,715, p < 0,01), \quad (4)$$

где EC – электропроводимость, миллисименс/м;

T – температура, °С;

IR – радиация, Вт/м².

Уравнение (4) применимо для прогнозирования EC с учетом условий окружающей среды. Прогнозируемые значения были подтверждены сравнением их с измеренными ($R^2 = 0,867$). Высокий коэффициент корреляции свидетельствует о том, что состояние роста растений соответствует условиям окружающей среды. Если EC , предсказанная по условиям окружающей среды, оказывается выше измеренного значения, это может указывать на некоторые физиологические проблемы растения (Nondestructive measurement of paprika..., 2018).

Одним из адекватных биофизических методов оценки состояния лесных экосистем является исследование электрического сопротивления (импеданс) 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 приводит к повышению электрического сопротивления прикамбиального комплекса тканей, к подавлению обменных процессов в организме древесного растения и отражает уровень корне-лиственной

связи их жизнедеятельности. Проведенный эксперимент с деревьями березы повислой, 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 в экспериментальной группе наблюдается незначительное изменение уровня импеданса и в конечном итоге зафиксировано его снижение. 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 минус 4,5 до минус 6,0 % при среднем значении минус 0,02 % (Michalikova, Prauzek, 2014).

Изучение электрической сигнализации в растениях помогает 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.

1.12. Биотоки и микробные топливные элементы

Выше было установлено, что изменение БЭП растений можно использовать как систему фитомониторинга, то есть 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 транспортируют электроны 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 (Green electricity production..., 2008; Интенсификация процесса..., 2013).

Клетки микроорганизмов, используя органические вещества в качестве питания, производят углекислый газ, протоны и электроны. Последние служат источником электрического тока в МТЭ (рис. 18), где в анаэробной анодной камере идет окисление органических соединений. Получаемая двуокись 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).

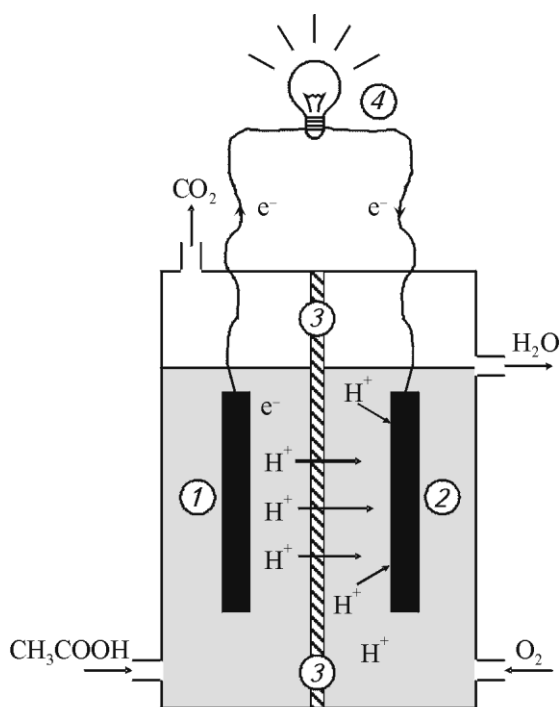


Рис. 18. Принцип работы МТЭ (Дебабов, 2017):

- 1 – анодная камера и анод; 2 – катодная камера и катод;
- 3 – ионоселективная мембрана; 4 – прибор, потребляющий ток

МТЭ – это электрохимические реакторы, которые функционируют за счет окисления биоразлагаемых субстратов электроактивными 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. Недавно выявленные гетеротрофные грибы считаются перспективными для формирования биопленки вокруг электрода, что повышает производительность МТЭ (Microbial fuel cell..., 2018).

Возможность получения электроэнергии в процессе переработки микроорганизмами органических отходов пищевой промышленности, сельского хозяйства, очистных сооружений, инициирует исследования 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, невысока, и для промышленного применения МТЭ должны быть усовершенствованы.

Оптимизация работы МТЭ может идти как по пути технического усовершенствования конструкций (подбор материала 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. 19 Б) (Green electricity production..., 2008; Интенсификация процесса..., 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 (Compost in plant..., 2015). Фитомелиорация является перспективным вариантом применения МТЭ за счет формирова-

ния колоний специальных микробов на корнях и в почве (A step towards soil..., 2019).

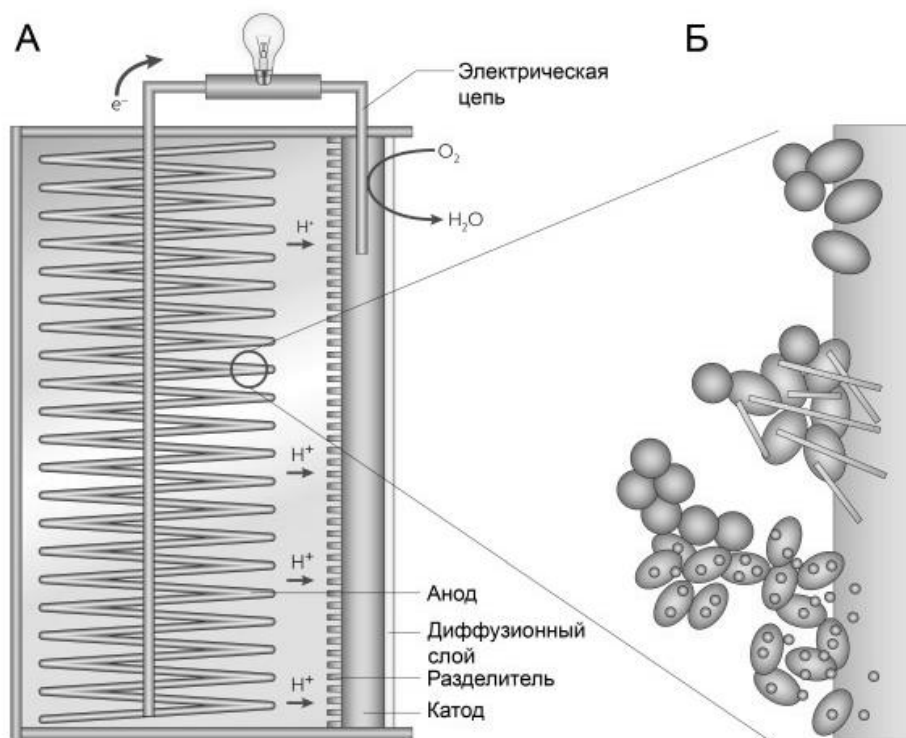


Рис. 19. Схема МТЭ (А) и представление разных типов электрогенных сообществ микроорганизмов (Б) (Букач, Мякинкова, 2014)

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).

1.13. Электрометрический метод определения массы корней деревьев

Метод учета массы подземных органов растений основан на их раскопках, что не дает возможности оперировать большим количеством данных из-за трудности их получения. Поэтому данные о массе

подземных органов растений, особенно древесных, обычно статистически не обрабатываются.

Бóльшие возможности для получения массовых данных о корнях растений дают инструментальные методы (Nadezhdina, Šermak, 2003), в частности:

- методы с применением радарной техники;
- электрометрические измерения.

Первый 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; Use of ground-penetrating radar..., 2001; Nadezhdina, Šermak, 2003; Freilandmethoden zur Untersuchung..., 2003).

Второй, электрометрический метод, основан на измерении сопротивления (активного, емкостного, индуктивного) тканей растения пропускаемому через них электрическому току. Начальный этап применения подобного метода к исследованию количественных характеристик корневых систем растений охватывает период с 1920 по 1960-е гг., однако, по свидетельству В. Бема (Vöhm, 1979), эти эксперименты были либо неудачными, либо модельными и поэтому непригодными для натуральных измерений.

Сравнительно более совершенный метод был разработан для сельскохозяйственных культур О. Хлоупеком (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 изме-

ряемое 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 на песке и на суглинке он составил 3,02 и 0,25, соответственно.

Такая неустойчивость оценок была обусловлена неизвестной долей емкостного сопротивления клеток и тканей, изменчивостью диэлектрической постоянной, непостоянством характеристик 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. (Chloupek, 1972, 1976, 1977).

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.

Описание метода Б. И. Якушева (1988). 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 через растение и почву пропускать электрический ток от батареи с ЭДС 1,5 В (рис. 20), то наибольшее его значение зафиксирует микроамперметр у крупных растений. 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.

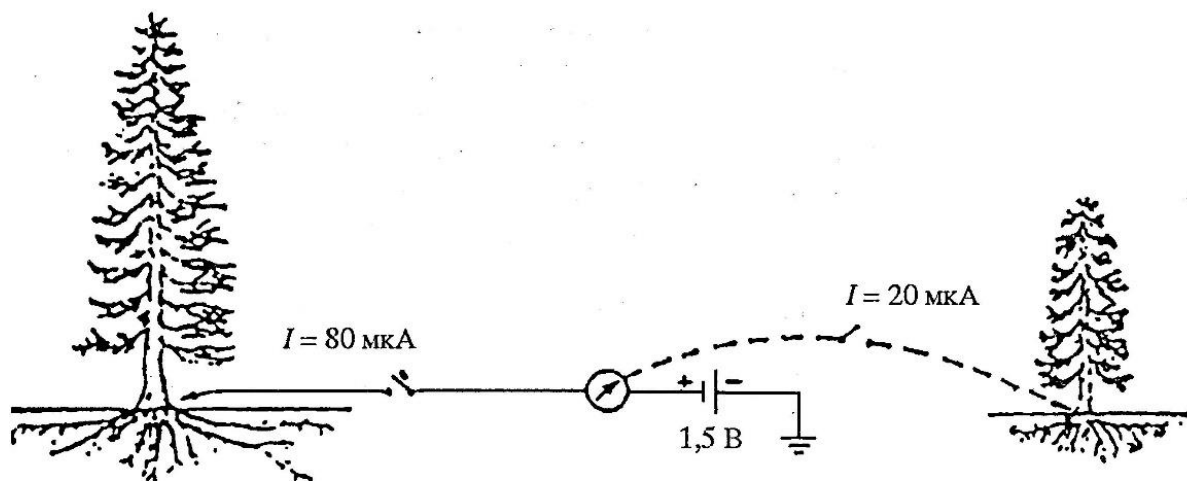


Рис. 20. Схема постановки эксперимента с проводимостью корневых систем (Якушев, 1988)

На рис. 21 приведена схема устройства для определения массы подземных органов растений. Он состоит из микроамперметра I (0...100 мкА), источника питания 2 с ЭДС 1,5 В, трех электродов заземления 3, одного контактного электрода 4, кнопочного выключателя 5 и шунта 6 с коэффициентом $\times 4$. Электроды выполнены из медной проволоки сечением ~ 3 мм. Длина электродов заземления 100 мм. Они соединяются между собой параллельно и имеют общий вход.

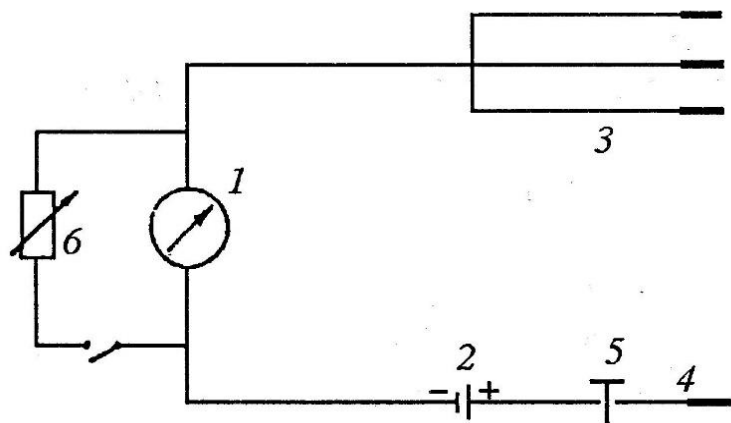


Рис. 21. Принципиальная схема прибора на электрометрическом принципе для измерения массы корней древесных растений (Якушев, 1988)

У контактного электрода есть иглообразный выступ длиной 4 мм и сечением $\sim 1,5$ мм. При определении массы корневых систем больших деревьев возможны значительные величины силы тока, превы-

шающие 100 мкА. Поэтому у микроамперметра предусмотрен шунт б. Общий вид прибора и схема его подключения к растению и почве даны на рис. 22.

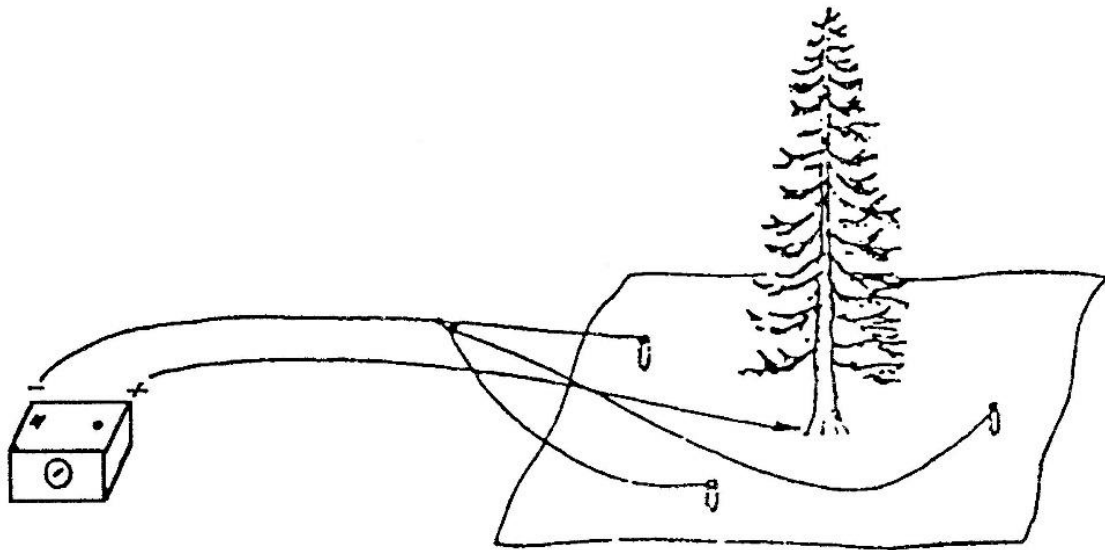


Рис. 22. Схема подключения прибора на электрометрическом принципе к растению и почве при определении массы подземных органов у древесных растений (Якушев, 1988)

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 $\sim 1\text{см}^2$ снимается кора до луба. В середину этого зачищенного участка вставляется электрод с таким расчетом, чтобы в луб и древесину погрузился его иглообразный выступ. Для снятия шунтирующего эффекта флоэмы желательно 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 величина изменяется. Это зависит от состояния влажности почвы. Чтобы исключить влияние условий увлажнения, откапывают несколько проводящих корней рядом с произрастающим деревом того же вида, которое по параметрам близко к модельному. От выкопанных корней отрезаются секатором 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}). Для более точной калибровки проводимости эталонных отрезков корней их нижние торцы можно изолировать от почвы, например, специальной быстротвердеющей мастикой.

Для получения достоверных результатов необходимо провести замеры у десяти 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 сторону от средней величины, 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. Штангенциркулем в нескольких местах отрезка корня измеряют 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):

$$R_k = \frac{E}{I_k}. \quad (5)$$

Таким же образом вычисляется сопротивление всей массы корней растения:

$$R_p = \frac{E}{I_p}. \quad (6)$$

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 ρ определяется по формуле

$$\rho = \frac{R_k \cdot S_k}{l_k}, \quad (7)$$

после подстановки в которую выражения (5) получаем:

$$\rho = \frac{E \cdot S_k}{I_k \cdot l_k}, \quad (8)$$

где l_k – длина отрезка корня, м;

S_k – среднее сечение отрезка, мм².

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

$$R_p = \rho \frac{l}{x}; \quad (9)$$

отсюда:

$$x = \frac{\rho \cdot l}{R_p}. \quad (10)$$

После подстановки в (10) значений ρ по (8) и R_p по (6) получаем:

$$x = \frac{S_k \cdot E \cdot I_p \cdot l}{I_k \cdot l_k \cdot E} = \frac{I_p \cdot S_k \cdot l}{I_k \cdot l_k}. \quad (11)$$

Для условной длины корней l и их площади сечения S_k можно рассчитать массу корней дерева P_p в граммах.

Получаем общий вид формулы:

$$P_p = \frac{I_p \cdot S_k \cdot l^2}{I_k \cdot l_k} \cdot d, \quad (12)$$

где d – плотность эталонного отрезка корня.

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 определялась 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. Допустимы отступления до 15 % в ту и иную сторону, но с обязательной поправкой V_0/V , где V_0 – теоретическая величина объема 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 $3,14 \cdot 4^2 \cdot 20 = 1005$ (см³). Фактически измеренный объем эталонного корня V равен, например, 850 см³. В этом случае поправка на объем эталонного корня равна $1005/850 = 1,18$.

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

$$P_p = \frac{I_p \cdot S_k \cdot l^2 \cdot A \cdot d \cdot V_0}{I_k \cdot l_k \cdot 4 \cdot 1,015A \cdot V}. \quad (13)$$

После преобразования (13) окончательный вид расчетной формулы:

$$P_p = \frac{I_p \cdot P_k \cdot A \cdot V_0}{I_k \cdot 0,16 \cdot 1,015A \cdot V}. \quad (14)$$

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;

1,015 A – коэффициент пропорциональности;

V_0 – теоретический объем отрезка корня, диаметр сечения которого равен 1/10 толщины дерева, см³;

V – фактический объем эталонного отрезка корня, определяемый в полевых условиях, см³.

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 Беларуси.

Б. И. Якушев (1988) полагает, что различия в определении массы корней дерева двумя методами (табл. 1), объясняются в большей мере неточностью метода раскопок. Поэтому он рассчитывает 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 масса корней рассчитывалась по простому соотношению:

$$P_p = \frac{I_p \cdot P_k}{I_k} \quad (15)$$

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		Разница в определениях, г	Отклонение, %
			Электрометрический метод	Метод 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	50,0	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	12,2	12,6	-0,4	-0,9
		0,90	50,5	52,4	-1,9	-3,8
10	0,5×0,5	3,21	334,0	323,0	+11,0	+3,3
		2,92	210,0	199,0	+11,0	+5,2
		3,00	244,0	231,0	+13,0	+5,3
11	1,0×1,0	3,75	350,0	370,0	-20,0	-5,7
		4,03	451,0	470,0	-19,0	-4,2
		4,70	800,0	763,0	+17,0	+2,1
15	1,0×1,0	5,40	1 200,0	1 134,0	+66,0	+5,5
		5,85	1 398,0	1 304,0	+98,0	+7,0
		5,75	1 130,0	1 224,0	-94,0	-8,3
25	Естественные сосняки	9,90	3 800,0	3 982,0	-182,0	-4,8
50		20,0	16 790,0	18 500,0*	-1 710,0	-10,2
120		40,0	66 490,0	60 300,0*	+6 460,0	+9,7
200		50,0	83 100,0	72 500,0*	+10 600,0	+12,8

* По А. А. Молчанову (1971)

Исследования проведены в естественных сосняках и культурах в возрасте от 8 до 42 лет, произрастающих на дерново-боровых, подстилаемых песками, и на зональных темнокаштановых 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).

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		Разница в распределениях, кг	Отклонение, %
					Электрометрический метод	Метод 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

* К – культуры, Е – естественные сосняки.

** Почвы: Т-к – темнокаштановые, Д-б – дерново-боровые.

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 +5,0; +0,7; +5,6; +5,3; +6,3 и +3,5 %, соответственно, (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 величину +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 растительного сообщества. Эта доля чрезвычайно изменчива (44...82 %) и, как уже упоминалось выше, в сухих условиях достигает экстремально высоких значений (Усольцев, Крепкий, 1986; Усольцев, 1988).

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 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.

Однако, этот недостаток, в отличие от первого из упомянутых, в принципе устраним: достаточно по данным 10...20 замеров массы корней деревьев разной величины 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 довольно тесная и объясняет 96 % ее общей изменчивости. Поэтому факт срастания легко установить по отсчету на приборе, значительно отклоняющемся относительно графика. Соответственно в качестве модельных могут быть взяты лишь деревья, отсчеты по прибору которых находятся вблизи значений теоретической (расчетной) линии.

1.14. Радиолокационное зондирование

Радиолокация использует радиоволны для определения дальности, угла или скорости объектов. Радиолокационная система состоит из передатчика, генерирующего электромагнитные волны, антенны, передающей эти волны, приемной антенны и процессора для анализа результатов. Когда переданные радиолокационные сигналы вступают в контакт с объектом, они отражаются обратно на приемную антенну, позволяя процессору определить местоположение объекта в наблюдаемом пространстве. Наиболее распространенным применением радара в городских лесах является регистрация их корневых систем. Передающая антенна натягивается по поверхности земли, при этом сигналы радара отражаются главным образом от влаги корней, что позволяет процессору оценить их местоположение на данной глубине почвы (Booty, 2018). Этот метод был успешно применен исследователями, изучающими распределение корней в городских лесах и их влияние на инфраструктуру (Detecting defects..., 2009; Ground-penetrating radar..., 2011). Исследование стволов растущих деревьев с использованием георадара показало, что на точность оценки влияют диаметр ствола дерева и правильность его формы. Точность георадара снижалась у деревьев малого диаметра и неправильной формы (Reliability of acoustic tomography..., 2018; Allison et al., 2020).

Выводы по первой главе

При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов фитомассы необходимо знать закономерности динамики не только количественных, но и качественных их характеристик, прежде всего плотности и влажности

древесины растущих деревьев как их ключевых экологических характеристик. 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. Методы основаны на применении пилодин-тестера, резистометра, ригидометра, акустических устройств, радиационные методы и ближняя инфракрасная, или NIR-спектроскопия.

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 в диапазоне от 27 до 92 %. Квалиметрия методом сопротивления бурению древесины на базе резистографа как более чувствительного прибора по сравнению с пилодинтестером также нашла широкое применение в селекционных программах, но оба метода основаны на локальном зондировании, и его экстраполяция на все 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 выше упомянутым 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 направлениях, являются довольно чувствительными 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. Измерение биопотенциалов растений является важной характеристикой их физиологического состояния, а биотоки растений и любой органической массы составляют основу микробных топливных элементов, сочетающих получение электроэнергии и очистку субстратов от загрязнений. Электрометрический метод определения массы корней растений снимает одну из главных неопределенностей при оценке биологической продуктивности растений в подземной сфере.

Глава 2

БАЗА ДАННЫХ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

2.1. Общие сведения

В исследованиях биологической продуктивности лесов и их реакции на изменение климата необходимо знание закономерностей динамики не только количественных, но и качественных характеристик, варьирующих с возрастом, экологическими и другими факторами (Полубояринов, 1976а; Prediction of wood quality in small-diameter..., 2013; Genetic control of wood properties..., 2010, 2013; The effect of tree slenderness..., 2016).

Количество публикаций по квалиметрии фитомассы лесов в последние годы неуклонно нарастает, совершенствуются методы и алгоритмы ее оценки, анализа и моделирования в географических градиентах. В условиях экспоненциально нарастающего объема информации необходимо вычленять и обосновывать перспективные направления, научные ориентиры-маяки, ускоряющие прогресс в той или иной области знаний при минимизации потерь от дублирования и следования тривиальной методологии проб и ошибок.

В основу лесной таксации как науки первоначально была заложена стереометрическая парадигма оценки объема ствола как тела вращения линии сбегая вокруг его оси. С переходом к весовой оценке биологической продуктивности и углероддепонирующей способности лесов содержание квалиметрических характеристик изменилось: наряду с оценкой сучковатости, наличия гнили, кривизны и свилеватости стволов актуальной стала оценка плотности и других квалиметрических данных в компонентах фитомассы (Полубояринов, 1976а; Мелехов и др., 2003; Джабык-Карагайский бор, 2005).

Степень достигнутого прогресса в изучении биологической продуктивности лесов, в том числе ее квалиметрической составляющей, определяется фактологическим состоянием вопроса, то есть обеспеченностью фактическими данными о квалиметрических характеристиках фитомассы по полным спектрам (видовому и экологическому). Для валидации взаимосвязей квалиметрических показателей

древесины с данными дистанционного зондирования лесов на больших площадях необходимы базы исходных фактических данных о квалиметрии деревьев, полученных путем традиционной наземной таксации.

Такая база данных сформирована нами для лесообразующих древесных видов Центральной Евразии (Usoltsev, 2020). Она состоит из двух разделов.

В первом разделе (табл. 3) представлены эмпирические данные о сбегах стволов в коре и без коры, связанные как с таксационными показателями деревьев и древостоев, так и с локальными квалиметрическими показателями, измеренными на разных относительных высотах стволов.

Во втором разделе (табл. 4) содержатся средние квалиметрические показатели деревьев в сочетании с теми же сопутствующими данными, что и в первом разделе. В обоих разделах приводятся данные о содержании сухого вещества в листве (хвое) и ветвях деревьев, а также процентная доля хвои в охвоенных побегах кроны.

Мы вступаем в новую эру, характеризующуюся глобальным стремлением к достижению экономической, социальной и экологической устойчивости, в которой роль древесины становится все более заметной, особенно в контексте формирующейся биоэкономики (Differences in growth and wood density..., 2017).

Плотность компонентов фитомассы наряду с количественными показателями как фитомассы, так и чистой первичной продукции, входит в понятие биологической продуктивности лесного покрова планеты как «наиболее надежного источника пропитания все возрастающего населения» (Дювиньо, Танг, 1968. С. 110).

В связи с проблемой изменения климата количественные и квалиметрические показатели лесной фитомассы стали необходимы для корректной оценки углеродного цикла в земной биосфере (Wood density reduced..., 2018). Сформированная база данных предоставляет возможность картирования и выявления закономерностей изменения квалиметрических показателей в климатических градиентах Евразии и может быть востребована в будущем лесоустройстве, оценке углеродного пула лесов и перспективных селекционных программах России.

Таблица 3

Фрагмент базы данных о квалитетических показателях фитомассы деревьев (первый раздел)

h_{rel}	d_1 , см	d_2 , см	$\rho_{\omega St, wood}$	$\rho_{\omega St, bark}$	$S_{st, wood}$	$S_{st, bark}$	$\rho_{bSt, wood}$	$\rho_{bSt, bark}$	S_f	S_{br}	% хвои
Сосна обыкновенная, Тургайский прогиб, 52,33° с. ш., 64,00° в. д. (Усольцев, 1988)											
0	25,30	20,70	787,1	170,6	53,6	76,8	421,9	131,0	–	–	74,3
0,1	19,60	16,90	692,1	179,7	56,0	70,7	387,6	127,0	46,8	58,0	74,3
0,2	16,50	16,00	674,5	575,0	57,0	42,2	384,5	242,7	–	–	76,5
0,3	15,40	15,00	708,2	565,4	54,1	40,0	383,1	226,2	–	–	78,6
0,4	13,80	13,50	711,2	780,7	54,4	39,7	386,9	309,9	–	–	74,9
0,5	12,80	12,30	717,4	647,3	53,3	43,9	382,4	284,2	50,9	51,0	71,2
0,6	11,10	10,80	713,5	790,8	52,7	44,3	376,0	350,3	–	–	66,7
0,7	9,11	8,79	697,6	797,9	53,6	45,6	373,9	363,8	–	–	–
0,8	6,18	5,86	612,7	780,8	56,3	45,9	345,0	358,4	–	48,0	–
0,9	3,97	3,66	750,7	860,3	49,2	44,8	369,3	385,4	–	–	–
Кедр сибирский, Средний Урал, 59,05° с. ш., 60,60° в. д. (Усольцев, 2016)											
0,2	12,95	12,55	757,1	1199,4	43,5	46,2	329,3	554,5	43,5	44,1	87,9
0,5	9,55	9,05	889,0	908,6	38,7	57,8	344,0	525,1	43,6	44,1	85,5
0,8	4,80	4,45	912,1	1020,2	35,7	59,0	325,3	601,5	43,8	41,3	84,8
Пихта сибирская, Средний Урал, 56,80° с. ш., 59,93° в. д. (Усольцев, 2016)											
0,2	14,65	13,45	752,7	773,7	46,6	50,3	350,4	389,3	44,5	48,2	75,7
0,5	10,85	9,65	696,2	612,5	46,9	47,6	326,4	291,5	46,7	50,3	77,3
0,8	5,40	4,60	975,7	884,9	45,6	44,5	445,3	394,1	46,2	50,1	76,2
Сосна обыкновенная, Южный Урал, 55,48° с.ш., 60,22° в.д. (Усольцев, 2016)											
0,2	29,15	28,30	763,4	620,6	48,8	41,7	372,2	259,0	49,0	44,0	72,3
0,5	22,30	21,65	781,4	668,0	46,9	61,9	366,8	413,4	48,0	46,0	79,8
0,8	10,30	9,70	830,7	699,8	41,8	63,0	347,6	441,0	48,0	47,0	–

h_{rel}	d_1 , см	d_2 , см	$\rho_{\omega st, wood}$	$\rho_{\omega st, bark}$	$Sst, wood$	$Sst, bark$	$\rho_{bst, wood}$	$\rho_{bst, bark}$	Sf	Sbr	% хвои
Ель сибирская, Средний Урал, 56,80° с. ш., 59,93° в. д. (Усольцев, 2016)											
0,2	9,95	9,30	748,6	719,2	52,6	44,0	394,0	316,6	49,3	58,0	76,3
0,5	7,45	6,95	827,8	873,3	46,4	42,1	383,9	367,3	50,1	56,8	76,9
0,8	3,25	2,85	870,2	716,5	36,7	37,2	319,1	266,4	46,9	56,8	71,7
Береза повислая, Южный Урал, 55,48° с. ш., 60,22° в. д. (Усольцев, 2016)											
0,2	–	–	718,9	551,5	67,9	32,5	487,9	179,1	40,0	54,0	70,5
0,5	–	–	922,1	707,3	51,2	33,9	472,1	240,0	–	–	–
0,8	–	–	952,3	852,9	50,1	36,5	476,9	311,6	–	–	–

Условные обозначения:

96

h_{rel} – относительная высота в долях от высоты ствола в направлении снизу вверх;

d_1 – диаметр ствола в коре на относительной высоте h_{rel} ;

d_2 – диаметр ствола без коры на относительной высоте h_{rel} ;

$\rho_{\omega st, wood}$ – плотность древесины в свежем состоянии, кг/м³;

$\rho_{\omega st, bark}$ – плотность коры в свежем состоянии, кг/м³;

$Sst, wood$ – содержание сухого вещества в древесине, %;

$Sst, bark$ – содержание сухого вещества в коре, %;

$\rho_{bst, wood}$ – базисная плотность древесины, кг/м³;

$\rho_{bst, bark}$ – базисная плотность коры, кг/м³;

Sf – содержание сухого вещества в хвое (листве), %;

Sbr – содержание сухого вещества в ветвях, %;

% хвои – доля хвои в охвоенных побегах кроны, %

Таблица 4

Фрагмент базы данных о квалитетических показателях фитомассы деревьев (второй раздел)

A, лет	D, см	H, м	ρ_w , wood	ρ_w , bark	ρ_w , tot	S_{st} , wood	S_{st} , bark	S_{st} , tot	P_b , wood	P_b , bark	P_b , tot	S_f	S_b , tot	% foliage
Береза пушистая, Архангельская область, 64,00° с. ш., 39,50° в. д. (Молчанов, 1971)														
113	24,0	–	627,3	251,7	572,4	61,6	60,9	66,0	386,2	329,5	377,9	52,0	37,4	–
113	28,0	–	608,8	529,3	598,0	66,3	63,8	66,0	403,7	337,5	394,7	52,0	32,1	–
113	32,0	–	591,2	606,7	593,1	69,5	52,5	63,6	410,6	136,7	377,2	52,1	38,6	–
113	36,0	–	487,5	616,7	501,9	64,0	55,4	62,9	312,2	341,7	315,4	51,8	40,8	–
142	16,0	–	834,0	628,0	804,6	65,4	61,3	65,0	545,8	385,2	522,9	38,3	85,0	–
142	32,0	–	1174,1	707,3	1116,4	65,5	58,7	65,0	769,4	415,3	725,6	53,0	73,5	–
142	36,0	–	1169,7	772,2	1119,1	65,6	58,6	65,0	767,3	452,9	727,3	50,6	74,2	–
Береза повислая, Украина, 48,10° с. ш., 31,60° в. д. (Лакида и др., 2017)														
19	10,8	12,8	869,0	1013,0	893,0	54,2	61,5	56,2	471,0	623,0	502,0	32,9	67,4	–
35	10,2	17,3	885,0	748,0	850,0	55,4	58,0	57,1	490,0	434,0	485,0	32,4	76,6	–
30	11,3	15,2	935,0	1042,0	952,0	54,3	66,4	54,9	508,0	692,0	523,0	43,0	58,8	47
30	12,2	14,1	800,0	744,0	766,0	56,4	62,8	59,9	451,0	467,0	459,0	46,0	52,4	46
31	18,2	17,4	875,0	1081,0	920,0	56,6	63,8	57,8	495,0	690,0	532,0	43,0	58,8	47
27	8,2	14,1	834,0	1012,0	852,0	56,4	57,9	55,5	470,0	586,0	473,0	37,0	55,7	46
Ель европейская, Архангельская область, 64,00° с. ш., 39,50° в. д. (Молчанов, 1971)														
142	4,0	–	603,1	1012,5	685,0	59,6	50,6	56,9	359,4	512,5	390,0	44,4	42,1	–
142	12,0	–	889,1	532,2	851,7	56,5	58,5	56,7	502,6	311,1	482,6	53,9	52,3	–
142	16,0	–	704,1	324,3	661,9	57,2	54,5	57,1	402,7	176,7	377,6	54,1	45,8	–

<i>A</i> , лет	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	$\rho_{\omega, wood}$	$\rho_{\omega, bark}$	$\rho_{\omega, tot}$	$S_{st, wood}$	$S_{st, bark}$	$S_{st, tot}$	$P_b, wood$	$P_b, bark$	P_b, tot	S_f	S_b, tot	% foliage
142	24	–	735,7	305,5	692,1	56,7	63,1	57,0	417,2	192,7	394,5	54,0	34,6	–
142	28	–	676,8	628,6	672,1	58,2	47,5	57,2	393,6	298,7	384,3	54,0	33,3	–
142	36	–	630,5	626,9	630,2	55,5	121,5	61,4	350,0	761,5	386,9	49,3	24,2	–
142	40	–	584,3	600,0	585,9	55,2	54,6	55,1	322,3	327,8	322,8	50,1	43,9	–
Сосна Палласа, Крым, 44,70° с. ш., 34,40° в. д. (Лакида и др., 2018)														
39	19,7	9,1	863,0	547,0	819,0	50,5	62,9	51,8	436,0	344,0	424,0	51,0	55,5	54,8
51	13,7	7,7	888,0	555,0	811,0	51,2	60,5	50,3	455,0	336,0	408,0	52,3	50,9	54,2
25	11,5	5,4	1040,0	560,0	901,0	44,9	55,7	46,9	467,0	312,0	423,0	51,3	50,1	51,4
42	18,5	11,7	998,0	567,0	901,0	46,8	61,4	48,8	467,0	348,0	440,0	51,0	50,1	60,4
24	7,7	5,5	832,0	564,0	784,0	51,9	67,7	54,1	432,0	382,0	424,0	49,5	49,5	59,8

Условные обозначения:

A – возраст дерева, лет;

D – диаметр ствола на высоте груди, см;

H – высота дерева, м;

$\rho_{\omega, wood}$ – плотность древесины в свежем состоянии, кг/м³;

$\rho_{\omega, bark}$ – плотность коры в свежем состоянии, кг/м³;

$\rho_{\omega, tot}$ – суммарная плотность древесины и коры в свежем состоянии, кг/м³;

$S_{st, wood}$ – содержание сухого вещества в древесине, %;

$S_{st, bark}$ – содержание сухого вещества в коре, %;

$S_{st, tot}$ – суммарное содержание сухого вещества в древесине и коре, %;

$\rho_b, wood$ – базисная плотность древесины, кг/м³;

$\rho_b, bark$ – базисная плотность коры, кг/м³;

ρ_b, tot – суммарная базисная плотность древесины и коры, кг/м³;

S_f – содержание сухого вещества в хвое (листве), %;

S_b, tot – содержание сухого вещества в древесине и коре ветвей суммарно, %;

% foliage – доля хвои в охвоенных побегах кроны, %

2.2. Базисная плотность древесины и коры в географических градиентах

Состояние проблемы. В условиях непрерывно возрастающей глобальной роли лесного покрова планеты оценка кваллиметрических показателей деревьев и древостоев становится одним из приоритетных направлений в исследовании их биологической продуктивности. Развитие неразрушающих методов контроля кваллиметрических показателей фитомассы насаждений и технологий наземного и дистанционного лазерного зондирования создает условия для прогресса в этом приоритетном научном направлении (Predicting wood fiber..., 2015; Modeling black spruce..., 2019; Wylie et al., 2019). Кваллиметрия надземной и подземной фитомасс является составной частью исследований биологической продуктивности и углероддепонирующей способности лесного покрова (Fujiwara et al., 2007; Wood density reduced..., 2018; Climate has a larger effect..., 2019; Earlywood structure..., 2021; What prevails in climatic response..., 2020).

Начиная с конца XIX века, были проведены обширные и детальные исследования влияний видовой принадлежности деревьев, их линейных размеров, генотипа, географического положения, температуры и осадков, высоты над уровнем моря, добротности местопроизрастания, ценоотического статуса и возраста дерева, а также лесоводственных мероприятий, на формирование древесины и ее свойства (Lachowicz et al., 2019; Scots pine and Norway spruce..., 2020; Functional relationships of wood anatomical traits..., 2020; Scots pine stem parameters..., 2020; Effect of initial planting..., 2021).

Для глобального количественного описания биосферных функций лесного покрова, в частности его углероддепонирующей способности, необходимы соответствующие базы данных, включающие в себя количественные характеристики мировых лесов. Развивающиеся возможности IT-технологий открывают для этого широкие перспективы, а термин «большие данные» (Big Data) становится одним из ключевых (<https://www.osp.ru/iz/bigdata2018>). Big Data тесно связаны с облачными технологиями. Основная цель облачных технологий заключается в использовании огромных вычислительных и депозитарных ресурсов под централизованным управлением. Развитие облачных вычислений решает проблему хранения и обработки

больших данных. Технология распределенного хранения информации, основанная на облачных вычислениях, дает возможность эффективно управлять «большими данными» (Chen et al., 2014). В связи с наступлением «эры больших данных» актуализируется формирование мировых баз данных о количественных и качественных показателях фитомассы растительного покрова. Наличие подобных планетарных баз данных дает возможность корректной оценки глобальной биосферной роли лесного покрова планеты.

Сегодня формируются глобальные базы данных не только о количественных показателях фитомассы деревьев и древостоев (BAAD..., 2015; TRY plant trait database..., 2020), но и о ее квалитетических показателях, в частности базисной плотности (БП) (как отношения массы древесины в абсолютно сухом состоянии к ее объему в свежем состоянии) древесины различных древесных видов мира, охватывающих различные регионы и имеющих различный объем, качество и доступность (Wood densities..., 1992; Regional and phylogenetic variation..., 2006; GlobAllomeTree's wood density database, 2014). Крупнейшая из них (Global wood density database, 2009) содержит данные о БП более 8412 таксонов (1638 родов, 191 семейство) деревьев, что, тем не менее, составляет лишь 10 % от имеющихся 100 тыс. древесных видов. Обсуждается также необходимость стандартизации методов оценки БП (Nogueira et al., 2008).

Эти базы данных предоставляют необходимую исходную информацию для глобальных прогнозов углероддепонирующей способности лесов. Показатель плотности древесины, используемый при преобразовании данных о запасе стволовой древесины в показатели фитомассы, является ключевым фактором, влияющим на точность оценки депонирования углерода (Fearnside, 1997; Усольцев, Цепордей, 2020а). С другой стороны, изменения климата, в частности учащающиеся засухи в некоторых регионах, влияют на физиологические процессы, определяющие ксилогенез и БП древесины (Intra-annual variations..., 2005; Vieira et al., 2020).

В качестве независимой переменной в аллометрических уравнениях БП древесины вносит существенный вклад в объяснение изменчивости фитомассы деревьев в тропических лесах (Using volume-weighted average..., 2018), а также в бореальных лесах при моделировании фитомассы двухвойных сосен, лиственницы и березы

(Усольцев, Цепордей, 2021a). При разработке моделей содержания сухого вещества в древесине БП может объяснять до 99.8 % изменчивости искомого показателя (Determination of the dry matter..., 2011). Кроме того, БП древесины имеет важное значение при анализе и прогнозировании реакции фитомассы деревьев на климатические изменения (Vieira et al., 2020; Effects of intra-seasonal drought..., 2021; Pandey, 2021).

БП древесины является ключевым показателем, используемым для определения лесной фитомассы и запасов углерода (Variation in wood density..., 2014; Páscoa et al., 2020). БП является одним из наиболее широко используемых критериев оценки качества древесины и ее прочностных свойств. Преимущества использования сухой массы в числителе формулы БП древесины заключаются в трех аспектах:

- корреляция с физико-механическими свойствами древесины;
- воспроизводимость и сопоставимость результатов;
- простота преобразования в различные условия влажности при наличии информации об усадке (Koch, 1972).

Известно, что древесина обладает необычным сочетанием полезных свойств. БП является показателем пригодности древесины для многих важных применений и связана с механической прочностью древесины. Это определяет ее использование в качестве сырья для пиломатериалов, конструкционной фанеры и других изделий из древесины, а ее величина определяет выход целлюлозы из данного объема древесины (Koch, 1972; Shepard, Shottafer, 1992).

Из-за полезности БП в качестве предиктора качества и прочностных свойств древесины исследователи на протяжении многих лет искали некую легко определяемую ее связь с условиями произрастания деревьев. В первые годы исследований качества древесины, начиная с конца XIX века, было распространено мнение, что древесина медленно растущих пород с узкими кольцами превосходит по величине БП древесину быстро растущих пород с широкими кольцами (Formation and properties..., 2001). Это мнение было подтверждено и современными исследованиями (Roque, Fo, 2007; Effects of plantation density on wood density..., 2007; Variation in wood density..., 2014; Sousa et al., 2016).

Позднее было установлено, что ширина годичного кольца сама по себе не является достоверным критерием оценки качества древесины. Исследования разных видов сосен продемонстрировали, что широкие годичные кольца не обязательно связаны со снижением БП (Formation and properties..., 2001; Effect of growth conditions..., 2006). Было показано, что плотность поздней древесины хвойных деревьев в 2–3 раза превышает плотность ранней древесины (Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955), при последующем учете доли поздней древесины в годичных кольцах оказалось, что она сильно коррелирует с БП (Полубояринов, 1976а; Мелехов и др., 2003). БП возрастает в направлении от сердцевины к наружным слоям ствола, и это определяет ее увеличение с возрастом дерева для всего ствола. Эта закономерность имеет общий характер и наблюдается как у быстрорастущих, так и у медленно растущих деревьев (Молчанов, 1964; Hakkila, 1966; Полубояринов, 1976а; Андрущенко, 1977; Formation and properties..., 2001; Radial variation of fiber dimensions..., 2016).

Географически и филогенетически обусловленное варьирование БП древесины было рассмотрено в рамках ее эволюционной экологии с использованием базы данных как для голосеменных, так и для покрытосеменных растений. Построено филогенетическое «супердерево», позволившее провести анализ различий в филогенезе семенных растений. Географические и популяционные различия в плотности древесины оказались значительно ниже в умеренных широтах и высокогорных сообществах, где преобладали голосеменные, по сравнению с тропическими низинными сообществами, где преобладали покрытосеменные, что предполагает усиление признаков с широтой и высотой местности. Тем самым подтверждена идея, что как биотические, так и абиотические факторы играют важную роль в эволюции плотности древесины, а также в контроле наблюдаемого среднего значения признака и его дисперсии по географическим градиентам (Swenson, Enquist, 2007).

На основе анализа обширной литературы было установлено, что БП древесины является критической функциональной характеристикой растений, необходимой для понимания их эволюции и экологии. БП представляет собой своеобразное окно, через которое интегрируются эволюционные и экологические воздействия, влияющие на разнообразие форм и функций растений. Наблюдаемые различия в БП

древесины между функциональными группами растений означают, что как биотические, так и абиотические факторы, играют важную роль в эволюции форм, функций и разнообразия растений на разных концах высотного и широтного градиентов (Swenson, Enquist, 2007). У нескольких видов елей и сосен было установлено увеличение БП древесины по мере увеличения густоты древостоя (Гордина, 1985; Yang 2002; Effects of plantation density on wood density..., 2007; Yang, Hazenberg, 2011; Variation in wood density..., 2014). Однако в 27-летних культурах тополя в Китае и 12-летних культурах клена на севере Ирана не было установлено связи БП с густотой древостоя (Effect of stand and tree attributes..., 2007; Effect of intensive planting density..., 2015).

В тропических лесах было выявлено существенное увеличение БП по мере перехода от влажных к сухим местообитаниям (How many trees and samples..., 2020). Связь БП древесины с типами леса была показана также в сосновых древостоях России (Мелехов и др., 2003). Кроме того, исследование изменчивости БП у нескольких видов сосен показало, что она объясняется не столько лесорастительными условиями, сколько генетическими особенностями видов (Thor, Bates, 1970; Fujimoto et al., 2008).

БП древесины является идеальным объектом в селекционных программах (Genetic analysis of fiber-dimension traits..., 2019; Genetic analysis of wood quality traits..., 2019). Было показано наличие умеренного и сильного генетического контроля свойств древесины у дугласовой пихты (Improving models of wood density..., 2001), у ели (Ivkovich et al., 2002; Genetic control of wood properties..., 2010) и сосны обыкновенной (Persson, 1972; Differences in growth and wood density traits..., 2009; Gort-Oromi, 2010). Причем, плотность ранней древесины в большей степени контролируется генетическими, а плотность поздней древесины – экологическими и климатическими факторами (Within and between-tree variation..., 2017). Однако этот контроль, в конечном счете выраженный определенным фенотипом, в значительной степени регулируется факторами окружающей среды (Growth rate and wood properties..., 2006) и проявляется в БП древесины не только ствола, но и ветвей (Persson, 1972). Установлена общая закономерность, согласно которой у деревьев наблюдалась более высокая

БП ветвей по сравнению с БП ствола, а также снижение этой разницы по мере увеличения БП ствола (MacFarlane, 2020).

Исследование фенотипических корреляций между БП генотипов ели европейской и модифицированной широтой местности происхождения родительских деревьев показало на уровне значимости $p < 0,05$ наличие отрицательного тренда, согласно которому увеличение широты на один градус вызывает снижение БП древесины на 6 кг/м^3 (Differences in growth and wood density..., 2017). В нашем исследовании (Усольцев, Цепордей, 2022в) БП древесины лесообразующих видов Северной Евразии установлено, что увеличение широты на 1 градус вызывает снижение БП древесины на $2,1 \text{ кг/м}^3$, а увеличение долготы на 1 градус – снижение БП древесины на $1,1 \text{ кг/м}^3$. Возможно, расхождение между результатами двух названных исследований связано с тем, что в эксперименте с генотипами ели широта местности была скорректирована путем введения высотноклиматической поправки в предположении, что реакция БП на увеличение широты на один градус к северу идентична реакции на сдвиг высоты над уровнем моря на 100 м (Laaksonen, 1976).

Исследование географической изменчивости БП древесины актуально как для повышения точности оценки биологической продуктивности в климатических градиентах, так и для расчета норм расхода сырья и выхода продукции на предприятиях целлюлозно-бумажной продукции. Исследованиями зарубежных ученых установлено увеличение БП древесины в направлении к экватору как в северном, так и в южном полушариях. Аналогичные тренды установлены в направлении с севера на юг в Норвегии и Финляндии (Полубояринов, 1976а). Иной результат получен по данным 1012 деревьев 60 древесных видов Японии: практически ни по одному не было выявлено региональных различий по базисной плотности (Fujiwara et al., 2007).

Во Франции было установлено снижение БП древесины в высотном градиенте в направлении вверх по горному склону (Kerfriden et al., 2021). Положительная связь БП с среднегодовой температурой была установлена в древостоях дугласии в Новой Зеландии (Modelling the variation in wood density..., 2017). Закономерности изменения БП древесины были проанализированы в связи с географической широтой, типом леса, температурой и осадками (Howe, 1974; Полубояринов, 1976а; Kellomäki, 1979; Мелехов и др., 2003; Swenson, Enquist,

2007; Wiemann, Williamson, 2002; St-Germain et al., 2008). Положительная связь БП древесины сосны обыкновенной с температурой была установлена разными авторами на территории Финляндии, но эта связь характеризовалась низкими коэффициентами детерминации (Mikola, 1950; Saikku, 1975; Kellomäki, 1979).

Анализ многофакторной связи БП ствола с географическими независимыми переменными (широта, долгота, высота над ур. м.) показал, что наиболее тесная связь выявлена с географической долготой, объяснившей 13 % ее изменчивости (Maeglin, Wahlgren, 1972). Анализ парных связей БП диптерокарпа в Индии с широтой и долготой показал, что они объясняют 35 и 29 %, соответственно, изменчивости искомого показателя (Al-Sagheer, Prasad, 2010).

На глобальном уровне сделан анализ изменчивости БП древесины в широтном диапазоне от 52° с. ш. до экватора, и установлено увеличение плотности на 0,5 % на каждый градус среднегодовой температуры и снижение на 0,02 % на каждый сантиметр среднегодовых осадков (Wiemann, Williamson, 2002). Рассматриваемая отдельно, среднегодовая температура оказалась лучшим предиктором базисной плотности в зоне умеренных лесов (в диапазоне от 3 до 22 °С), объясняя 80 % изменчивости искомого показателя, по сравнению со всем исследуемым температурным диапазоном с объясненной изменчивостью 62 %, или по сравнению с теплыми тропическими районами (> 23 °С) с объясненной изменчивостью 33 %. Напротив, только уровень среднегодовых осадков был лучшим предиктором базисной плотности в теплых тропических регионах (62 %) по сравнению со всем исследуемым температурным диапазоном (4 %) (Wiemann, Williamson, 2002).

По результатам анализа глобальной базы данных по базисной плотности древесины в количестве 7753 измерений 4667 видов семенных растений установлена положительная связь БП древесины покрытосеменных и голосеменных растений со среднегодовой температурой и максимальной месячной температурой. Отрицательная корреляция между БП древесины и осадками была обнаружена у покрытосеменных растений. Значительная отрицательная корреляция установлена между БП древесины и высотой над уровнем моря (Swenson, Enquist, 2007).

Аналогичные связи БП с температурой и осадками были установлены в тропических лесах Бразилии, где в территориальном градиенте 228 км установлен диапазон фактических значений БП от 514 до 659 кг/м³. Анализ парных связей БП с климатическими переменными показал наличие положительной связи со среднегодовой температурой и эвапотранспирацией и наличие отрицательной связи со среднегодовыми осадками. При этом вклады температуры, осадков и эвапотранспирации в объяснение изменчивости БП в отдельности составили 40, 32 и 69 % (Behavior of wood basic density..., 2022). Необходимо отметить, что вклад эвапотранспирации в объяснение изменчивости другого продукционного показателя – первичной продукции – в лесах Китая был существенно ниже, а именно 24 %, по сравнению с 31 и 42 % температуры и осадков, соответственно (Ni et al., 2001).

Бортовое и наземное лазерное сканирование обеспечивает широкий спектр характеристик древостоев для моделирования. Это было продемонстрировано предсказанием свойств древесных волокон деревьев на пробных площадях с использованием данных как бортового (Predicting wood quantity..., 2014), так и наземного лазерного зондирования (Predicting wood fiber..., 2015). В последнем случае были выявлены значительные корреляции плотности с изменчивостью вертикального профиля полога. Вклад данных наземного лазерного зондирования в оценку плотности древесины у ели черной составил 47 % ее общей дисперсии (Modeling black spruce..., 2019). Наземное лазерное сканирование дает с высокой точностью характеристики структуры дерева и древостоя, которые связаны с плотностью древесины (Assessment of standing wood and fiber quality..., 2011). Установление статистических связей между структурными характеристиками, полученными путем наземного лазерного сканирования и наземного определения плотности древесины, явилось важным шагом в повышении точности оценки структурных показателей, которые могут быть использованы для картографии плотности древесины на крупных ландшафтах путем бортового лазерного зондирования. Разработка картографических продуктов по географическим градиентам в сочетании с возможностями дистанционного зондирования локальных структурных показателей древостоев обеспечивает поддержку мелкомасштабного картографирования плотности древесины (Predicting wood fiber..., 2015).

Таким образом, исследование изменчивости БП под влиянием различных эндо- и экзогенных факторов выполнялось или для отдельных древесных видов в пределах некоторого региона, или имелись обобщения планетарного уровня для совокупности видов. Моделирование связей БП с независимыми переменными, характеризующими морфоструктуру, возраст и физиологию дерева, выполнено в местообитаниях отдельных регионов. Отдельные исследования посвящены моделированию БП на глобальном уровне.

Показатели БП варьируют не только в поперечном сечении ствола, но и вдоль по стволу (Полубояринов, 1976а; Исаева, 1978; Fujimoto et al., 2008; Radial variation of basic density..., 2011; Sousa et al., 2016; Vertical variations..., 2021). В настоящем исследовании мы уходим от анализа изменчивости БП вдоль и поперек ствола и ограничиваемся моделированием показателей БП, средних для всего ствола дерева, как это было представлено в других базах данных (Wood basic density..., 2021).

Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии. Как было установлено ранее, моделирование БП древесины было выполнено лишь на уровне отдельных регионов, а по показателю БП коры приводятся лишь немногочисленные средние значения. Наличие базы данных о квалитметрических показателях лесообразующих видов Северной Евразии дало возможность выявить географические закономерности БП древесины и коры на территории Евразии.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи (Усольцев, Цепордей, 2022в):

- разработать регрессионные зависимости БП от дендрометрических показателей деревьев, географического положения и видовой принадлежности деревьев;
- оценить вклад дендрометрических показателей, географического положения и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры;
- выполнить ранжирование древесных видов по величине БП древесины и коры.

Для решения поставленных задач использована база данных о квалитметрии лесообразующих пород Северной Евразии (Usoltsev, 2020). Из нее отобраны 3450 модельных деревьев девяти древесных

видов, имеющих данные о дендрометрических показателях и БП древесины и коры стволов, а также о положении пробных площадей по широте и долготе. Их характеристика дана в табл. 5.

Таблица 5

Статистики показателей 3450 модельных деревьев,
включенных в регрессионный анализ

Обозначение статистик	Анализируемые показатели						
	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>DW</i>	<i>DB</i>	<i>LAT</i>	<i>LON</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
Сосна обыкновенная							
Mean	46,0	12,5	11,9	398,4	290,7	–	–
Min	5,0	1,1	1,4	254,0	164,3	44,6	24,3
Max	186,0	55,0	36,6	640,4	636,4	79,4	97,0
SD	33,5	9,5	7,1	52,1	61,9	–	–
CV, %	72,8	76,3	59,5	13,1	21,3	–	–
n	966,0	957,0	965,0	966,0	966,0	–	–
Кедр сибирский и корейский							
Mean	42,0	9,3	8,0	354,7	717,9	–	–
Min	15,0	1,5	1,7	245,8	298,7	43,6	59,9
Max	165,0	29,3	24,0	509,9	969,5	59,8	132,3
SD	37,5	6,7	5,5	51,1	214,4	–	–
CV, %	90,4	71,5	68,7	14,4	29,9	–	–
n	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	–	–
Лиственница							
Mean	81,0	13,7	12,2	511,7	335,8	–	–
Min	15,0	0,3	1,4	382,4	186,3	49,2	64,5
Max	400,0	52,8	30,0	735,5	545,3	67,0	148,0
SD	73,2	8,9	5,5	43,0	69,7	–	–
CV, %	90,5	64,7	44,8	8,4	20,8	–	–
n	193,0	194,0	193,0	194,0	194,0	–	–
Ель							
Mean	48,0	12,4	9,1	393,2	433,5	–	–
Min	11,0	1,0	1,5	238,1	176,7	43,7	12,0
Max	163,0	51,5	30,6	648,1	866,7	64,0	132,5
SD	32,6	10,2	6,1	64,6	126,5	–	–
CV, %	67,8	81,7	67,5	16,4	29,2	–	–
n	279,0	279,0	230,0	279,0	279,0	–	–
Пихта							
Mean	70,0	20,3	16,3	364,2	429,2	–	–
Min	8,0	1,6	2,2	272,8	299,1	43,7	22,7
Max	180,0	46,2	28,9	513,0	606,7	56,8	132,5
SD	40,2	11,0	7,2	41,3	71,1	–	–
CV, %	57,6	54,2	44,5	11,3	16,6	–	–
n	92,0	92,0	92,0	92,0	92,0	–	–

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
Береза							
Mean	43,0	14,1	14,3	499,0	532,5	–	–
Min	4,0	1,0	1,4	312,2	215,1	48,1	26,0
Max	142,0	48,0	34,5	769,4	993,3	64,0	148,0
SD	22,9	8,0	5,8	46,3	97,9	–	–
CV, %	52,9	57,1	40,7	9,3	18,4	–	–
n	899,0	901,0	882,0	901,0	901,0	–	–
Осина							
Mean	32,0	15,7	15,3	417,3	468,0	–	–
Min	3,0	1,1	2,4	301,0	311,0	31,2	30,8
Max	57,0	45,7	28,8	500,0	692,0	56,7	70,4
SD	13,1	9,0	5,7	23,7	36,1	–	–
CV, %	41,3	57,1	37,3	5,7	7,7	–	–
n	317,0	317,0	317,0	317,0	317,0	–	–
Липа							
Mean	52,0	17,7	16,7	415,8	483,8	–	–
Min	10,0	3,1	4,8	252,3	248,5	43,6	37,4
Max	115,0	38,6	24,8	647,8	900,0	55,8	132,3
SD	22,2	8,4	5,1	73,6	105,5	–	–
CV, %	42,4	47,7	30,3	17,7	21,8	–	–
n	202,0	202,0	187,0	202,0	202,0	–	–
Дуб							
Mean	41,0	16,4	14,9	582,8	412,8	–	–
Min	6,0	1,9	2,8	450,0	269,6	43,6	27,5
Max	166,0	50,5	31,5	800,0	800,0	51,5	132,3
SD	23,9	9,4	6,5	50,6	71,4	–	–
CV, %	58,2	57,1	43,9	8,7	17,3	–	–
n	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	–	–

Примечание. Mean, Min и Max – среднее, минимальное и максимальное значения, соответственно; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; LAT и LON – широта и долгота местности, соответственно, град.; DW и DB – базисная плотность древесины и коры, соответственно, кг/м³.

Эмпирические данные БП на пробных площадях получены по 3–10 дискам, выпиленным вдоль по стволу. БП (отдельно древесины и коры) рассчитана в результате обмера и взвешивания дисков, сушки до постоянной массы и повторного взвешивания. БП всего ствола

рассчитана как средневзвешенная по площади поперечного сечения дисков.

При моделировании фитомассы деревьев получили распространение модели смешанного типа (mixed-effects models) (Molteberg, Nøibø, 2007; Zeng et al., 2011; Using linear mixed model..., 2012; Zeng, 2017; Allometric models to predicate..., 2021; Augmentative modelling..., 2021). Аллометрическая модель смешанного типа включает два типа независимых переменных: численные, принимающие значения из непрерывного ряда чисел, и фиктивные переменные, представляющие дискретные качественные характеристики (Дрейпер, Смит, 1973). Древесные виды (роды) представлены в базе данных крайне неравномерно: от примерно 1000 по сосне обыкновенной до 80 деревьев по кедром сибирскому и корейскому. Разная представленность их как по общему количеству, так и в географических координатах в пределах ареалов, может привести к тому, что закономерности изменения БП для разных древесных видов будут во многом специфичными и несопоставимыми именно по этой причине, тогда как в основе географической изменчивости биологической продуктивности лежат общие для всех видов (родов) биоэкологические и климатические факторы.

Эта всеобщность действия определяющих внешних факторов позволяет предположить однонаправленность реакции видов на эти факторы и следовательно – однотипность (а не видоспецифичность) аллометрических моделей БП (Molteberg, Nøibø, 2007). Исходя из качественного уровня имеющейся базы данных, было намерение в первом приближении построить аллометрические модели БП смешанного типа, включающие как численные (дендрометрические показатели и географические координаты), так и фиктивные переменные, кодирующие видовую принадлежность исходных данных (табл. 6).

Мы приняли следующую структуру аллометрической модели смешанного типа:

$$\ln(DW) \text{ или } \ln(DB) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(H) + b_4 \ln(LAT) + b_5 \ln(LON) + \sum a_i X_i, \quad (16)$$

где $\sum a_i X_i$ – блок фиктивных переменных в количестве $(i + 1)$;

a_0 – свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование модели (Baskerville, 1972);

$b_1 \dots b_5$ – регрессионные коэффициенты при численных переменных уравнения.

Таблица 6

Схема кодирования девяти лесообразующих пород Северной Евразии, у которых определена БП древесины и коры стволов

Порода	Блок фиктивных переменных							
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
Сосна обыкновенная	0	0	0	0	0	0	0	0
Кедр сибирский и корейский	1	0	0	0	0	0	0	0
Лиственница	0	1	0	0	0	0	0	0
Ель	0	0	1	0	0	0	0	0
Пихта	0	0	0	1	0	0	0	0
Береза	0	0	0	0	1	0	0	0
Осина	0	0	0	0	0	1	0	0
Липа	0	0	0	0	0	0	1	0
Дуб	0	0	0	0	0	0	0	1

В результате регрессионного анализа получены модели:

– для БП древесины ствола:

$$\begin{aligned} \ln(DW) = & 6,9597 + 0,0876 \ln(A) - 0,0680 \ln(H) - 0,1478 \ln(LAT) - \\ & - 0,1290 \ln(LON) - 0,1201X_1 + 0,2690X_2 - 0,0559X_3 - \\ & - 0,1716X_4 + 0,2332X_5 + 0,0878X_6 + 0,0285X_7 + 0,2973X_8; \end{aligned} \quad (17)$$

$$adjR^2 = 0,640; \quad SE = 0,10;$$

– и для БП коры ствола:

$$\begin{aligned} \ln(DB) = & 7,9764 + 0,0529 \ln(H) - 0,3665 \ln(LAT) - 0,1598 \ln(LON) + \\ & + 0,78741X_1 + 0,1853X_2 + 0,2978X_3 + 0,2711X_4 + 0,5641X_5 + \\ & + 0,4487X_6 + 0,4477X_7 + 0,1683X_8; \end{aligned} \quad (18)$$

$$adjR^2 = 0,554; \quad SE = 0,20.$$

Численные переменные во всех уравнениях (16) оказались значимыми на уровне $p < 0,001$. Диаметр ствола в модели (17) и диаметр ствола и возраст дерева в модели (18) оказались статистически не значимы на уровне $p < 0,05$ и были исключены из числа независимых переменных. Судя по знакам регрессионных коэффициентов при переменных $\ln(LAT)$ и $\ln(LON)$, БП древесины и коры деревьев всех девяти видов в пределах их ареалов снижается в направлениях с юга на север и с запада на восток.

Для геометрического 3D-изображения моделей (17) и (18) в координатах широты и долготы в модели были подставлены средние значения возраста и высоты дерева. Благодаря специфике фиктивных переменных, видовые различия 3D-изображений в координатах широты и долготы определяются только величиной свободного члена, то есть сдвигом 3D-поверхности по оси ординат. Поскольку конфигурация трехмерной геометрической интерпретации моделей (17) и (18) для всех древесных видов одна и та же, на рис. 23 мы показываем ее только для сосны обыкновенной.

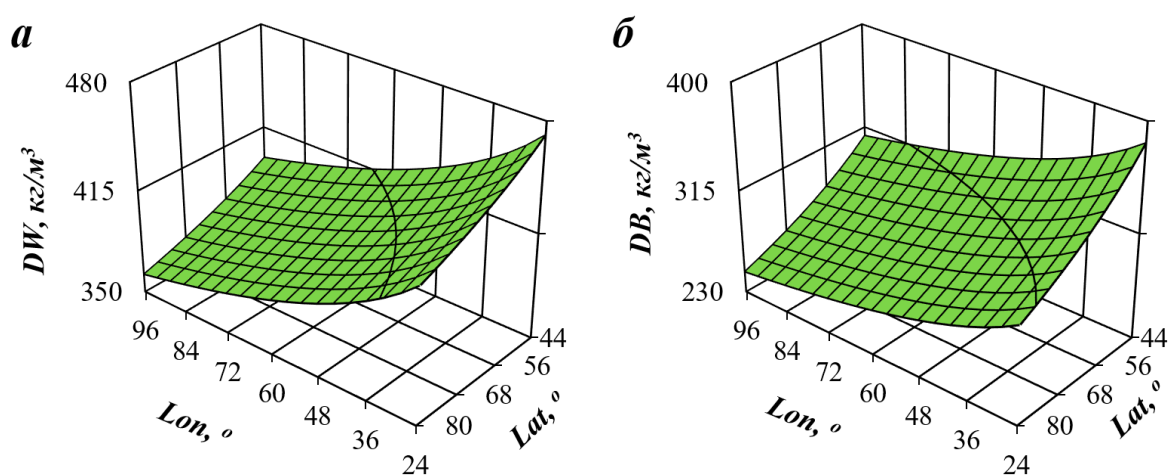


Рис. 23. Изменение расчетных значений БП древесины (а) и коры (б) сосны обыкновенной в градиентах широты и долготы при неизменных дендрометрических показателях дерева

Согласно рис. 23а, снижение БП древесины составляет в широтном градиенте 0,25 % на 1° с. ш. и в долготном градиенте 0,26 % на 1° в. д. Согласно рис. 23б, снижение БП коры составляет в широтном градиенте 0,55 % на 1° с. ш. и в долготном градиенте 0,28 % на 1° в. д.

Результаты регрессионного анализа дали возможность выполнить вторую задачу исследования – оценить вклады дендрометрических переменных, географического положения пробных площадей и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры стволов (табл. 7).

Таблица 7

Вклад дендрометрических переменных, географического положения пробных площадей и видовой принадлежности в объяснение изменчивости БП древесины и коры стволов, %

Номер модели	A (I)	H (II)	(I) + (II)	(LAT) (III)	(LON) (IV)	(III) + (IV)	$\Sigma a_i X_i$
(17)	8,4	5,9	14,3	2,0	10,0	12,0	73,7
(18)	–	4,0	4,0	2,5	6,9	9,4	86,6

Судя по данным табл. 7, дендрометрические переменные объясняют изменчивость БП на уровне от 4 до 14 %, географическое положение – от 7 до 10 %. Наибольший вклад в объяснение общей изменчивости БП вносит видовой принадлежность деревьев – от 74 до 87 %. Это соответствует ранее полученному выводу французских исследователей, что внутривидовая изменчивость БП несопоставимо меньше по сравнению с межвидовой (Kerfriden et al., 2021). Сказанное подтверждается анализом глобальной базы данных по базисной плотности древесины в количестве 7753 измерений 4667 видов семенных растений. Было установлено, что внутривидовая изменчивость составила 10 % общей изменчивости БП (Swenson, Enquist, 2007).

Столь большой процент объясненной изменчивости БП видовой принадлежностью предполагает очень большое различие видов по величине БП, и в этой связи представляет интерес их ранжирование. Диаграмма распределения древесных видов по величине БП построена по средним для всех видов значениям возраста дерева (45 лет) и его высоты (13,8 м), в координатах 60° с. ш. и 60° в. д. Диаграмма убывающей последовательности видов по величине БП представлена на рис. 24.

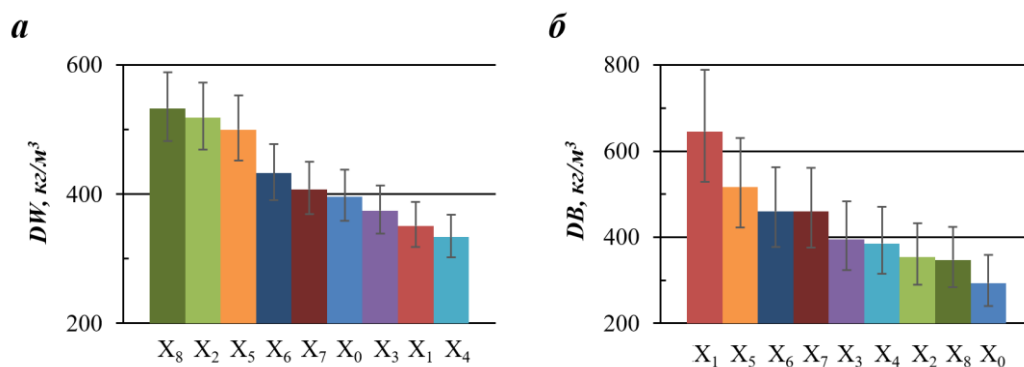


Рис. 24. БП древесины (а) и коры (б) равновеликих деревьев девяти лесообразующих видов Евразии в убывающей последовательности.

Кодировку древесных видов $X_0...X_8$ см. табл. 6

Согласно рис. 24, БП древесины снижается в последовательности: дуб, лиственница, береза, осина, липа, сосна, ель, кедр и пихта. Закономерность снижения БП коры совершенно другая: кедр, береза, осина, липа, ель, пихта, лиственница, дуб и сосна. Это означает, что каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением БП древесины и коры. Следовательно, при оценке фитомассы стволов деревьев в абсолютно сухом состоянии с целью повышения точности результата необходимо замерять объем и массу диска отдельно для древесины и коры, а не диска в коре в целом, как это часто практиковалось и продолжает практиковаться как в отечественных (Молчанов, 1971; Казимиров, Морозова, 1973; Обмен веществ и энергии..., 1977; Семечкина, 1978; Фитомасса лесных культур..., 2007), так и зарубежных (Burger, 1953; Karizumi, 1974; Vyskot, 1981; Broshtilova, 1983; Le Goff, 2019) исследованиях фитомассы деревьев.

Таким образом, установлена статистически значимая закономерность снижения БП древесины и коры равновеликих стволов деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток в пределах ареалов девяти лесообразующих видов Евразии. Тем самым, подтверждено ранее выявленное увеличение БП древесины в направлении от полюсов к экватору и в северном, и в южном полушариях (Полубояринов, 1976а; Tsoumis, Panagiotidis, 1980). Значение БП древесины некоторых видов сосны увеличивалось в зависимости от места произрастания дерева, с севера на юг. Испытания проводились в отдельных штатах – Техасе, Флориде, Алабаме, а также вдоль Атлантического побережья от Северной Каролины до Флориды (Taras, Saucier, 1968; Koch 1972). Аналогичные тренды установлены в направлении с севера на юг в Норвегии и Финляндии (Полубояринов, 1976а). Иной результат получен по данным 1012 деревьев 60 видов Японии: практически ни по одному виду не было выявлено региональных различий по БП (Fujiwara et al., 2007). Не было выявлено географических закономерностей в изменении БП также по некоторым видам сосен в США (Saucier, Taras, 1969).

В результате проведенного исследования выявлена статистически значимая положительная связь БП древесины с возрастом дерева и отрицательная – с его высотой, что, как отмечалось выше, связано с увеличением доли поздней древесины как с возрастом дерева, так

и с изменением положения дерева в древесном пологе по классу Крафта. Тем самым, подтверждена ранее установленная закономерность повышения БП с возрастом дерева у сосны ладанной (Formation and properties..., 2001), в культурах сосны обыкновенной (Андрущенко, 1977), а также у дуба, ясеня, ильма, липы и клена остролистного в европейской части России (Молчанов, 1964).

Отрицательная связь БП древесины с размером дерева (связанным с его классом Крафта) была показана ранее в сосняках-беломошниках Архангельской области в разных классах возраста (Молчанов, 1974), у ели в Карелии (Казимиров, Морозова, 1973) и у дугласовой пихты в США (Vahey et al., 2007). Однако противоположная закономерность показана в сосняках Сибири (Гордина, 1985), а также в сосняках, ельниках и березняках Латвии (Lierpiņš J., Lierpiņš K., 2017). Согласно исследованию, проведенному в субтропиках Китая (Tree growth traits..., 2017), повышенная БП у подавленных деревьев по отношению к деревьям-лидерам наблюдалась лишь у теневыносливых видов, а у светолюбивых закономерность была противоположной.

Установленная отрицательная связь БП коры с высотой дерева связана, по-видимому, с увеличением доли корки по мере увеличения высоты дерева и связанного с ней возраста. Насколько нам известно, какие-либо выявленные закономерности изменения БП коры с размером и возрастом дерева в литературе отсутствуют. Косвенным подтверждением названной закономерности изменения БП с высотой дерева являются результаты А. П. Андрущенко (1977), установившего снижение БП коры в культурах сосны обыкновенной с 330 до 306 кг/м³ при увеличении возраста с 26 до 100 лет.

Таким образом, построенные модели зависимости БП древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев позволили установить статистически значимую закономерность снижения БП древесины и коры равновеликих деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток, действительную в пределах ареалов девяти лесообразующих видов Евразии. В построенных моделях дендрометрические переменные объясняют изменчивость БП на 4...14 % и географическое положение – на 7...10 %. Наибольший

вклад в объяснение общей изменчивости БП вносит видовая принадлежность деревьев – от 74 до 87 % (Усольцев, Цепордей, 2022в).

Установлено, что каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением БП древесины и коры. Установленные закономерности изменения БП древесины и коры основных лесобразующих видов Евразии в зависимости от возраста, линейных размеров деревьев и географического положения должны внести вклад в более корректную оценку депонирования углерода в стволах, составляющих наибольшую долю в фитомассе деревьев (Усольцев, Цепордей, 2022в).

2.3. Содержание сухого вещества в фракциях фитомассы в географических градиентах

Состояние проблемы. С точки зрения проблематики фитомассы деревьев, оцениваемой в абсолютно сухом состоянии, большой интерес представляет не только базисная плотность, но также содержание сухого вещества (ССВ) в фракциях (компонентах) фитомассы. Абсолютно сухая фитомасса древесины и коры стволов определяется с использованием ССВ и базисной плотности, а фитомасса листвы, хвои, ветвей, корней и нижних ярусов – с использованием только ССВ (Усольцев, Цепордей, 2020а).

Показатель ССВ в фракциях фитомассы деревьев (величина, обратная влажности), наряду с плотностью древесины, является ключевым признаком, дающим сведения о механических свойствах древесины и полезную информацию для многих промышленных и научных целей (Variability in wood density..., 2016). Большинство физиологических процессов, связанных с транспирацией и фотосинтезом в листьях, невозможны без участия воды (Chapin et al., 2011). Влажность растительных тканей определяет специфику физиологии растений (Феклистов, Амосова, 2013). Для поддержания жизнедеятельности клеткам растений требуется 85...89 % воды. От содержания воды в растительных тканях зависят рост и устойчивость растений (Maiti et al., 2016).

Показатель ССВ имеет также самостоятельное значение, например, при оценке калорийности древесины, в изучении водного статуса

растений и оценке биологической продуктивности насаждений. ССВ является одним из важных свойств растений, изучаемых в экологии, и объясняет наибольшую долю изменчивости первичной продукции растений.

Моделирование ССВ в компонентах фитомассы деревьев дает возможность селекции генотипов с максимальным его содержанием и формирования древостоев с повышенным ССВ путем лесохозяйственных мероприятий (Effect of moisture content..., 2014; Differences in growth and wood density..., 2017; Baturaygil et al., 2021). ССВ листьев влияет на ход процесса фотосинтеза, продуцирования ассимилятов, связывания CO_2 и выделения кислорода (Albertson, 1988; Nakvasina, 2009). Исследования связей ассимиляционного аппарата древесных видов с основными морфологическими параметрами древостоев дают основу для моделирования и прогнозирования их экологических функций (Bartelink, 1997; Küssner, Mosandl, 2000).

Поскольку водный статус разных компонентов растений в различных экологических условиях может сильно различаться, предприняты попытки стандартизировать процедуры его определения (Garnier et al., 2001; Tackenberg, 2007).

По сравнению с публикациями, посвященными БП древесины, количество работ с результатами по ССВ сравнительно меньше, и приводятся эти данные или в связи с возрастом дерева и (или) диаметром ствола (Молчанов, 1974; Джабык-Карагайский бор, 2005; Additive biomass equations..., 2015; Усольцев, Цепордей, 2020а; Baturaygil et al., 2021), либо как средние значения для того или иного компонента фитомассы (Поздняков, 1973; Усольцев, 1975; Shipley, Vu, 2002; Hobbs, Bennell, 2005; Experimental measurement of the biomass..., 2013; Spatial variation and mechanisms..., 2021; Variation and adaptation..., 2021). Показатель ССВ объясняет 55 % изменчивости чистой первичной продукции древесных и травянистых растений (Leaf dry matter content..., 2017).

При исследовании древесины ельников сделан вывод, что ССВ в древесине не может быть определено с достаточной точностью при замере только морфологических показателей деревьев. Для этого необходимо взятие кернов в стволах исследуемых деревьев (Bergstedt, Olesen, 2000). ССВ в растениях часто определяют на основе простой

линейной связи с базисной плотностью (Determination of the dry matter..., 2011), объясняющей до 99 % общего варьирования искомого показателя, но подобные модели могут применяться только в случаях, когда известна базисная плотность растительной ткани.

Одной из ключевых характеристик продуктивности ассимиляционного аппарата является удельная поверхность листвы или хвои (*specific leaf area – SLA*) как отношение поверхности к абсолютно сухой массе (Wilson et al., 1999; Specific leaf area..., 2005; Уткин и др., 2008; Biomass allocation into woody parts..., 2020). Она может быть определена по ее связи с ССВ. Эта зависимость, описанная степенной функцией по эмпирическим данным 780 выборок листвы в совокупности древесных, кустарниковых и травянистых растений, объяснила 92 % изменчивости удельной поверхности листвы (Garnier et al., 2001).

В другом исследовании ССВ в качестве независимой переменной в уравнении связи с базисной плотностью объясняло 58 % изменчивости последней в совокупности данных 96 растений 17 видов. ССВ рассматривалось как мера концентрации сухого вещества в различных компонентах фитомассы растений. Поскольку в отношении различных компонентов растений (листва, ветви, ствол, корни) определение объема намного более трудоемко, чем определение ССВ, эта зависимость была предложена в качестве наиболее перспективной (Shipley, Yu, 2002). Для совокупности древесных и травянистых видов на 49 пробных площадях в Англии было проведено сравнительное исследование зависимости надземной чистой первичной продукции сообществ от ССВ и от удельной поверхности листвы. Установлено, что ССВ объясняет наибольшую долю изменчивости первичной продукции (55 %) по сравнению с удельной поверхностью листвы, оценка которой к тому же намного трудозатратнее, чем ССВ (Leaf dry matter content..., 2017).

В связи с климатическими изменениями повысилась важность точной оценки фитомассы разных компонентов деревьев и древостоев, а также их углерод депонирующей способности. Одним из способов повышения точности оценок является усовершенствование методов определения ССВ.

ССВ тесно коррелирует с базисной плотностью (Shipley, Vu, 2002; Determination of the dry matter..., 2011), эту взаимосвязь можно использовать в отношении фитомассы ствола, но очень затруднительно и нерационально в отношении фитомассы хвои, ветвей и корней (Shipley, Vu, 2002).

Показатель ССВ является одним из важных свойств растений, изучаемых в экологии, и зависит от водного статуса разных компонентов растений в разных экологических условиях (Garnier et al., 2001; Tackenberg, 2007). Он изменяется в течение суток, в течение сезона, в зависимости от влажности почв и воздуха и определяет физиологическое состояние дерева как при недостатке, так и при избытке влаги в почве (Lyr et al., 1967). В хвое ССВ связано с эффективностью фотосинтеза, активностью транспирации, водоудерживающей способностью, резистентностью к действию лимитирующих температурных факторов, устойчивостью растений в широком смысле (Lyr et al., 1967; Бессчетнова, 2011). Показатель ССВ в древесине деревьев используется в лесной селекции для отбора генотипов с максимальным ССВ (Wayu, Atsbha, 2019; Baturaygil et al., 2021). Достижение максимального ССВ является целью специальных лесохозяйственных мероприятий (Bergstedt, Olesen, 2000). Оно имеет большое значение в производстве целлюлозы (Hultnas, 2011).

Листва как связующее звено между почвой и атмосферой является одним из важнейших органов растений и основным драйвером обмена веществ и энергии в растительных сообществах. Большинство физиологических процессов, связанных с транспирацией и фотосинтезом в листьях, невозможны без участия воды (Челядинова, 1941; Variation and adaptation..., 2021).

Проблеме изменчивости содержания воды в листе (СВЛ) посвящено обширное исследование более 5,6 тыс. видов растений, охватывающее все природные зоны Китая. Установлено, что СВЛ увеличивается по мере возрастания сухости местообитаний и снижается по мере повышения их влагообеспеченности (Variation and adaptation..., 2001). Изменчивость СВЛ была выше в засушливых районах, и виды с низким СВЛ более чувствительны к изменению среды. Показана экономически эффективная стратегия растений, где виды в более сухих условиях требуют более высоких затрат энергии для поддержания

высокого СВЛ с целью обеспечения стабильности водного баланса. В более влажных условиях наблюдается противоположная тенденция, поскольку здесь влага не является лимитирующим фактором, и растениям не нужно вкладывать больше энергии для ее потребления (Variation and adaptation..., 2021).

На региональном уровне не выявлено какой-либо связи СВЛ со средней годовой температурой, но имеется слабая отрицательная связь со среднегодовыми осадками (Variation and adaptation..., 2021). Слабая отрицательная связь СВЛ со среднегодовыми осадками была установлена также в травянистых сообществах Монгольского Плато, Лессового Плато и Тибетского Плато в Китае (Spatial variation and mechanisms..., 2001). Обратной пропорциональной зависимости СВЛ и ССВ в листве означает наличие положительной связи ССВ в листве с количеством осадков. Развитие технологий наземного лидарного зондирования дает хорошую перспективу для получения широкомасштабных данных СВЛ и ССВ лесного покрова с относительно невысокими трудозатратами (Canopy leaf water content..., 2017).

Таким образом, моделирование связей ССВ с независимыми переменными, характеризующими морфоструктуру, возраст и физиологию дерева, выполнено лишь в местообитаниях отдельных регионов. Региональный уровень имеют также модели, в которых ССВ является независимой переменной. Поскольку определяющими факторами роста деревьев являются климатические переменные, необходимо знание климатически обусловленных изменений ССВ в фитомассе деревьев. Насколько нам известно, результаты подобных исследований ССВ в открытых источниках отсутствуют.

Географические закономерности содержания сухого вещества в фитомассе деревьев 13 видов Евразии. Наличие базы данных о климатических показателях фитомассы деревьев лесобразующих видов Евразии (Usoltsev, 2020) дало возможность выполнить анализ изменения ССВ во фракциях фитомассы на трансевразийском уровне (Усольцев, Цепордей, 2022а). Целью проведенного исследования было выявление географических закономерностей изменения ССВ в фитомассе деревьев лесобразующих видов (родов) на территории Северной Евразии.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи (Усольцев, Цепордей, 2022a):

- выявить географическую составляющую изменчивости ССВ лесообразующих видов на территории Северной Евразии;
- установить вклад дендрометрических и географических независимых переменных, а также видовой принадлежности, в объяснение изменчивости ССВ во фракциях фитомассы;
- выполнить ранжирование древесных видов Северной Евразии по ССВ в фракциях фитомассы.

Для решения поставленных задач использована база данных о квалиметрии лесообразующих пород Северной Евразии (Usoltsev, 2020). Из нее отобрано 2574 модельных деревьев с измеренными показателями возраста, диаметра ствола, высоты дерева и ССВ в фракциях биомассы 13 лесообразующих видов Северной Евразии.

Статистики выборок анализируемых показателей деревьев показаны в табл. 8. Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (<http://www.statgraphics.com>).

Таблица 8

Статистики анализируемых показателей деревьев

Обозначение статистик	Анализируемые показатели								
	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>Sw</i>	<i>Sbk</i>	<i>Sf</i>	<i>Sbr</i>	<i>LAT</i>	<i>LON</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сосна обыкновенная									
Mean	37,0	10,8	10,2	46,4	49,6	47,4	47,0	–	–
Min	7,0	0,5	1,5	30,0	28,6	29,0	27,5	44,6	24,3
Max	200,0	55,0	36,6	74,1	77,1	75,0	75,0	64,0	97,0
SD	30,3	8,5	6,4	7,2	9,7	6,7	6,9	–	–
CV, %	82,6	78,8	63,1	15,6	19,5	14,2	14,7	–	–
n	1738,0	1736,0	1647,0	1528,0	1366,0	1440,0	980,0	–	–
Кедр сибирский									
Mean	93,0	19,2	16,7	46,4	53,6	42,3	46,0	–	–
Min	50,0	8,1	7,5	35,7	36,6	37,4	40,3	59,1	60,6
Max	165,0	29,3	24,0	63,9	61,9	47,0	54,1	59,1	60,6
SD	35,0	6,1	4,8	7,0	6,2	2,6	2,8	–	–
CV, %	37,6	31,9	28,6	15,0	11,5	6,2	6,2	–	–
n	71,0	71,0	71,0	41,0	41,0	43,0	43,0	–	–

Продолжение табл. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Лиственница									
Mean	79,0	15,3	13,7	58,7	46,8	28,1	51,1	–	–
Min	39,0	2,3	2,9	45,0	30,2	19,3	41,5	53,5	64,0
Max	380,0	38,0	24,9	71,3	66,7	33,8	67,0	67,0	78,0
SD	75,9	6,8	4,2	6,7	9,7	3,9	4,8	–	–
CV, %	95,9	44,6	30,9	11,4	20,8	13,8	9,5	–	–
n	104,0	104,0	104,0	42,0	42,0	76,0	76,0	–	–
Ель									
Mean	67,0	16,0	14,7	47,8	44,6	46,7	53,7	–	–
Min	10,0	1,0	1,5	32,2	32,3	30,8	34,6	48,5	24,0
Max	185,0	51,5	25,1	68,1	67,1	66,9	80,7	64,0	59,9
SD	36,9	10,5	7,1	7,6	6,7	4,3	6,4	–	–
CV, %	54,9	65,6	48,1	15,9	14,9	9,3	11,9	–	–
n	390,0	388,0	191,0	158,0	166,0	306,0	280,0	–	–
Пихта									
Mean	70,0	16,9	14,1	43,0	43,9	43,8	48,0	–	–
Min	8,0	0,8	1,7	31,3	30,3	30,0	30,0	48,2	22,7
Max	164,0	46,2	28,9	57,2	57,2	63,6	65,3	56,8	59,9
SD	32,1	10,2	7,1	5,3	5,8	4,5	6,1	–	–
CV, %	45,8	60,5	50,4	12,3	13,1	10,2	12,8	–	–
n	280,0	280,0	280,0	214,0	214,0	213,0	206,0	–	–
Береза									
Mean	49,0	14,7	17,0	56,5	49,6	37,7	54,6	–	–
Min	8,0	0,8	3,7	42,8	28,7	23,4	37,4	48,1	26,0
Max	142,0	44,0	26,9	72,0	77,7	63,0	85,1	64,0	82,8
SD	25,5	8,5	5,6	5,7	13,5	6,6	7,0	–	–
CV, %	51,6	57,9	32,9	10,0	27,3	17,6	12,8	–	–
n	512,0	512,0	306,0	371,0	369,0	361,0	304,0	–	–
Осина									
Mean	32,0	12,1	13,6	56,3	49,9	40,6	58,0	–	–
Min	3,0	0,5	1,7	43,9	34,1	28,1	42,9	51,2	30,8
Max	130,0	44,3	28,1	68,0	67,5	62,1	79,8	61,5	82,8
SD	25,4	8,8	6,9	4,6	6,3	7,7	9,8	–	–
CV, %	79,4	72,8	50,6	8,2	12,6	19,0	16,9	–	–
n	124,0	124,0	97,0	60,0	60,0	121,0	70,0	–	–
Липа									
Mean	69,0	16,4	8,8	53,5	50,3	28,6	46,5	–	–
Min	26,0	1,6	3,4	47,9	46,3	24,4	43,2	51,4	37,4
Max	77,0	38,6	11,8	58,8	54,6	34,0	49,5	55,8	42,0
SD	19,6	10,2	4,7	2,8	2,9	3,2	1,8	–	–
CV, %	28,6	62,4	53,2	5,3	5,7	11,2	3,9	–	–
n	18,0	18,0	3,0	15,0	15,0	18,0	18,0	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дуб									
Mean	44,0	17,4	15,6	58,2	57,5	43,4	57,0	–	–
Min	8,0	1,1	2,5	40,4	44,7	26,7	47,7	49,0	32,0
Max	128,0	46,1	31,5	66,1	77,2	62,0	67,6	55,7	36,7
SD	25,8	9,7	7,0	3,7	7,2	6,6	4,3	–	–
CV, %	58,8	55,7	44,6	6,3	12,5	15,3	7,5	–	–
n	74,0	74,0	74,0	67,0	67,0	57,0	45,0	–	–
Бук									
Mean	35,0	11,8	15,5	57,0	48,8	44,2	53,0	–	–
Min	10,0	2,5	3,9	51,3	39,0	36,0	47,3	48,5	23,5
Max	62,0	23,3	25,0	62,4	55,2	52,0	58,8	48,5	26,0
SD	16,7	5,7	6,0	2,8	4,5	5,1	3,5	–	–
CV, %	48,1	48,5	38,8	5,0	9,3	11,5	6,5	–	–
n	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	12,0	14,0	–	–
Ясень									
Mean	38,0	17,4	17,8	69,1	60,3	36,5	67,7	–	–
Min	7,0	3,6	5,1	62,8	46,6	28,7	57,8	49,0	27,0
Max	80,0	39,6	33,4	72,9	79,6	44,0	72,1	51,4	42,0
SD	23,7	10,0	7,2	2,7	7,5	4,4	3,4	–	–
CV, %	62,6	57,4	40,2	3,9	12,4	12,1	5,0	–	–
n	22,0	22,0	22,0	21,0	21,0	22,0	22,0	–	–
Граб									
Mean	42,0	14,0	17,0	57,6	53,1	42,0	57,6	–	–
Min	7,0	1,7	2,5	42,5	38,5	24,2	48,7	49,0	27,0
Max	89,0	24,8	24,5	70,8	65,0	54,3	64,1	50,0	32,5
SD	24,2	6,4	5,7	7,4	6,2	6,2	3,9	–	–
CV, %	57,0	45,8	33,4	12,9	11,7	14,8	6,7	–	–
n	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	22,0	–	–
Робиния									
Mean	43,0	18,0	15,2	60,4	63,0	43,6	60,4	–	–
Min	12,0	7,8	6,5	50,7	54,9	38,8	47,8	48,2	34,3
Max	89,0	28,6	22,7	69,5	70,4	52,3	70,5	48,5	36,0
SD	21,9	6,6	4,7	6,5	5,1	3,9	7,0	–	–
CV, %	51,0	36,5	31,1	10,8	8,2	9,0	11,6	–	–
n	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	–	–

Примечание. Mean, Min и Max – среднее, минимальное и максимальное значения, соответственно; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; LAT и LON – широта и долгота местности, соответственно, град.; Sw, Sbk, Sf и Sbr – ССВ в древесине ствола, коре ствола, хвое (листве) и ветвях, соответственно, %.

Согласно табл. 8, древесные виды представлены в базе данных крайне неравномерно: от 1730 по сосне обыкновенной до 13 деревьев по робинии. Разная представленность их как по общему количеству, так и в географических координатах в пределах ареалов, может обусловить нарушения однонаправленности (однотипности) реакции видов на внешние факторы в географических градиентах (Molteberg, Nøibø, 2007).

Исходя из разной представленности видов в имеющейся базе данных, было высказано намерение в первом приближении построить аллометрические модели ССВ смешанного типа (mixed-effects models) (Zeng et al., 2011; Using linear mixed model..., 2012; Zeng, 2017; Allometric models to predicate..., 2021; Augmentative modelling..., 2021), включающие как численные (дендрометрические показатели и географические координаты), так и фиктивные переменные, кодирующие видовую принадлежность исходных данных (табл. 9).

Таблица 9

Схема кодирования 13 лесообразующих видов Северной Евразии, у которых определено ССВ во фракциях фитомассы

Вид (род)	Блок фиктивных переменных											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
Сосна обыкновенная	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кедр сибирский	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Лиственница	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ель	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Пихта	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Береза	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Осина	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Липа	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Дуб	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Бук	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Ясень	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Граб	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Робиния	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

С учетом изложенного, была принята следующая структура аллометрической модели смешанного типа:

$$\ln(S_i) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(H) + b_4 \ln(LAT) + b_5 \ln(LON) + \sum a_i X_i, \quad (19)$$

где S_i – ССВ в i -й фракции фитомассы (см. табл. 8), %;

$\sum a_i X_i$ – блок фиктивных переменных в количестве $(i + 1)$.

Регрессионный анализ эмпирических данных выявил, что значимость высоты дерева оказалась ниже стандартного уровня ($t = 0,8...1,7 < t_{05} = 1,96$). В результате регрессионного анализа получены модели, представленные в табл. 10. Большая часть регрессионных коэффициентов численных переменных в моделях, представленных в табл. 10, достоверны на уровне $p < 0,001$.

Таблица 10

Результаты расчета моделей (19)

Регрессионные коэффициенты и независимые переменные	Зависимые переменные			
	$\ln(S_w)$	$\ln(S_{bk})$	$\ln(S_f)$	$\ln(S_{br})$
a_0	5,5197	6,8176	4,8264	5,0416
$b_1 \ln(A)$	0,1931	0,0859	-0,0036	0,0323
$b_2 \ln(D)$	-0,0866	-0,0545	0,0336	0,0053
$b_3 \ln(LAT)$	-0,4897	-0,5192	-0,3541	-0,3646
$b_4 \ln(LON)$	-0,0513	-0,2506	0,0928	0,033
$a_1 X_1$	-0,0862	0,0945	-0,0917	-0,0169
$a_2 X_2$	0,2337	-0,0413	-0,5016	0,1039
$a_3 X_3$	-0,0483	-0,1601	0,0552	0,165
$a_4 X_4$	-0,1616	-0,1812	-0,0552	0,0164
$a_5 X_5$	0,1637	-0,0946	-0,1837	0,1679
$a_6 X_6$	0,2621	-0,0601	-0,116	0,2334
$a_7 X_7$	0,0168	-0,1142	-0,4582	-0,0045
$a_8 X_8$	0,1719	-0,026	-0,0732	0,1773
$a_9 X_9$	0,1352	-0,2683	-0,0208	0,1182
$a_{10} X_{10}$	0,3814	0,0124	-0,2367	0,3649
$a_{11} X_{11}$	0,1492	-0,1287	-0,095	0,1882
$a_{12} X_{12}$	0,2063	0,0855	-0,0849	0,2225
$adjR^2$	0,5690	0,211	0,4480	0,3080
SE	0,1100	0,180	0,1400	0,1200

Примечание. $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка уравнения. Жирным шрифтом выделены регрессионные коэффициенты, не значимые на уровне $p < 0,05$.

Судя по знакам регрессионных коэффициентов при переменной $\ln(LAT)$, ССВ во всех фракциях фитомассы 13 древесных видов в пределах их ареалов снижается в направлении с юга на север. Эта закономерность находится в соответствии с ранее установленной аналогичной закономерностью снижения базисной плотности древесины и коры в направлении с юга на север (Перелыгин, 1969; Усольцев, Цепордей, 2022в), которая, как известно, коррелирует с ССВ (Полубояринов, 1976а). Согласно регрессионным коэффициентам при переменной $\ln(LON)$, в направлении с запада на восток ССВ древесины и коры снижается, а листвы (хвои) и ветвей – увеличивается.

Для геометрического представления зависимости ССВ фракций фитомассы, согласно модели (19), от широты и долготы местности в модели были подставлены средние значения возраста дерева (48 лет) и диаметра на высоте груди (13,2 см).

Благодаря специфике фиктивных переменных, видовые различия зависимости ССВ от географической широты и долготы определяются только величиной свободного члена, то есть сдвигом регрессии по оси ординат. Поскольку конфигурация названной регрессии для всех древесных видов одна и та же, на рис. 25 мы показываем ее только для сосны.

Программа Statgraphics-19 дает возможность оценить вклад независимых переменных в объяснение изменчивости зависимой переменной в моделях (19). Результат такого расчета показан в табл. 11.

Мы видим в табл. 11, что средние значения вкладов дендрометрических и географических переменных в объяснение изменчивости ССВ составляют 15,3 и 13,2 %, соответственно. Наибольший вклад в объяснение общей изменчивости ССВ вносит видовая принадлежность деревьев – 71,5 %. Отмеченный высокий процент изменчивости ССВ объяснен видовой принадлежностью деревьев, означает большое различие видов по величине ССВ.

Для количественного выражения этого различия мы построили диаграммы распределения видов по величине ССВ каждой фракции фитомассы. Диаграммы построены по средним для всех видов значениям возраста дерева (48 лет), диаметра ствола (13,2 см), географической широты (60° с. ш.) и долготы (60° в. д.). Диаграммы убывающей последовательности видов по величине ССВ представлены на рис. 26.

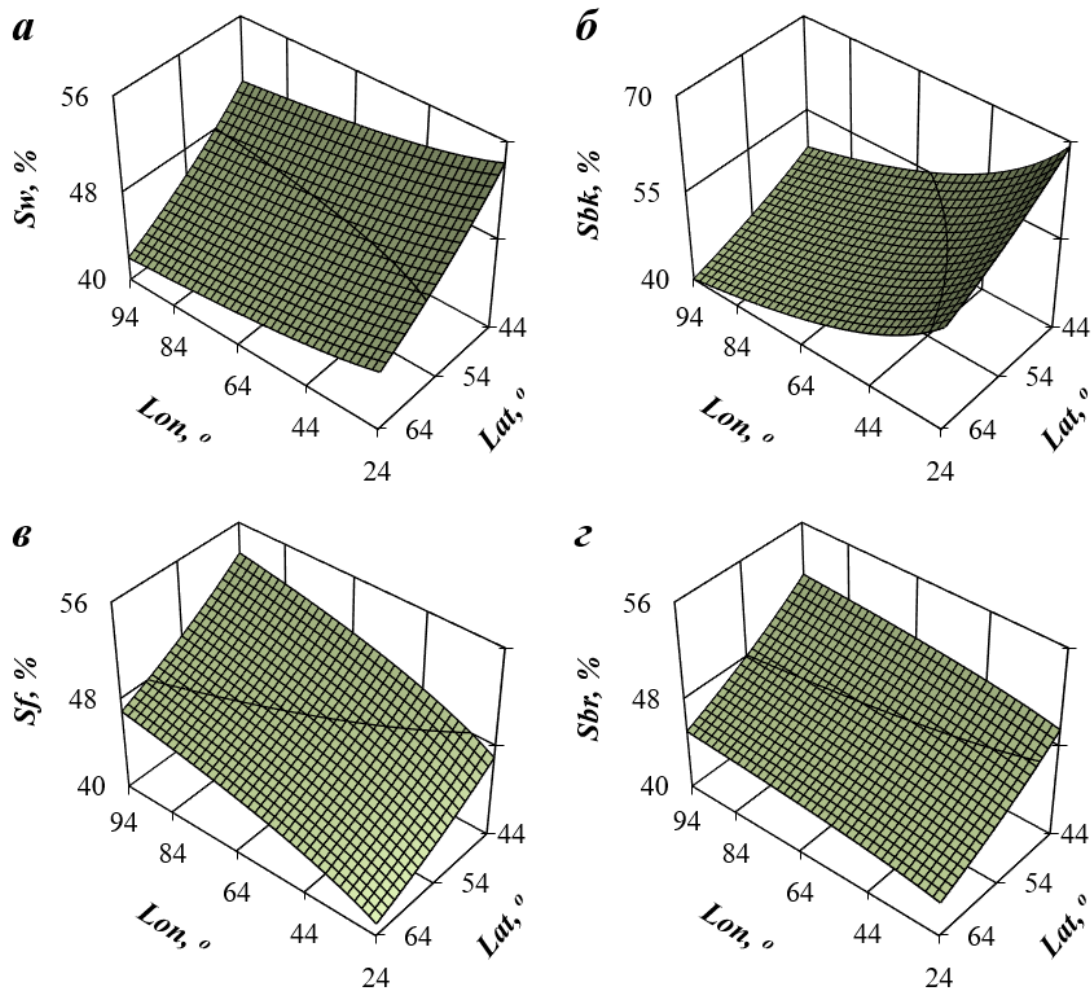


Рис. 25. Связь расчетных значений ССВ в древесине ствола (а), коре ствола (б), хвое (в) и ветвях (з) у сосны обыкновенной с географической широтой и долготой при средних значениях возраста дерева и диаметра ствола (обозначения см. в табл. 8)

Таблица 11

Вклад дендрометрических показателей дерева, географических факторов и видовой принадлежности в объяснение изменчивости ССВ в фракциях фитомассы, %

Зависимые переменные	Независимые переменные моделей (19)						$\Sigma a_i X_i$
	A (I)	D (II)	(I)+(II)	(LAT) (III)	(LON) (IV)	(III)+(I) (V)	
<i>Sw</i>	18,6	10,8	29,4	5,1	2,5	7,6	63,0
<i>Sbk</i>	10,8	8,9	19,7	7,2	16,2	23,4	56,9
<i>Sf</i>	0,5	6,2	6,7	5,9	6,1	12,0	81,3
<i>Sbr</i>	4,6	0,9	5,5	7,0	2,6	9,6	84,9
$X \pm \sigma^{(*)}$	8,6±7,9	6,7±4,3	15,3±11,4	6,3±1,0	6,9±6,5	13,2±7,1	71,5±13,7

(*) $X \pm \sigma$ – среднее значение \pm стандартное отклонение

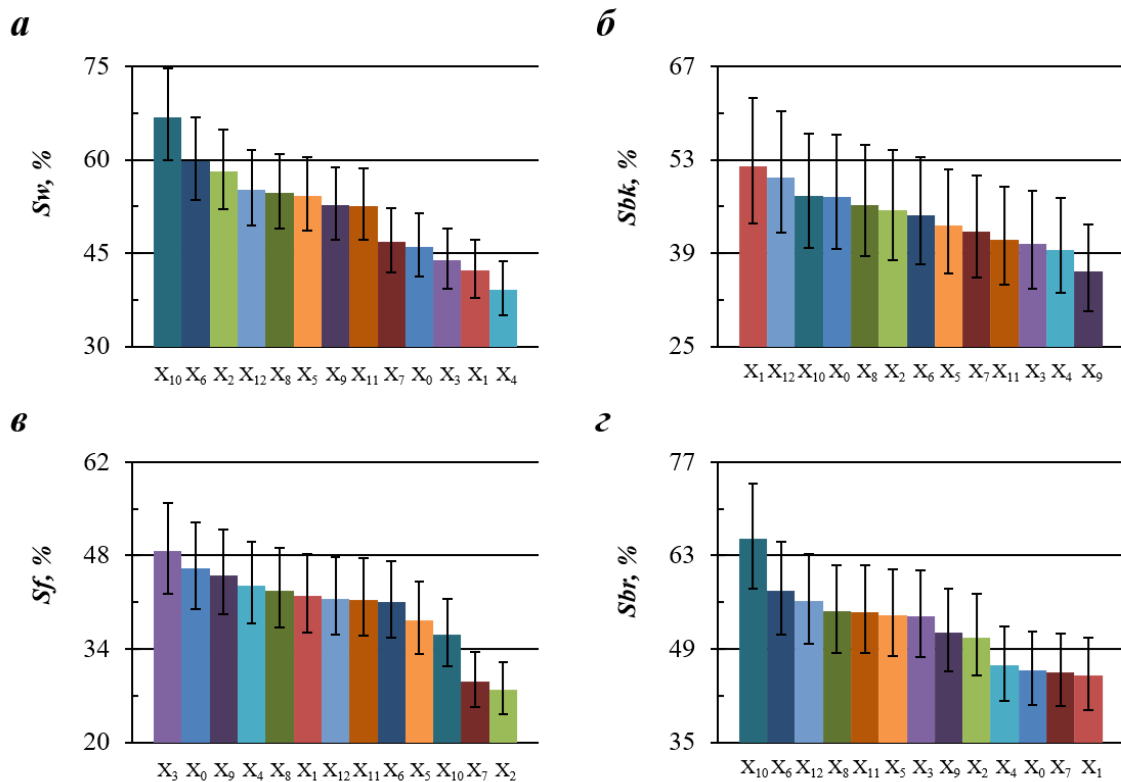


Рис. 26. Расчетные значения ССВ в древесине ствола (а), коре ствола (б), хвое и листве (в) и ветвях (г) 13 лесообразующих видов Северной Евразии в убывающей последовательности (обозначения видов по оси абсцисс см. в табл. 9)

Можно видеть на рис. 26, что ранжирование видов по величине ССВ в каждой фракции фитомассы имеет специфический характер.

Максимальные значения ССВ в древесине ствола, коре ствола, хвое (листве) и ветвях приходятся на ясень, кедр, ель и ясень, а минимальные – на пихту, бук, лиственницу и кедр сибирский.

Таким образом, были впервые построены аллометрические модели смешанного типа, согласно которым ССВ снижается в направлении с юга на север во всех фракциях фитомассы 13 древесных видов в пределах их ареалов. Эта закономерность находится в соответствии с выше установленной аналогичной закономерностью снижения базисной плотности древесины и коры в направлении с юга на север (Усольцев, Цепордей, 2022в), которая, как известно, коррелирует с ССВ. В направлении с запада на восток ССВ древесины и коры снижается, а листвы (хвои) и ветвей – увеличивается.

Вклады дендрометрических и географических независимых переменных, а также видовой принадлежности в объяснение изменчивости ССВ во фракциях фитомассы составляют 15, 13 и 72 %, соответственно.

Впервые выполнено ранжирование древесных видов Северной Евразии по ССВ в фракциях фитомассы, согласно которому распределения видов по величине ССВ в каждой фракции фитомассы довольно специфично (Усольцев, Цепордей, 2022а).

Выводы по второй главе

Создание базы данных квалиметрических характеристик фитомассы деревьев лесообразующих видов Евразии дало возможность исследовать их изменение в трансконтинентальных географических градиентах.

Построенные модели зависимости базисной плотности древесины и коры деревьев от их дендрометрических показателей, географических координат и видовой принадлежности деревьев позволили установить статистически значимую закономерность снижения базисной плотности древесины и коры равновеликих деревьев в направлениях с юга на север и с запада на восток, действительную в пределах ареалов девяти лесообразующих видов Евразии. В построенных моделях дендрометрические переменные объясняют изменчивость базисной плотности на 4...14 % и географическое положение – на 7...10 %. Наибольший вклад в объяснение общей изменчивости базисной плотности вносит видовой принадлежность деревьев – от 74 до 87 %. Каждый из исследованных видов характеризуется специфичным соотношением базисной плотности древесины и коры.

Впервые построенные аллометрические модели смешанного типа для оценки содержания сухого вещества во фракциях фитомассы показали, что содержание сухого вещества снижается в направлении с юга на север во всех фракциях фитомассы 13 древесных видов в пределах их ареалов. Эта закономерность находится в соответствии с аналогичной закономерностью снижения базисной плотности древесины и коры в направлении с юга на север. В направлении с запада на восток содержание сухого вещества в древесине и коре снижается,

а в листве (хвое) и ветвях – увеличивается. Вклады дендрометрических и географических независимых переменных, а также видовой принадлежности в объяснение изменчивости содержания сухого вещества во фракциях фитомассы составляют 15, 13 и 72 %, соответственно.

Впервые выполнено ранжирование древесных видов Евразии по содержанию сухого вещества в фракциях фитомассы, согласно которому распределения видов по содержанию сухого вещества в каждой фракции фитомассы является видоспецифичным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов биомассы необходима квалиметрия древесины растущих деревьев как их ключевая экологическая характеристика, требующая применения неразрушающих методов. Дан аналитический обзор неразрушающих методов оценки квалиметрических показателей древесины: пилодин-метод, резистограф-метод, ригидометр-метод, акустический метод оценки плотности древесины, радиационный метод, метод спектроскопии в ближнем инфракрасном спектре, метод биопотенциалов растений. Показано, что любая техника имеет свои ограничения, и важно уметь выбрать технику, наиболее пригодную для того или иного метода неразрушающего контроля.

Базисная плотность и содержание сухого вещества во фракциях фитомассы деревьев играют важную роль в прогнозировании биологической продуктивности насаждений в связи с различными экологическими факторами. Установленные закономерности изменения квалиметрических показателей фитомассы в градиентах широты и долготы могут быть полезны при прогнозировании изменений биологической продуктивности лесов вследствие климатических сдвигов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Азгальдов, Г. Г. О квалитметрии / Г. Г. Азгальдов, Э. П. Райхман. – Москва : Изд. стандартов, 1973. – 172 с.

Алметов, А. Н. Приростной безвинтовой бурав для извлечения кернов из растущих деревьев / А. Н. Алметов // Молодежь и охрана природы : материалы республиканской научно-практической конференции (Йошкар-Ола, 24–25 февраля 1999). – Йошкар-Ола : МарГУ, 1999. – С. 86–87.

Алметов, А. Н. Совершенствование конструкции бурава для извлечения кернов древесины из растущих деревьев различных пород : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алметов Андрей Николаевич. – Йошкар-Ола, 2001. – 24 с.

Андрущенко, А. П. Надземная фитомасса древостоев разного возраста в свежей субори / А. П. Андрущенко // Труды Харьковского сельскохозяйственного института. – Харьков, 1977. – Т. 240. – С. 53–56.

Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Москва : Энергия, 1973. – 400 с.

Бессчетнова, Н. Н. Содержание сухого вещества в хвое клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной / Н. Н. Бессчетнова // Лесной вестник. – 2011. – № 5. – С. 15–19.

Букач, О. В. Микробные топливные элементы: состояние исследований и практическое применение (обзор) / О. В. Букач, Л. Л. Мякинкова // Инноватика и экспертиза. – 2014. – Вып. 2 (13). – С. 51–59.

Гордина, Н. П. Пространственная структура и продуктивность сосняков Нижнего Енисея / Н. П. Гордина. – Красноярск : КрасГУ, 1985. – 128 с.

Гурвич, А. Г. Теория биологического поля / А. Г. Гурвич. – Москва : Советская наука, 1944. – 155 с.

Дебабов, В. Г. Микробный электросинтез / В. Г. Дебабов // Биотехнология. – 2017. – Т. 33. – № 3. – С. 9–28.

Джабык-Карагайский бор / Л. П. Абрамова, Л. И. Аткина, Е. А. Жучков [и др.]. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2005. – 213 с. – ISBN 5-94984-009-0.

Дрейпеар, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпеар, Г. Смит. – Москва : Статистика, 1973. – 392 с.

Дювиньо, П. Биосфера и место в ней человека / П. Дювиньо, М. Танг. – Москва : Прогресс, 1968. – 255 с.

Еремин, А. Л. К анализу моделей объединения и появления новой информации в интеллектуальных системах / А. Л. Еремин // Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий. – Краснодар : ЦНТИ, 2016. – С. 17–27.

Ермолов, И. Н. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, М. Н. Ермолов. – Москва : Эхо-Импульс, 2006. – 208 с.

Зарудный, И. Н. Биоэлектрический потенциал как метод определения жизнеспособности подроста древесных пород / И. Н. Зарудный // Научные труды ЛЛТА. – 1970. – № 127. – С. 35–41.

Интенсификация процесса получения биоэлектричества в микробных топливных элементах при использовании мутантов *Shewanella oneidensis* MR-1 с повышенной редуцирующей активностью / Т. А. Воейкова, Л. К. Емельянова, Л. М. Новикова [и др.] // Микробиология. – 2013. – Т. 82, № 4. – С. 402–407.

Исаева, Л. Н. Влажность древесины растущих деревьев в различных районах произрастания / Л. Н. Исаева // Древесина и древесные материалы. – Красноярск : ИЛиД, 1974. – С. 18–28.

Исаева, Л. Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы / Л. Н. Исаева // Лесоведение. – 1978. – № 4. – С. 90–94.

Казимиров, Н. И. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии / Н. И. Казимиров, Р. М. Морозова. – Ленинград : Наука, 1973. – 175 с.

Каневский, И. Н. Неразрушающие методы контроля / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток : ДВГТУ, 2007. – 243 с. – ISBN 978-5-7596-0738-0.

Карасев, В. Н. Температурный режим деревьев сосны обыкновенной, поврежденных пожаром / В. Н. Карасев, М. А. Карасева // Материалы научной конференции по итогам научно-исследовательских работ МПИ за 1974 г. Секция: Лесное хозяйство. – Йошкар-Ола, 1975. – С. 21–24.

Карасев, В. Н. Физиология растений / В. Н. Карасев. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2001. – 304 с. – ISBN 5-8158-0069-4.

Карасев, В. Н. Эколого-физиологическая диагностика жизнеспособности деревьев хвойных пород / В. Н. Карасев, М. А. Карасева // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2004. – № 4. – С. 28–33.

Кирлиан, В. Х. В мире чудесных разрядов / В. Х. Кирлиан, С. Д. Кирлиан. – Москва : Знание, 1964. – 41 с.

Колесникова, А. А. Изменение свойств древесины ели по радиусу ствола / А. А. Колесникова, П. М. Мазуркин // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 1997. – № 5. – С. 23–25.

Коловский, Р. А. Биоэлектрические потенциалы древесных растений / Р. А. Коловский. – Новосибирск : Наука, 1980. – 176 с.

Крамер, П. Д. Физиология древесных растений / П. Д. Крамер, Т. Т. Козловский. – Москва : Лесная промышленность, 1983. – 462 с.

Кулешова, Т. Э. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений / Т. Э. Кулешова, А. В. Бушлякова, Н. Р. Галль // *Письма в Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45, Вып. 5. – С. 6–8.

Курило, Ю. А. Изучение электрического сопротивления древесных растений в условиях нефтяного загрязнения почвы (на примере березы повислой) / Ю. А. Курило, А. И. Григорьев // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 3. – С. 1–8.

Курило, Ю. А. Применение электрометрического метода для диагностики влияния нефтешлама на жизнедеятельность березы повислой / Ю. А. Курило, А. И. Григорьев // *Лесоведение*. – 2019. – № 4. – С. 304–310.

Лавров, М. Ф. Совершенствование метода оценки качества древесины лиственницы, произрастающей в климатических условиях Якутии : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лавров Михаил Фрументьевич. – Екатеринбург, 2015. – 15 с.

Ланге, Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций / Ю. В. Ланге. – Москва : Машиностроение, 1991. – 272 с.

Ланге, Ю. В. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Справочник / Ю. В. Ланге, В. А. Воронков. – Москва : Авторское издание, 2003. – 120 с.

Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – Москва : Наука, 1977. – 416 с.

Макаренко, А. А. Срастание корневых систем сосны в сухих борах Северного Казахстана / А. А. Макаренко // *Агробиология*. – 1962. – № 6. – С. 623–624.

Манкузо, С. О чем думают растения: тайная жизнь, скрытая от посторонних глаз / С. Манкузо, А. Виола. – Москва : Эксмо, 2019. – 208 с. – ISBN 978-5-699-94823-9.

Марченко, И. С. Биополе лесных экосистем / И. С. Марченко. – Брянск : Придесенье, 1995. – 188 с. – ISBN 5-85584-043-3.

Медведев, С. С. Электрофизиология растений / С. С. Медведев. – Санкт-Петербург : СПбГУ, 1997. – 122 с. – ISBN 5-288-01758-1.

Мелехов, В. И. Качественные характеристики древесины сосны в культурах / В. И. Мелехов, Н. А. Бабич, С. А. Корчагов. – Архангельск : АГТУ, 2003. – 110 с. – ISBN 5-261-00186-2.

Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации / С. Г. Шиятов, Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов [и др.]. – Красноярск : КрасГУ, 2000. – 80 с. – ISBN 5-7638-0295-0.

Молчанов, А. А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон / А. А. Молчанов. – Москва : Наука, 1971. – 275 с.

Молчанов, А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи / А. А. Молчанов. – Москва : Наука, 1964. – 255 с.

Молчанов, А. А. Продуктивность органической массы в сосняках беломошниках / А. А. Молчанов // Продуктивность органической и биологической массы леса. – Москва : Наука, 1974. – С. 24–42.

Никишов, В. Д. Исследование механических свойств древесины неразрушающими методами : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никишов Владимир Дмитриевич. – Москва, 1966. – 24 с.

Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера / Н. И. Казимиров, А. Д. Волков, С. С. Зябченко [и др.]. – Ленинград : Наука, 1977. – 304 с.

Перелыгин, Л. М. Древесиноведение / Л. М. Перелыгин. – 2-е изд. – Москва : Лесная промышленность, 1969. – 320 с.

Поздняков, Л. К. Лесное ресурсоведение / Л. К. Поздняков. – Новосибирск : Наука, 1973. – 120 с.

Полубояринов, О. И. Влияние лесохозяйственных мероприятий на качество древесины / О. И. Полубояринов. – Ленинград : ЛЛТА, 1974. – 96 с.

Полубояринов, О. И. Квалиметрия древесного сырья в процессе лесовыращивания : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Полубояринов Олег Иванович. – Ленинград, 1976. – 46 с.

Полубояринов, О. И. О взаимосвязи влажности и плотности древесины растущих деревьев / О. И. Полубояринов, Г. Н. Некрасова, Р. Б. Федоров // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 1982. – № 2. – С. 7–11.

Полубояринов, О. И. Плотность древесины / О. И. Полубояринов. – Москва : Лесная промышленность, 1976. – 159 с.

Радж, Б. Применение ультразвука / Б. Радж, В. Раджендран, П. Паланичами. – Москва : Техносфера, 2006. – 576 с. – ISBN 5-94836-088-1.

Рахтеенко, И. Н. Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений / И. Н. Рахтеенко. – Минск : АН БССР, 1963. – 254 с.

Роне, В. М. Изменчивость плотности древесины и длины трахеид в потомстве ели обыкновенной / В. М. Роне // Лесоведение. – 1970. – № 5. – С. 78–82.

Савельева, Л. С. Срастание корневых систем древесных пород / Л. С. Савельева. – Москва : Лесная промышленность, 1969. – 72 с.

Семечкина, М. Г. Структура фитомассы сосняков / М. Г. Семечкина. – Новосибирск : Наука, 1978. – 165 с.

Симоненко, А. А. Методы и средства таможенного контроля плотности древесины : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Симоненко Антон Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2014. – 20 с.

Уголев, Б. Н. Испытания древесины и древесных материалов / Б. Н. Уголев. – Москва : Лесная промышленность, 1965. – 251 с.

Усольцев, В. А. Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей // Сибирский лесной журнал. – 2022в. – № 3. – С. 59–68. – DOI: 10.15372/SJFS20220308

Усольцев, В. А. Закономерности соотношений надземной и подземной фитомассы в сосняках Кустанайской области / В. А. Усольцев, И. С. Крепкий // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1984. – № 3. – С. 73–79.

Усольцев, В. А. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества: монография / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей. – Текст : электронный. – Екатеринбург : УГЛТУ; Ботанический сад УрО РАН, 2020а. – 182 с. – URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf (дата обращения: 05.07.2023).

Усольцев, В. А. Климатически обусловленные территориальные изменения фитомассы деревьев лесообразующих видов Евразии и их прогнозирование / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей // Сибирский лесной журнал. – 2021г. – № 6. – С. 72–90.

Усольцев, В. А. Регрессионный анализ вертикально-фракционного распределения массы корней в сосняках Аман-Карагайского бора / В. А. Усольцев, И. С. Крепкий // Экология. – 1994. – № 2. – С. 21–33.

Усольцев, В. А. Рост и структура фитомассы древостоев / В. А. Усольцев. – Новосибирск : Наука, 1988. – 253 с. – ISBN 5-02-028865-9.

Усольцев, В. А. Содержание сухого вещества в биомассе деревьев 13 видов Евразии: географические аспекты / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей // Хвойные бореальной зоны. – 2022а. – Т. 40, № 3. – С. 194–201.

Усольцев, В. А. Соотношения надземных и подземных фракций фитомассы у сосны Аман-Карагайского бора / В. А. Усольцев, И. С. Крепкий // Лесовосстановление в Казахстане. – Алма-Ата : Кайнар, 1986. – С. 191–199.

Усольцев, В. А. Тонкомерные сортименты березы и осины для производства древесно-стружечных плит / В. А. Усольцев // Плиты и фанера: Реферативная информация. – 1975. – № 10. – С. 6–7.

Успенский, В. В. Изменчивость плотности древесины сосны и ее значение в весовой таксации / В. В. Успенский // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 1980. – № 6. – С. 9–12.

Уткин, А. И. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование / А. И. Уткин, Л. С. Ермолова, И. А. Уткина. – Москва : Наука, 2008. – 292 с. – ISBN 978-5-02-034140-1.

Федюков, В. И. Комплексная оценка технического качества древесины на корню / В. И. Федюков, Е. Ю. Салдаева, Е. М. Цветкова // Лесной вестник. – 2016. – № 4. – С. 48–51.

Федюков, В. И. Научные основы всеобщего обеспечения качества и сертификации лесоматериалов спецназначения : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Федюков Владимир Ильич. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации, 1998. – 39 с.

Феклистов, П. А. Морфолого-физиологические и экологические особенности березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в таежной зоне / П. А. Феклистов, И. Б. Амосова. – Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. – 214 с. – ISBN 978-5-261-00856-9.

Фитомасса лесных культур в Оренбургской области / А. И. Колтунова, В. А. Усольцев, Н. В. Пальмова [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. – Брянск : БГИТА, 2007. – Вып. 17. – С. 176–179.

Ходоров, Б. И. Проблема возбудимости / Б. И. Ходоров. – Ленинград : Медицина. 1969. – 302 с.

Челядинова, А. И. Количество и характер развития хвои в сосновом насаждении / А. И. Челядинова // Труды ВНИИЛХ. Физиологические исследования древесных пород. – 1941. – Вып. 21. – С. 30–50.

Шарапов, Е. С. Сравнительный анализ способов определения плотности древесины с помощью рентгеновского излучения и устройства для измерения сопротивления сверлению / Е. С. Шарапов, В. Ю. Чернов // Лесной вестник. – 2014. – № 2. – С. 89–95.

Якушев, Б. И. Исследование растений и почв: эколого-физиологические методы / Б. И. Якушев. – Минск : Наука и техника, 1988. – 71 с. – ISBN 5-343-00252-8.

Якушев, Б. И. Электрометрический способ оценки массы подземных органов растений / Б. И. Якушев // Доклады АН БССР. – 1972. – Т. 16. – № 9. – С. 848–850.

A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees / S. Gao, X. Wang, M. C. Wiemann [et al.] // Annals of Forest Science. – 2017. – Vol. 74. – P. 27–40.

A large and persistent carbon sink in the world's forests / Y. Pan, R. A. Birdsey, J. Fang [et al.] // Science. – 2011. – Vol. 333. – P. 988–93.

A new experimental device for rapid measurement of the trunk equivalent modulus of elasticity on standing trees / J. Launay, P. Rozenberg, L. Pâques, J.-M. Dewitte // Annals of Forest Science. – 2000. – Vol. 57. – P. 351–359.

A practical approach for extracting tree models in forest environments based on equirectangular projections of terrestrial laser scans / L. Eysn, N. Pfeifer, C. Ressler [et al.] // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5. – P. 5424–5448.

A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models / H. Temesgen, D. Affleck, K. Poudel [et al.] // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2015. – Vol. 30. – P. 326–335.

A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content / E. Garnier, B. Shipley, C. Roumet, G. Laurent // Functional Ecology. – 2001. – Vol. 15. – P. 688–695.

A step towards soil and wastewater treatment along with green power generation using plant microbial fuel cell: A mini review / M. Baquir, K. H. Naqvi, A. Paras [et al.] // Journal of emerging technologies and innovative research. – 2019. – Vol. 6. – Iss. 6. – P. 32–34.

Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials – A path to increased profitability / X. Wang, P. Carter, R. J. Ross, B. K. Brashaw // Forest Products Journal. – 2007. – Vol. 57. – P. 6–14.

Acoustic characterization of wood from tree branches / G. Garcia, R. Gonçalves, M. Ruy, R. G. M. Lorensani // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 513–524.

Acoustic evaluation of loblolly pine tree- and lumber-length logs allows for segregation of lumber modulus of elasticity, not for modulus of rupture / M. A. Butler, J. Dahlen, T. L. Eberhardt [et al.] // Annals of Forest Science. – 2017. – Vol. 74. – P. 1–15.

Acoustic evaluation of wood quality with a non-destructive method in standing trees: a first survey in Italy / A. R. Proto, G. Macri, V. Bernardini [et al.] // iForest. – 2017. – Vol. 10. – P. 700–706.

Acoustic sorting models for improved log segregation / X. Wang, S. Verrill, E. Lowell [et al.] // Wood and Fiber Science. – 2013. – Vol. 45. – No. 4. – P. 343–352.

Acuna, M. Geospatial and within tree variation of wood density and spiral grain in Douglas fir / M. Acuna, G. Murphy // Forest Products Journal. – 2006. – Vol. 56. – No. 4. – P. 81–85.

Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia / H. Bi, S. Murphy, L. Volkova [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2015. – Vol. 349. – P. 106–121.

Aguiar, A. Genetic control of growth, wood density and stem characteristics of *Pinus pinaster* in Portugal / A. Aguiar, M. H. Almeida, N. Borralho // Silva Lusitana. – 2003. – Vol. 11. – P. 131–139.

Al Hagrey, S. A. Geophysical imaging of root-zone, tree trunk, and moisture heterogeneity / S. A. Al Hagrey // Journal of Experimental Botany. – 2007. – Vol. 58. – P. 839–854.

Albertson, A. Needle litterfall in stands of *Pinus sylvestris* in Sweden in relation to site quality, stand age and latitude / A. Albertson // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1988. – Vol. 3. – P. 333–342.

Allison, R. B. Chapter 7 – Nondestructive testing in the urban forest / R. B. Allison, X. Wang // General Technical Report, FPL-GTR-238; USDA Forest Service, Forest Products Laboratory : Madison, WI, USA. – 2015. – P. 77–86.

Allison, R. B. Development of Bioacoustic Nondestructive Testing Instruments for Early Detection of Bark Beetle Infestation. General Technical Report FPL-GTR-249 / R. B. Allison // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium.

Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 264–269.

Allison, R. B. Methods for Nondestructive Testing of Urban Trees / R. B. Allison, X. Wang, C. A. Senalik // *Forests*. – 2020. – Vol. 11. – Art. 1341.

Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest / V. A. Usoltsev, O. Shobairi, I. S. Tsepordey, W. Zukow // *Ecological Questions*. – 2021b. – Vol. 32. – Iss. 1. – P. 29–36.

Al-Sagheer, N. A. Variation in wood specific gravity, density and moisture content of *Dipterocarpus indicus* (Bedd) among different populations in Western Ghats of Karnataka, India / N. A. Al-Sagheer, A. G. D. Prasad // *International Journal of Applied Agricultural Research*. – 2010. – Vol. 5. – No. 5. – P. 583–599.

Amishev, D. In-forest assessment of veneer grade Douglas fir logs based on acoustic measurement of wood stiffness / D. Amishev, G. Murphy // *Forest Products Journal*. – 2008. – Vol. 58. – No. 11. – P. 42–47.

An acoustics operations study for loblolly pine (*Pinus taeda*) standing saw timber with different thinning history / C. Essien, Q. Cheng, B. K. Via [et al.] // *Bioresources*. – 2016. – Vol. 11. – P. 7512–7521.

Analysis of wood density profiles of tree stems: incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations / M. Wassenberg, H. S. Chiu, W. Guo, H. Spiecker // *Trees*. – 2015. – Vol. 29. – P. 551–561.

Andrews, M. K. Which acoustic speed? / M. K. Andrews // *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Forest Products Society. – 2003. – P. 159–165.

Andrews, M. K. Wood quality measurement – son et lumiere / M. K. Andrews // *New Zealand Journal of Forestry*. – 2002. – Vol. 47. – P. 19–21.

Apiolaza, L. A. Very early selection for solid wood quality: Screening for early winners / L. A. Apiolaza // *Annals of Forest Science*. – 2009. – Vol. 66. – P. 601–602.

Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees / G. Nicolotti, L. V. Socco, R. Martinis [et al.] // *Journal of arboriculture*. – 2003. – Vol. 29. – P. 66–78.

Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters / A. Bienert, S. Scheller, E. Keane [et al.] // *ISPRS Archives: Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”* (Dresden, Germany, September 25–27, 2006). – 2006. – Vol. 36. – Part 5. – P. 15–19.

Applying discriminate analysis and acoustic tool to assign loblolly pine families into susceptibility classes / C. Essien, B. Via, T. Gallagher [et al.] // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 504–511.

Armstrong, J. P. The effect of specific gravity on several mechanical properties of some world woods / J. P. Armstrong, C. Skaar, C. de Zeeuw // Wood Science and Technology. – 1984. – Vol. 18. – No. 2. – P. 137–146.

Aslezaeim, N. Effect of Cultural Intensity and Planting Density on Wood Properties of Loblolly Pine (*Pinus Taeda* L.) / N. Aslezaeim. – Mississippi : Mississippi State University, 2016. – 160 p.

Assessment of decay in standing timber using stress wave timing non-destructive evaluation tools: A guide for use and interpretation / X. Wang, F. Divos, C. Pilon [et al.] // General Technical Report FPL-GTR-147; Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. – 2004. – 12 p.

Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review / M. van Leeuwen, T. Hilker, N. C. Coops [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2011. – Vol. 261. – P. 1467–1478.

Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique / R. Martinez-Sala, I. Rodriguez-Abad, R. D. Barbra, R. Capuz-Lladro // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 38. – P. 903–911.

Association of ultrasonic tomography and drilling resistance in decay evaluation of trees / M. N. Reis, S. S. A. Palma, D. P. Ziller [et al.] // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 187–193.

Augmentative modelling: A template for *Populus* sp. stand biomass in Eurasia region / V. A. Usoltsev, S. O. R. Shobairi, I. S. Tsepordey, V. P. Chasovskikh // Indian Forester. – 2021a. – Vol. 147 (3). – P. 224–229.

Auty, D. 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 / D. Auty, A. Achim // Forestry. – 2008. – Vol. 81. – P. 475–487.

BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants / D. S. Falster, R. A. Duursma, M. I. Ishihara [et al.] // Ecology. – 2015. – Vol. 96. – Art. 1445.

Baar, J. The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method / J. Baar, J. Tippner, V. Gryc // European Journal of Wood and Wood Products. – 2012. – Vol. 70. – No. 5. – P. 767–769.

Baldwin, V. C. Green and dry-weight equations for aboveground components of planted loblolly pine trees in the West Gulf Region / V. C. Baldwin // Southern Journal of Applied Forestry. – 1987. – Vol. 11. – P. 212–218.

Bartelink, N. N. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.) / N. N. Bartelink // Annals of Forest Science. – 1997. – Vol. 54. – P. 39–50.

Basic wood density variations of *Parkia velutina* Benoist, a long-lived heliophilic Neotropical rainforest tree / H. Morel, R. Lehnebach, J. Cigna [et al.] // Bois Forests des Tropiques. – 2018. – Vol. 335. – P. 59–69.

Baskerville, G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass / G. L. Baskerville // Canadian Journal of Forest Research. – 1972. – Vol. 2. – P. 49–53.

Baturaygil, A. Breeding amaranth for biomass: evaluating dry matter content and biomass potential in early and late maturing genotypes / A. Baturaygil, M. G. Stetter, K. Schmid // Agronomy. – 2021. – Vol. 11. – Art. 970.

Bayer, D. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning / D. Bayer, S. Seifert, H. Pretzsch // Trees. – 2013. – Vol. 27. – P. 1035–1047.

Behavior of wood basic density according to environmental variables / G. M. V. Oliveira, J. M. de Mello, C. R. de Mello [et al.] // Journal of Forestry Research. – 2022. – Vol. 33. – P. 497–505.

Bergstedt, A. Models for predicting dry matter content of Norway spruce / A. Bergstedt, P. O. Olesen // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2000. – Vol. 15 (6). – P. 633–644.

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 / A. Muneri, T. Asada, K. Tomita [et al.] // Apita Journal. – 2011. – Vol. 64. – P. 356–361.

Bieker, D. Electric resistivity tomography shows radial variation of electrolytes in *Quercus robur* / D. Bieker, S. Rust // Canadian Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 1189–1193.

Biomass allocation into woody parts and foliage in young common aspen (*Populus tremula* L.) – Trees and a stand-level study in the Western Carpathians / B. Konôpka, J. Pajtík, V. Šeben [et al.] // Forests. – 2020. – Vol. 11 (464). – P. 1–18.

Blakemore, P. The use of hand-held electrical moisture meters with commercially important Australian hardwoods. Part 1. Executive summary, methods, results, conclusion & recommendations / P. Blakemore. – Melbourne : FWPRDC, 2003. – 89 p.

Böhm, W. Methods of studying root systems / W. Böhm. – New York : Springer Verlag, 1979. – 188 p.

Booty, R. Looking beyond what's visible: Using ground-penetrating radar for belowground root detection / R. Booty // Arborist News. – 2018. – Vol. 27. – P. 50–55.

Brazier, J. D. The influence of planting distance on structural wood yields of unthinned Sitka spruce / J. D. Brazier, I. D. Mobbs // Forestry. – 1993. – Vol. 66. – P. 333–352.

Breeding for wood quality and profit in radiata pine: a review of genetic parameters / H. X. Wu, M. Ivković, W. J. Gapare [et al.] // New Zealand journal of forestry science. – 2008. – Vol. 38. – P. 56–87.

Broshtilova, M. Aboveground phytomass of young *Quercus longipes* Stev. plantations on two site types / M. Broshtilova // Forest Science (Sofia). – 1983. – Vol. 20. – Iss. 6. – P. 40–50.

Brudi, E. Trees and Statics: Nondestructive Failure Analysis / E. Brudi, P. J. Van Wassenaeer // Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: How Trees Stand Up and Fall Down (Savannah, GA, USA, October 2001); International Society of Arboriculture : Champaign, IL, USA, 2002. – P. 53–70.

Bucur V. Acoustics of wood. Springer Science & Business Media / V. Bucur. – Berlin : Heidelberg, 2006. – 393 p.

Bucur, V. Attenuation of ultrasound in solid wood / V. Bucur, F. Feeney // Ultrasonics. – 1992. – Vol. 30. – No. 2. – P. 76–81.

Bucur, V. Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees / V. Bucur // Ultrasonics. – 2004. – Vol. 43. – P. 237–238.

Burger, H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. XIII. Mitteilung: Fichten in gleichaltrigen Hochwald / H. Burger // Mitteilungen der schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. – 1953. – Vol. 29. – P. 38–130.

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. / L. Calderón. – Madrid : E.U.I.T. Forestal, 2012. – 109 p.

Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? / L. Bouffier, C. Charlot, A. Raffin [et al.] // *Annals of Forest Science*. – 2008. – Vol. 65. – P. 106–108.

Canopy leaf water content estimated using terrestrial LiDAR / X. Zhu, T. Wang, A. K. Skidmore [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2017. – Vol. 232. – P. 152–162.

Carter, P. Acoustic technology – Enhanced tools for research and operations. General Technical Report FPL-GTR-249 / P. Carter // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 58–70.

Cell wall structure and wood properties determined by acoustics – a selective review / C.-L. Huang, H. Lindstrom, R. Nakada, J. Ralston // *Holz Roh- Werkst*. – 2003. – Vol. 61. – No. 5. – P. 321–335.

Ceraldi, C. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics / C. Ceraldi, V. Mormone, E. R. Ermolli // *Materials and Structures*. – 2001. – Vol. 34. – P. 59–64

Chantre, G. Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within-profile and within-ring density parameters in Douglas-fir wood? / G. Chantre, P. Rozenberg // *Proceedings of CTIA–IUFRO International wood quality workshop: timber management toward wood quality and end-product value*. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Quebec, Canada. – 1997. – P. 41–47.

Chapin, F. S. Principles of terrestrial ecosystem ecology / F. S. Chapin, P. A. Matson, P. M. Vitousek. – 2nd edn. – Berlin : Springer, 2011. – 529 p.

Chauhan, S. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine / S. Chauhan, J. Walker, S. Chauhan // *Forest Ecology and Management*. – 2006. – Vol. 229. – P. 388–394.

Chen, M. Big Data: A Survey / M. Chen, Sh. Mao, Y. Liu // *Mobile Networks and Applications*. – 2014. – Vol. 19. – No. 2. – P. 171–209.

Cherelli, S. Nonconventional approach to evaluate the quality of heartwood and sapwood / S. Cherelli, A. Ballarin // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI: U.S. Department

of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 517–529.

Chloupek, O. Die Bewertung des Wurzelsystems von Senfpflanzen auf Grund der dielektrischen Eigenschaften und mit Rücksicht auf den Endertrag / O. Chloupek // *Biologia Plantarum* (Praha). – 1976. – Vol. 18. – No. 1. – P. 44–49.

Chloupek, O. Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance / O. Chloupek // *Plant and Soil*. – 1977. – Vol. 48. – No. 2. – P. 525–532.

Chloupek, O. The relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots / O. Chloupek // *Biologia Plantarum* (Praha). – 1972. – Vol. 14. – No. 3. – P. 227–230.

Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA / D. Vaughan, D. Auty, T. E. Kolb [et al.] // *Annals of Forest Science*. – 2019. – Vol. 76. – Iss. 3. – P. 1–5.

Cockrell, R. A. A study of the screw-holding properties of wood / R. A. Cockrell // *Bulletin of the New York State College of Forestry of Syracuse, N.Y. Technical Publication*. – 1933. – No. 44. – P. 1–27.

Comparison among Velocity of Ultrasound Wave Propagation in Roots, Branches and Stem / C. P. Costa, R. Gonçalves, C. Bertoldo [et al.] // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 520–524.

Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation / M. A. Moqsud, J. Yoshitake, Q. S. Bushra [et al.] // *Waste Manag.* – 2015. – Vol. 36. – P. 63–69.

Connecting people with ecosystems in the 21st Century: An assessment of our nation's urban forests. General Technical Report PNW GTR-490 / J. F. Dwyer, D. J. Nowak, M. H. Noble, S. M. Sisinni. – Portland : Pacific Northwest Research Station, 2000. – 486 p.

Cown, D. J. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees / D. J. Cown // *New Zealand journal of forestry science*. – 1978. – Vol. 8. – No. 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 / D. J. Cown // *New Zealand Forest Service, Forest Research Institute*. – 1982. – Vol. 13. – P. 9–19.

Davidson, R. W. The effect of temperature on the electrical resistance of wood / R. W. Davidson // *Forest Products Journal*. – 1958. – Vol. 8. – No. 5. – P. 160–164.

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 / G. Chantre, E. Sutter-Barrot, R. Gouma, A. Bouvet // *Annals of Forest Research*. – 1992. – P. 145–177.

De Palma, A. Between radical change and conservation: the investigation of bioelectric phenomena in Germany in the late nineteenth century / A. De Palma, G. Pareti // *Nuncius*. – 2010. – Vol. 25. – Iss. 1. – P. 69–100.

Density estimation by screw withdrawal resistance and probing in structural sawn coniferous timber, and modulus of elasticity assessment / I. B. Maldonado, M. E. Herrero, G. Í. González [et al.] // *Informes de la Construcción*. – 2007. – Vol. 59. – P. 107–116.

Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: Applications and challenges / J. R. Butnor, M. L. Pruyn, D. C. Shaw [et al.] // *Forest Pathology*. – 2009. – Vol. 39. – P. 309–322.

Determination of log moisture content using early-time ground penetrating radar signal / G. Hans, D. Redman, B. Leblon [et al.] // *Wood Material Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 10. – P. 112–129.

Determination of the dry matter content of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) tubers using specific gravity method / E. Teye, A. P. Asare, R. S. M. Amoah, J. P. Tetteh // *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*. – 2011. – Vol. 6 (11). – P. 23–28.

Determination of wood specific gravity in standing white spruce using a Pilodyn tester / M. M. Micko, E. I. C. Wang, F. W. Taylor, A. D. Yanchuk // *Forestry Chronicle*. – 1982. – Vol. 58. – P. 178–180.

Developing breeding objectives for radiata pine structural wood production. I. Bioeconomic model and economic weights / M. Ivković, H. X. Wu, T. A. McRae, M. B. Powell // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2006. – Vol. 36. – P. 2920–2931.

Development of electrical conductivity measurement technology for key plant physiological information using microneedle sensor / E. Jeon, S. Choi, K. H. Yeo [et al.] // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2017. – Vol. 27. – P. 1–10.

Differences in growth and wood density in clones and provenance hybrid clones of Norway spruce / E. Levkoev, A. Kilpeläinen, K. Luostarinen [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2017. – Vol. 47 (3). – P. 389–399.

Differences in growth and wood density traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic entries grown at different spacing and sites / H. Peltola, J. Gort, P. Pulkkinen [et al.] // *Silva Fennica*. – 2009. – Vol. 43. – No. 3. – P. 339–354.

Dijkstra, E. A note on two problems in connexion with graphs / E. Dijkstra // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1. – P. 269–271.

Divos, F. Acoustic tools for seedling, tree and log selection / F. Divos // *Proceedings of the Final Conference of COST Action E53 «The Future of Quality Control for Wood and Wood Products»*. Edinburgh (Scotland) 4–7 May 2010. Napier University, Edinburgh, UK. – 2010. – P. 5–15.

Divos, F. Tree evaluation by acoustic tomography / F. Divos, L. Szalai // *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood (Berkeley, CA, USA, 19–21 August 2002)*. – 2002. – P. 251–256.

Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? A data-model intercomparison / N. Restrepo-Coupe, N. M. Levine, B. O. Christoffersen [et al.] // *Global Change Biology*. – 2017. – Vol. 23. – P. 191–208.

Dobbertin, M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review / M. Dobbertin // *European Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 124. – P. 319–333.

Doran, M. Biomass resources in the island of Ireland / M. Doran // *ICLRD briefing paper series*. – 2012. – Vol. 10. – P. 1–8.

Dündar, T. Effects of the clone differences and initial plant density on the acoustic measurements in hybrid poplar trees / T. Dündar, H. Akkılıç, Ü. Büyüksarı // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 386–394.

Earlywood structure of evergreen conifers near forest line is habitat driven but latewood depends on species and seasons / D. F. Zhirnova, L. V. Belokopytova, E. A. Babushkina [et al.] // *Trees*. – 2021. – Vol. 35. – P. 479–492.

Eckard, J. T. Rapid screening for solid wood quality traits in clones of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) by indirect measurements / J. T. Eckard. – M. Sc. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 2007. – 153 p.

Effect of growth conditions on wood density of Spanish *Pinus nigra* / O. A. Gutiérrez, V. Baonza Merino, J. I. Fernández-Golfín Seco [et al.] // Wood Science and Technology. – 2006. – Vol. 40. – P. 190–204.

Effect of growth rate on wood properties of genetically improved Sitka spruce / A. K. Livingston, A. D. Cameron, J. A. Petty, S. L. Lee // Forestry. – 2004. – Vol. 77. – P. 325–334.

Effect of initial planting density on growth traits and wood properties of triploid Chinese white poplar (*Populus tomentosa*) plantation / Y. Sang, P. Gao, X. Kang, P. Zhang // Forests. – 2021. – Vol. 12. – Art. 1676.

Effect of intensive planting density on tree growth, wood density and fiber properties of maple (*Acer velutinum* Boiss.) / H. R. Naji, M. F. Nia, M. Kiaei [et al.] // iForest. – 2015. – Vol. 9. – P. 325–329.

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) / I. A. Sofianto, T. Inagaki, T. Ma, S. Tsuchikawa // Holzforschung. – 2019. – Vol. 73. – No. 3. – P. 259–268.

Effect of moisture content on gasification efficiency in down draft gasifier / H. Kumar, P. Baredar, P. Agrawal, S. C. Soni // International Journal of Scientific Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3. – No. 4. – P. 411–413.

Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohei* / Z.-H. Jiang, X.-Q. Wang, B.-H. Fei [et al.] // Annals of Forest Science. – 2007. – Vol. 64. – P. 807–814.

Effect of thinning on relationships between three measures of wood stiffness in *Pinus radiata*: Standing trees vs. logs vs. short clear specimens / C. A. Raymond, B. Joe, D. W. Anderson, D. J. Watt // Canadian Journal of Forest Research. – 2008. – Vol. 38. – No. 11. – P. 2870–2879.

Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood / M. Hasegawa, M. Takata, J. Matsumura, K. Oda // Ultrasonics. – 2011. – Vol. 51. – No. 3. – P. 296–302.

Effects of early respacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber / J. Moore, A. Achim, A. Lyon [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2009. – Vol. 258. – P. 1174–1180.

Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine / H. Peltola, A. Kilpeläinen, K. Sauvala [et al.] // Silva Fennica. – 2007. – Vol. 41. – P. 489–505.

Effects of intra-seasonal drought on kinetics of tracheid differentiation and seasonal growth dynamics of Norway spruce along an elevational gra-

dient / D. F. Stangler, H.-P. Kahle, M. Raden [et al.] // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – Art. 274.

Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir / B. L. Gartner, E. M. North, G. R. Johnson, R. Singleton // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2002. – Vol. 32. – P. 439–447.

Effects of plantation density on wood density and anatomical properties of red pine (*Pinus resinosa* Ait.) / J. Y. Zhu, C. T. Scott, K. L. Scallon, G. C. Myers // *Wood and Fiber Science*. – 2007. – Vol. 39. – Iss. 3. – P. 502–512.

Effects of pre-commercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada / S. Y. Zhang, G. Chauret, D. E. Swift, I. Duchesne // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2006. – Vol. 36. – No. 4. – P. 945–952.

Effects of stand density and seedlot on three wood properties of young radiata pine grown at a dry-land site in New Zealand / J. R. Moore, D. J. Cown, R. B. McKinley, C. O. Sabatia // *New Zealand journal of forestry science*. – 2015. – Vol. 45. – No. 4. P. 1–15.

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* / E. Fukatsu, A. Tamura, M. Takahashi [et al.] // *Journal of Forestry Research*. – 2011. – Vol. 16. – P. 128–135.

Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave / S. Dahmen, H. Ketata, M. H. Ben Ghazlen, B. Hosten // *Ultrasonics*. – 2010. – Vol. 50. – No. 4. – P. 502–507.

Electrical resistance in tree cambium zone: relationship to rates of growth and wound closure / W. S. Shortle, A. L. Shigo, P. Berry, J. Abusamra // *Forest Science*. – 1977. – Vol. 23. – P. 326–329.

Electrical resistance measurements of young balsam fir trees in relation to specific volume increment, foliar biomass, and ion content of bark and wood / H. Piene, R. G. Thompson, J. E. McIsaac, D. S. Fensom // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1984. – Vol. 14. – P. 177–180.

El-Hadad, A. The Effect of Wood Condition on Sound Wave Propagation / A. El-Hadad, G. I. Brodie, B. S. Ahmed // *Open Journal of Acoustics*. – 2018. – Vol. 8. – No. 3. – P. 37–51.

Environment effects on wood density of vegetation types in Minas Gerais state – Brazil / G. M. V. Oliveira, J. M. Mello, P. F. Trugilho [et al.] // *Cerne*. – 2012. – Vol. 18. – P. 345–352.

Estimating belowground biomass and root/short ratio of *Phillyrea latifolia* L. in the Mediterranean forest landscapes / P. A. Marziliano, R. Laforteza, U. Mendicamento [et al.] // Annals of Forest Science. – 2015. – Vol. 72 (5). – P. 585–593.

Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce / Z.-Q. Chen, B. Karlsson, S.-O. Lundqvist [et al.] // Annals of Forest Science. – 2015. – Vol. 72. – P. 499–508.

Estimation of greenhouse CO₂ concentration via an artificial neural network that uses environmental factors / T. W. Moon, D. H. Jung, S. H. Chang, J. E. Son // Horticulture Environment and Biotechnology. – 2018. – Vol. 59. – P. 45–50.

Estimation of whole-tree kraft pulp yield of *Eucalyptus nitens* using near-infrared spectra collected from increment cores / L. R. Schimleck, P. D. A. Kube, C. Raymond [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 2797–2805.

Evaluation of the resistograph for wood density estimate and the use of multi-trait selection index for genetic selection in jack pine / P. Charette, P. Lu, F. Tang, S. Y. Zhang // Proceedings of the 31st Meeting of the Canadian Forest Genetics Association: Adaptation and Conservation in the Era of Forest Tree Genomics and Environmental Change, Quebec City, Quebec, 25–28 August 2008. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Fredericton, N.B. – 2008. – P. 1–88.

Evaluation of wood characteristics: internal scanning of the material by microwaves / P. Martin, R. Collet, P. Barthelemy, G. Roussy // Wood Science and Technology. – 1987. – Vol. 21. – P. 361–371.

Evans, R. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density / R. Evans, J. Ilic // Forest Products Journal. – 2001. – Vol. 51. – P. 53–57.

Evolution of *Eucalyptus* clone's parameters obtained nondestructively in nursery seedlings up to cutting age / R. G. M. Lorensani, R. Gonçalves, G. Müller [et al.] // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017a. – P. 370–376.

Experimental measurement of the biomass of *Olea europaea* L. / L. Ilarioni, L. Nasini, A. Brunori, P. Proietti // African Journal of Biotechnology. – 2013. – Vol. 12 (11). – P. 1216–1222.

Farrell, R. Sorting plantation *Eucalyptus nitens* logs with acoustic wave velocity. Project No. PN07.3018 / R. Farrell, T. Innes, G. Nolan. –

Victoria, Australia : Forest and Wood Products Australia Limited, 2008. – 27 p.

Fearnside, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia / P. M. Fearnside // *Forest Ecology and Management*. – 1997. – Vol. 90. – P. 59–89.

Fernandez, J. E. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review / J. E. Fernandez, M. V. Cuevas // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2010. – Vol. 150. – No. 2. – P. 135–151.

Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms / K. Zieminska, D. W. Butler, S. M. Gleason [et al.] // *AoB PLANTS*. – 2013. – Vol. 5. – Art. plt046.

Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. General Technical Report FPL-GTR-129P / P. R. Larson, D. E. Kretschmann, A. Clark, J. G. Isebrands. – Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2001. – 42 p.

Forsén, H. Accuracy and functionality of hand held wood moisture-content meters / H. Forsén, V. Tarvainen. – Espoo : Technical Research Centre of Finland, VTT Publications, 2000. – Vol. 420. – 79 p.

Freilandmethoden zur Untersuchung von Baumwurzeln / A. Bolte, D. Hertel, C. Ammer [et al.] // *Forstarchiv*. – 2003. – Vol. 74. – P. 240–262.

Fromm, J. Electrical signals and their physiological significance in plants / J. Fromm, S. Lautner // *Plant Cell Environ*. – 2007. – Vol. 30. – No. 3. – P. 249–257.

Fujimoto, T. Genetic control of intra-ring wood density variation in hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) / T. Fujimoto, K. Kita, M. Kuromaru // *Wood Science and Technology*. – 2008. – Vol. 42. – P. 227–240.

Fujiwara, T. Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal by forests and their variation / T. Fujiwara, K. Yamashita, K. Kuroda // *Bulletin of FFPRI*. – 2007. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 215–226.

Functional relationships of wood anatomical traits in Norway spruce / A. Piermattei, G. von Arx, C. Avanzi [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2020. – Vol. 11. – Article 683.

Fundova, I. *In situ* wood quality assessment in interior spruce / I. Fundova // Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Faculty of graduate studies (Forestry). – Vancouver : The University of British Columbia, 2012. – 80 p.

Fundova, I. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn / I. Fundova, T. Funda, H. X. Wu // PLoS ONE. – 2018. – Vol. 13. – No. 9. – P. 1–16. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518> (дата обращения: 07.05.2023).

Gagliano, M. Towards understanding plant bioacoustics / M. Gagliano, S. Mancuso, D. Robert // Trends in Plant Science. – 2012. – Vol. 17. – No. 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 / C. H. Gantz. – North Carolina : Master of Science, 2002. – 78 p.

Garzon, P. C. Plants: Adaptive behavior, root-brains and minimal cognition / P. C. Garzon, F. Keijzer // Adaptive Behavior. – 2011. – Vol. 19. – P. 155–171.

Genetic analysis of fiber-dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*) / H. Hayatgheibi, A. Fries, J. Kroon, H. X. Wu // Canadian Journal of Forest Research. – 2019. – Vol. 49. – No. 5. – P. 500–509.

Genetic analysis of wood quality traits in Norway spruce open-pollinated progenies and their parent plus trees at clonal archives and the evaluation of phenotypic selection of plus trees / L. Zhou, Z. Chen, S.-O. Lundqvist [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. – 2019. – Vol. 49 (7). – P. 810–818.

Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) / D. Pot, G. Chantre, P. Rozenberg [et al.] // Annals of Forest Science. – 2002. – Vol. 59. – P. 563–575.

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 / C. Mamdy, P. Rozenberg, A. Franc [et al.] // Annals of Forest Science. – 1999. – Vol. 56. – P. 133–143.

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 / P. Rozenberg, A. Franc, C. Mamdy [et al.] // Annals of Forest Science. – 1999. – Vol. 56. – No. 2. – P. 145–154.

Genetic control of wood properties in *Picea glauca* – An analysis of trends with cambial age / P. Lenz, A. Cloutier, J. MacKay, J. Beaulieu // Canadian Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 40. – No. 4. – P. 703–715.

Genetic correlations among juvenile wood quality and growth traits and implications for selection strategy in *Pinus radiata* D. Don / W. J. Gapare, B. S. Baltunis, M. Ivković, H. X. Wu // *Annals of Forest Science*. – 2009. – Vol. 66. – No. 6. – P. 606–606.

Genetic improvement of white spruce mechanical wood traits – early screening by means of acoustic velocity / P. Lenz, D. Auty, A. Achim [et al.] // *Forests*. – 2013. – Vol. 4. – P. 575–594.

Genetic parameters of growth and wood quality traits in *Picea abies* / B. Hannrup, C. Cahalan, G. Chantre [et al.] // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2004. – Vol. 19. – P. 14–29.

Gillis, C. M. Moisture meter correction factors for four Brazilian wood species / C. M. Gillis, W. C. Stephens, P. N. Peralta // *Forest Products Journal*. – 2001. – Vol. 5. – P. 83–86.

Glass, S. V. Moisture relations and physical properties of wood / S. V. Glass, S. L. Zelinka // *Wood handbook: wood as an engineering material*. Chapter 4. Centennial Edition. General technical report FPL-GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2010. – P. 1–20.

Global wood density database / A. E. Zanne, G. Lopez-Gonzalez, D. A. Coomes [et al.]. – Dryad, 2009. – URL: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235> (дата обращения: 07.05.2023).

GlobAllomeTree's wood density database / E. Donegan, G. Sola, Z. Cheng [et al.] // *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Technical Report*. – Rome, Italy, 2014. – 29 p.

Gonçalves, R. Selecting *Eucalyptus* clones using ultrasound test on standing trees / R. Gonçalves, F. A. F. Batista, R. G. M. Lorensani // *Forest Products Journal*. – 2013. – Vol. 63. – No. 3–4. – P. 112–118.

Gora, E. M. Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines / E. M. Gora, S. P. Yanoviak // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2015. – Vol. 45. – P. 236–245.

Görlacher, R. Untersuchung von altern Konstruktionsholz: Die Bohrwiderstandsmessung / R. Görlacher, R. Hättich // *Bauen mit Holz*. – 1990. – Vol. 92. – P. 455–459.

Görlacher, R. Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein «in situ» – Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte / R. Görlacher // *Holz als Roh- und Werkstoff*. – 1987. – Vol. 45. – P. 273–278.

Gort-Oromi, J. Effects of genetic entry and spacing on growth and wood properties in Scots pine / J. Gort-Oromi // *Dissertationes Forestales*. – 2010. – P. 1–29. – URL: <https://doi.org/10.14214/df.110> (дата обращения: 07.05.2023).

Gough, G. A comparison of three methods of wood density assessment in a *Pinus elliottii* progeny test / G. Gough, R. D. Barnes // South African Forestry Journal. – 1984. – Vol. 128. – No. 1. – P. 22–25.

Grabianowski, M. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber / M. Grabianowski, B. Manley, J. C. F. Walker // Wood Science and Technology. – 2006. – Vol. 40. – P. 205–216.

Grammel, R. Zusammenhänge zwischen Wachstumsbedingungen und holztechnologischen Eigenschaften der Fichte / R. Grammel // Forstwissenschaftliches Centralblatt. – 1990. – Vol. 109. – P. 119–129.

Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell / D. P. Strik, H. V. M. Hamelers, J. F. Snel, C. J. Buisman // International Journal of Energy Research. – 2008. – Vol. 32. – No. 9. – P. 870–876.

Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement / N. L. Bussuk, J. Grabosky, A. Mucciardo, G. Raffel // Arboriculture and Urban Forestry. – 2011. – Vol. 37. – P. 160–166.

Growth and wood density predict tree mortality in Amazon forests / K. J. Chao, O. L. Phillips, E. Gloor [et al.] // Journal of Ecology. – 2008. – Vol. 96. – P. 281–292.

Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites / S. Raiskila, P. Saranpää, K. Fagerstedt [et al.] // Silva Fennica. – 2006. – Vol. 40. – No. 2. – P. 247–256.

Guź, M. M. Kompleksowa metoda badań systemów korzeniowych roślin drzewiastych / M.M. Guź // Acta Agraria et Silvestria. Series silvestris. – 1990. – Vol. 29. – P. 17–29.

Gwaze, D. Genetic variation of wood density and its relationship with drill resistance in shortleaf pine / D. Gwaze, A. Stevenson // Southern Journal of Applied Forestry. – 2008. – Vol. 32. – P. 130–133.

Hakkila, P. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood / P. Hakkila // Communicationes Instituti Forestalis Fennicae. – 1966. – Vol. 61. – Iss. 5. – P. 1–98.

Hanhijärvi, A. Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project – Phase 2, Technical Report VTT Publications 686 / A. Hanhijärvi, A. Ranta-Maunus. – Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. – 55 p.

Hansen, C. P. Application of the Pilodyn in Forest Tree Improvement. DFSC Series of Technical Notes. TN55 / C. P. Hansen. – Humlebaek : Danida Forest Seed Centre, 2000. – 11 p.

Hapla, F. Radiographisch-densitometrische Holzeigenschaftsuntersuchungen an Douglasien aus unterschiedlich durchforsteten Versuchsflächen / F. Hapla // Holz als Roh- und Werkstoff. – 1985. – Vol. 43. – P. 9–15.

Hassan, K. T. Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques / K. T. Hassan, P. Horaacek, J. Tippner // BioResources. – 2013. – Vol. 8 (2). – P. 1634–1645.

Hawe, J. Broadleaf thinning in Ireland – a review of European silvicultural best practice / J. Hawe, I. Short // Irish Forestry. – 2016. – Vol. 73. – P. 25–64.

Hayes, M. A portable stress wave measurement system for timber inspection / M. Hayes, J. Chen // Proceedings of the Electronics Conference (ENZCON), Hamilton, New Zealand. – 2003. – P. 1–6.

He, D. The relationship between trunk-and twigwood density shifts with tree size and species stature / D. He, D. C. Deane // Forest Ecology and Management. – 2016. – Vol. 372. – P. 137–142.

Herman, M. Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density, and mean tracheid length in norway spruce (*Picea abies* (L.) karst.) / M. Herman, P. Dutilleul, T. Avella-Shaw // Wood and Fiber Science. – 1998. – Vol. 30. – P. 6–17.

Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description / J. Hackenberg, C. Morhart, J. Sheppard [et al.] // Forests. – 2014. – Vol. 5. – P. 1069–1105.

Hobbs, T. Plant biometrics and biomass productivity in the river Murray Dryland Corridor. A report for the South Australia Centre for Natural Resource Management. Flora Search Series / T. Hobbs, M. Bennell. – Adelaide : South Australia Water, Land and Biodiversity Conservation, 2005. – 29 p.

Hoffmeyer, P. The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood / P. Hoffmeyer // Proceedings of the 4th symposium on non-destructive testing of wood. Pullman, Washington, USA. – 1978. – P. 47–66.

How many trees and samples are adequate for estimating wood-specific gravity across different tropical forests? / K. J. V. Páscoa, L. R. Gomide, D. Y. P. Tang [et al.] // Trees. – 2020. – Vol. 34. – P. 1383–1395.

Howe, J. P. Relationship of climate to the specific gravity of four Costa Rican hardwoods, an exploratory study / J. P. Howe // Wood Fiber. – 1974. – Vol. 5. – P. 347–352.

Hruska, L. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar / L. Hruska, J. Čermak, S. Šustek // *Tree Physiol.* – 1999. – Vol. 19. – P. 125–130.

Hsu, C. Y. *Radiata* pine wood anatomy structure and biophysical properties / C. Y. Hsu. – Canterbury : University of Canterbury, 2003. – 141 p.

Hultnas, M. Methods to determine the dry matter content of round wood deliveries / M. Hultnas // *TAPPI Journal.* – 2011. – Vol. 10 (6). – P. 33–37.

Ikeda, K. 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 / K. Ikeda, T. Arima // *Mokuzai Gakaisi.* – 2000. – Vol. 46. – P. 189–196.

Impact of plantation black spruce initial spacing on lumber grade yield, bending properties and MSR yield / S. Y. Zhang, G. Chauret, H. Q. Ren, R. Desjardins // *Wood and Fiber Science.* – 2002. – Vol. 34, No. 3. – P. 460–475.

Implications of selection history on genetic architecture of growth, form, and wood-quality traits in *Pinus radiata* / S. Kumar, R. D. Burdon, G. T. Stovold, L. D. Gea // *Canadian Journal of Forest Research.* – 2008. – Vol. 38, No. 9. – P. 2372–2381.

Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees / J. Chave, M. Réjou-Méchain, A. Búrquez [et al.] // *Global Change Biology.* – 2014. – Vol. 20. – P. 3177–3190.

Improving models of wood density by including genetic effects: A case study in Douglas-fir / P. Rozenberg, A. Franc, C. Bastien, C. Cahalan // *Annals of Forest Science.* – 2001. – Vol. 58. – P. 385–394.

Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood / J.-P. Lasserre, E. G. Mason, M. S. Watt, J. R. Moore // *Forest Ecology and Management.* – 2009. – Vol. 258. – P. 1924–1931.

Influence of moisture content on the results of penetration and withdrawal resistance measurements on softwoods / D. F. Llana, E. Hermoso, I. Bobadilla, G. Iñiguez-Gonzalez // *Holzforschung.* – 2018. – Vol. 72, No. 7. – P. 549–555.

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 / M. S. Watt, B. Zoric, M. O. Kimberley, J. Harrington //

Canadian Journal of Forest Research. – 2011. – Vol. 41, No. 7. – P. 1422–1431.

Inheritance and genetic gain in wood stiffness in radiata pine assessed acoustically in young standing trees / A. C. Matheson, W. J. Gapare, J. Ilic, H. X. Wu // *Silvae Genetica*. – 2008. – Vol. 57. – P. 56–64.

Interclonal, intraclonal and within-tree variation in wood density of poplar hybrid clones / M. Beaudoin, R. E. Hernández, A. Koubaa, J. Poliquin // *Wood and Fiber Science*. – 2007. – Vol. 24. – P. 147–153.

Interference of pith, knots and interpolation system in ultrasonic tomography images / S. S. A. Palma, R. Gonçalves, A. J. Trinca [et al.] // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249*. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 194–201.

Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce / O. Bouriaud, J.-M. Leban, D. Bert, C. Deleuze // *Tree Physiology*. – 2005. – Vol. 25. – P. 651–660.

Isik, F. Rapid assessment of wood density of live trees using Resistograph for selection in tree improvement programs / F. Isik, B. Li // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2003. – Vol. 33. – P. 2426–2435.

Ivkovich, M. Genetic variation in wood properties of interior spruce. I. Growth, latewood percentage, and wood density / M. Ivkovich, G. Namkoong, M. Koshy // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2002. – Vol. 32. – No. 12. – P. 2116–2127.

James, K. R. Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading / K. R. James, C. Hallam, C. Spencer // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2013. – Vol. 168. – P. 160–167.

James, W. L. A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle of wood / W. L. James, Y.-H. Yen, R. J. King // *Research Note FPL-0250*. – 1985. – P. 1–9.

James, W. L. Effect of temperature on readings of electric moisture meters / W. L. James // *Forest Products Journal*. – 1968. – Vol. 18. – No. 10. – P. 23–31.

James, W. L. Electric moisture meters for wood. General Technical Report FPL-GTR-6 / W. L. James. – Madison, WI : Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988. – 17 p.

Jessome, A. P. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada / A. P. Jessome. – Sainte-Foy : Forintek Canada Corp., 2000. – 27 p.

Johansson, J. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber / J. Johansson, O. Hagman, B.-A. Fjellner // *Journal of Wood Science*. – 2003. – Vol. 49. – P. 312–316.

Kane, B. Tree pulling tests of large shade trees in genus *Acer* / B. Kane, P. Clouston // *Arboriculture and Urban Forestry*. – 2008. – Vol. 34. – P. 101–109.

Karizumi, N. The mechanism and function of tree root in the process of forest production. (I). Methods of investigation and estimation of the root biomass / N. Karizumi // *Bulletin of the Government Forest Experiment Station*. – 1974. – Vol. 259. – P. 1–99.

Kellomäki, S. On geoclimatic variation in basic density of Scots pine wood / S. Kellomäki // *Silva Fennica*. – 1979. – Vol. 13, No. 1. – P. 55–64.

Kerfriden, B. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density / B. Kerfriden, J.-D. Bontemps, J.-M. Leban // *Plant Ecology*. – 2021. – Vol. 222. – Iss. 3. – P. 289–303.

Kettunen, P. O. Wood structure and properties / P. O. Kettunen. – Stäfa : Trans Tech Publications Ltd, 2006. – 401 p.

King, R. J. Probing amplitude, phase, and polarization of microwave field distributions in real time / R. J. King, Y. H. Yen // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques MTT*. – 1981. – Vol. 29. – P. 1225–1231.

Kloiber, M. Estimation of wood properties using pin pushing in method with various shapes of the penetration pin / M. Kloiber, M. Kotlínová, J. Tippner // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. – 2009. – Vol. 57, No. 2. – P. 53–60.

Koch, P. Utilization of the Southern Pines / P. Koch. – Washington, DC : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1972. – Vol. 420. – 1663 p.

Koizumi, A. Studies on the estimation of the mechanical properties of standing trees by non-destructive bending test / A. Koizumi // *Bulletin of the College Experiment Forest, Faculty of Agriculture, Hokkaido University*. – 1987. – Vol. 44, No. 4. – P. 1329–1415.

Kollmann, F. F. P. Solid wood / F. F. P. Kollmann, W. A. Côté. – Berlin : Springer, 1984. – 592 p.

Koppán, A. Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree / A. Koppán,

L. Szarka, V. Wesztergom // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. – 2000. – Vol. 323, No. 6. – P. 559–563.

Korell, U. Die Anwendung radiometrischer Methoden für Dichte- und Feuchtemessungen an Hackschnitzeln / U. Korell, O. Bloßfeld // Wissenschaftliche Tagung der Sektion Forstwirtschaft vom 16. Oktober bis 18. Oktober 1978. Vorträge III. Technische Universität Dresden. – 1978. – P. 109–116.

Kothiyal, V. Estimating mechanical properties and specific gravity for five-year-old *Eucalyptus tereticornis* having broad moisture content range by NIR spectroscopy / V. Kothiyal, A. Raturi // Holzforschung. – 2011. – Vol. 65, No. 5. – P. 757–762.

Krajnc, L. The effect of thinning on mechanical properties of Douglas fir, Norway spruce, and Sitka spruce / L. Krajnc, N. Farrelly, A. M. Harte // Annals of Forest Science. – 2019a. – Vol. 76. – Art. 3.

Krajnc, L. The influence of silvicultural practices on mechanical properties of softwood timber. Thesis submitted to the National University of Ireland Galway as fulfilment for the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy / L. Krajnc. – Galway : College of Engineering and Informatics, National University of Ireland Galway, 2019. – 186 p.

Kuntz, J. E. 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 / J. E. Kuntz, A. J. Riker // Proc. Intern. Confer. Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva. – 1956. – Vol. 12. – P. 144–145.

Küssner, R. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany / R. Küssner, R. Mosandl // Canadian Journal of Forest Research. – 2000. – Vol. 30. – P. 440–447.

Laaksonen, K. The dependence of mean air temperatures upon latitude and altitude in Fennoskandia (1921-1950) / K. Laaksonen // Annales Academiae Scientiarum Fennicae (A). – 1976. – Vol. 119. – P. 5–19.

Lachowicz, H. Variability in the basic density of silver birch wood in Poland / H. Lachowicz, A. Bieniasz, R. Wojtan // Silva Fennica. – 2019. – Vol. 53. – No. 1. – Art. 9968.

Laitakari, E. The root system of pine. A morphological investigation / E. Laitakari // Acta Forest Fennicae. – 1929. – Vol. 33. – No. 1. – P. 1–380.

Lasserre, J.-P. The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* [D. Don] corewood stiffness in an 11-year old experiment / J.-P. Lasserre, E. G. Mason, M. S. Watt // Forest Ecology and Management. – 2005. – Vol. 205. – No. 1–3. – P. 375–383.

Le Goff, N. Above and belowground biomass data for a set of beech trees of different age and crown classes sampled in Hesse state forest (NE France) with a view to analyzing the distribution and the allocation of biomass in the tree / N. Le Goff. – Nancy : Université de Lorraine, 2019. – 46 p. – URL: <https://doi.org/10.15454/8CLEGO> (дата обращения: 05.06.2023).

Leaf dry matter content is better at predicting aboveground net primary production than specific leaf area / S. M. Smart, H. C. Glanville, M. del Carmen Blanes [et al.] // *Functional Ecology*. – 2017. – Vol. 31. – P. 1336–1344.

Legg, M. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review / M. Legg, S. Bradley // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2016. – Vol. 139, No. 2. – P. 588–604.

Li, L. Efficiency of early selection for rotation-aged growth and wood density traits in *Pinus radiata* / L. Li, H. X. Wu // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – P. 2019–2029.

Liepiņš, J. Mean basic density and its axial variation in Scots pine, Norway spruce and birch stems / J. Liepiņš, K. Liepiņš // *Research for Rural Development*. – 2017. – Vol. 1. – P. 21–27.

Lindström, H. Using non-destructive testing to assess modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* trees / H. Lindström, M. Reale, M. Grekin // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2009. – Vol. 24. – P. 247–257.

Linking acoustic velocity of standing Douglas-fir trees to veneer stiffness: a tree-log-product study across thinning treatments / E. C. Lowell, C. L. Todoroki, D. P. Dykstra, D. G. Briggs // *New Zealand journal of forestry science*. – 2014. – Vol. 44. – No. 1. – P. 1–16.

Llana, D. F. Use of non-destructive test methods on Irish hardwood standing trees and small-diameter round timber for prediction of mechanical properties / D. F. Llana, I. Short, A. M. Harte // *Annals of Forest Science*. – 2020. – Vol. 77 (3). – Art. 62.

Louzada, J. L. P. C. The heritability of wood density components in *Pinus pinaster* Ait. and the implications for tree breeding / J. L. P. C. Louzada, F. M. A. Fonseca // *Annals of Forest Science*. – 2002. – Vol. 59. – P. 867–873.

Luley, C. J. Do you hear what I hear? Part 1: Introduction to sounding / C. J. Luley, M. Ellison // *Arborist News*. – 2017. – Vol. 26. – P. 54–56.

Luley, C. J. Do you hear what I hear? Part 2: Field application of sounding / C. J. Luley, M. Ellison // *Arborist News*. – 2018. – Vol. 27. – P. 40–44.

Lundgren, N. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber II: evaluation of models generated on a pixel level / N. Lundgren, O. Hagman, J. Johansson // *Journal of Wood Science*. – 2006. – Vol. 52. – P. 39–43.

Lyr, H. *Gehölzphysiologie* / H. Lyr, H. Polster, H.-J. Fiedler. – Jena : VEB Gustav Fischer Verlag, 1967. – 422 p.

Ma, T. Calibration of SilviScan data of *Cryptomeria japonica* wood concerning density and microfibril angles with NIR hyperspectral imaging with high spatial resolution / T. Ma, T. Inagaki, S. Tsuchikawa // *Holzforschung*. – 2017. – Vol. 71. – No. 4. – P. 341–347.

Ma, T. Non-destructive evaluation of wood stiffness and fiber coarseness, derived from SilviScan data, via near infrared hyperspectral imaging / T. Ma, T. Inagaki, S. Tsuchikawa // *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 26. – No. 6. – P. 398–405.

MacDonald, E. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce / E. MacDonald // *Forestry*. – 2002. – Vol. 75. – P. 107–138.

MacFarlane, D. W. Functional relationships between branch and stem wood density for temperate tree species in North America / D. W. MacFarlane // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2020. – Vol. 3. – Art. 63.

Maeglin, R. R. Western wood density survey. Report No. 2 / R. R. Maeglin, H. E. Wahlgren. – Washington : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1972. – 24 p.

Maiti, R. Autoecology and ecophysiology of woody shrubs and trees: concepts and applications / R. Maiti, H. González Rodríguez, N. S. Ivanova. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2016. – 384 p.

Malavasi, U. C. Estimating water in living woody stems – a review / U. C. Malavasi, A. S. Davis, M. M. Malavasi // *Cerne*. – 2016. – Vol. 22. – No. 4. – P. 415–422.

Mamdy, C. Contribution à l'étude du module d'élasticité de troncs d'arbres sur pied; utilisation en amélioration génétique des arbres forestiers. Rapport DEA Matière condensée et diluée, ESEM Orléans / C. Mamdy. – Orléans : INRA Orléans, 1995. – 47 p.

Marra, G. Nondestructive determination of wood strength and elasticity by vibration / G. Marra, R. Pellerin, W. Galligan // *Holz Roh- Werkst.* – 1966. – Vol. 24. – No. 10. – P. 460–466.

Mattheck, C. G. Detection of decay in trees with the metriguard stress wave timer / C. G. Mattheck, K. A. Bethge // *Journal of arboriculture*. – 1993. – Vol. 19. – P. 374–378.

Mattheck, C. How to read the results of resistograph M. / C. Mattheck, K. Bethge, W. Albrecht // *Arboricultural Journal*. – 1997. – Vol. 21. – P. 331–346.

McLain, T. E. Design axial withdrawal strength from wood: I. Wood screws and lag screws / T. E. McLain // *Forest Products Journal*. – 1997. – Vol. 47. – No. 5. – P. 77–84.

Measuring stiffness using acoustic tool for Scots pine breeding selection / Z. Hong, A. Fries, S.-O. Lundqvist [et al.] // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2015. – Vol. 30. – P. 1–10.

Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic based nondestructive methods / Y. Yin, H. Nagao, X. Liu, T. Nakai // *Journal of Wood Science*. – 2010. – Vol. 56. – No. 1. – P. 33–40.

Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-squares / L. Yu, Y. Liang, Y. Zhang, J. Cao // *Journal of Forestry Research*. – 2020. – Vol. 31. – P. 1053–1060.

Mechanical stability of scots pine, Norway spruce and birch: An analysis of tree-pulling experiments in Finland / H. Peltola, S. Kellomaki, A. Hassinen, M. Granander // *Forest Ecology and Management*. – 2000. – Vol. 135. – P. 143–153.

Meder, R. Seeing the wood in the trees: Unleashing the secrets of wood via near infrared spectroscopy / R. Meder, T. Trung, L. Schimleck // *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. – 2010. – Vol. 18. – P. 5–7.

Michalikova, M. A hybrid device for electrical impedance tomography and bioelectrical impedance spectroscopy measurement / M. Michalikova, M. Prauzek // *IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. – 2014. – P. 1–4.

Microbial fuel cell technology for bioelectricity / V. Sivasankar, P. Mysamy, K. Omine [et al.]. – New York : Springer International Publishing AG, 2018. – 311 p.

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 / A. Aichholzer, C. Schuberth, H. Mayer, H. Arthaber // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2018. – Vol. 76. – P. 89–103.

Mikola, P. On variations in tree growth and their significance to growth studies / P. Mikola // *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. – 1950. – Vol. 38, No. 5. – P. 1–131.

Milota, M. R. Calibration of moisture meters for western hardwood species / M. R. Milota // *Forest Products Journal*. – 1996. – Vol. 46. – No. 1. – P. 39–42.

Milota, M. R. Specific gravity as a predictor of species correction factors for a capacitance-type moisture meter / M. R. Milota // *Forest Products Journal*. – 1994. – Vol. 44. – P. 63–68.

Mochan, S. Using acoustic tools in forestry and the wood supply chain / S. Mochan, S. Moore, T. Connolly // *Forestry Commission, Technical Note 18*. – 2009. – P. 1–6.

Mockler, N. Physical characterisation and quantification of total above ground biomass derived from first thinnings for wood fuel consumption in Ireland. Master thesis / N. Mockler. – Waterford : Waterford Institute of Technology, 2013. – 131 p.

Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning / G. Giroud, R. Schneider, R. A. Fournier [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2019. – Vol. 49. – No. 6. – P. 661–669.

Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics / C. Liu, S. Zhang, A. Cloutier, T. Rycabel // *Forest Ecology and Management*. – 2007. – Vol. 242. – P. 648–655.

Modeling permafrost thaw and ecosystem carbon cycle under annual and seasonal warming at an Arctic tundra site in Alaska / J. Li, Y. Luo, S. Natali [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2014. – Vol. 119. – P. 1129–1146.

Modeling the canopy photosynthetic rate of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in a plant factory at varying CO₂ concentrations and growth stages / D. H. Jung, D. Kim, H. I. Yoon [et al.] // *Horticulture Environment and Biotechnology*. – 2016. – Vol. 57. – P. 487–492.

Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir / M. O. Kimberley, R. B. McKinley, D. J. Cown, J. R. Moore // *New Zealand Journal of Forestry Science*. – 2017. – Vol. 47. – Iss. 1. – P. 1–15.

Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine / M. O. Kimberley, D. J. Cown, R. B. McKinley [et al.] // *New Zealand journal of forestry science*. – 2015. – Vol. 45. – P. 1–13.

Molteberg, D. Modelling of wood density and fibre dimensions in mature Norway spruce / D. Molteberg, O. Høibø // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2007. – Vol. 37 (8). – P. 1373–1389.

Moskal, L. M. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest / L. M. Moskal, G. Zheng // *Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 4. – P. 1–20.

MRI links stem water content to stem diameter variations in transpiring trees / V. D. Schepper, D. V. Dusschoten, P. Copini [et al.] // *Journal of Experimental Botany*. – 2012. – Vol. 63. – P. 2645–2653.

Mucciardi, A. N. Preliminary evidence for using statistical classification of vibration waveforms as an initial decay detection tool / A. N. Mucciardi, C. J. Luley, K. H. Gormally // *Arboriculture and Urban Forestry*. – 2011. – Vol. 37. – P. 191–199.

Murphy, G. Stand, stem and log segregation based on wood properties: A review / G. Murphy, D. Cown // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2015. – Vol. 30. – P. 1–14.

Nadezhdina, N. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems in large trees / N. Nadezhdina, J. Čermak // *Journal of Experimental Botany*. – 2003. – Vol. 54. – P. 1511–1521.

Nakamura, N. Measurement of the properties of standing trees with ultrasonics and mapping of the properties / N. Nakamura // *University Forest Research Rep. 96. Faculty of Agriculture, The University of Tokyo*. – 1996. – P. 125–135.

Nakvasina, E. N. Assimilation apparatus as an indicator of *Pinus sylvestris* adaptation to the climatic growing conditions / E. N. Nakvasina // *Forestry Journal*. – 2009. – Vol. 3. – P.12–19.

Nam, V. T. Allometric equations for aboveground and belowground biomass estimations in an evergreen forest in Vietnam / V. T. Nam, M. V. Kuijk, N. P. R. Anten // *PLoS ONE*. – 2016. – Vol. 11. – P. 1–19.

Nam, V. T. Biomass dynamics in a logged forest: the role of wood density / V. T. Nam, N. P. R. Anten, M. van Kuijk // *Journal of Plant Research*. – 2018. – Vol. 131. – Art. 611.

Near-infrared spectroscopy prediction of southern pine No. 2 lumber physical and mechanical properties / J. Dahlen, I. Diaz, L. Schimleck, P. D. Jones // *Wood Science and Technology*. – 2017. – Vol. 51. – P. 309–322.

Nepveu, G. L'utilisation du torsiomètre en forêt: influence de l'opérateur et de l'appareil / G. Nepveu // *Annals of Forest Science*. – 1979. – Vol. 36. – No. 4. – P. 347–51.

Ni, J. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests / J. Ni, X.-S. Zhang, J. M. O. Scurlock // *Annals of Forest Science*. – 2001. – Vol. 58, No. 4. – P. 351–384.

Nicholls, J. W. P. Tests on a field method for the determination of wood density / J. W. P. Nicholls, D. K. Roget // Australian Forestry. – 1977. – Vol. 40, No. 2. – P. 144–150.

Nogueira, E. M. Normalization of wood density in biomass estimates of Amazon forests / E. M. Nogueira, P. M. Fearnside, B. W. Nelson // Forest Ecology and Management. – 2008. – Vol. 256. – Iss. 5. – P. 990–996.

Nogueira, E. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil / E. M. Nogueira, B. W. Nelson, P. M. Fearnside // Forest Ecology and Management. – 2005. – Vol. 208. – P. 261–286.

Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density / J. Hackenberg, M. Wassenberg, H. Spiecker, D. Sun // Forests. – 2015. – Vol. 6. – P. 1274–1300.

Non-destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency / T. C. Mai, S. Razafindratsima, Z. M. Sbartai [et al.] // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 77. – P. 213–217.

Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method / X. Wang, R. J. Ross, M. McClellan [et al.] // Wood and Fiber Science. – 2001. – Vol. 33. – P. 522–533.

Nondestructive evaluation of wood. General Technical Report FPL-GTR-238. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. – 169 p.

Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation / L. Schimleck, J. Dahlen, L. A. Apiolaza [et al.] // Forests. – 2019. – Vol. 10. – Art. 728.

Nondestructive measurement of paprika (*Capsicum annuum* L.) internal electrical conductivity and its relation to environmental factors / H. J. Park, J. H. Park, K. S. Park [et al.] // Horticultural Science & Technology. – 2018. – Vol. 36. – No. 5. – P. 69–70.

Nondestructive testing and evaluation of wood: a worldwide research update / B. K. Brashaw, V. Bucur, F. Divos [et al.] // Forest Products Journal. – 2009. – Vol. 59 (3). – P. 7–14.

Notivol, E. A method for estimating wood density in standing trees and its variability in *Pinus pinaster* / E. Notivol, L. A. Gil, J. A. Pardos // Investigacion Agraria Sistemas y Recursos Forestales. – 1992. – Vol. 1. – P. 41–47.

Nutto, L. Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction-using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood / L. Nutto, T. Biechele // Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-239. U.S. Department of Agriculture,

Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2015. – P. 154–161.

Oliveira, J. T. Assessing specific gravity of young *Eucalyptus* plantation trees using a resistance drilling technique / J. T. Oliveira, X. Wang, G. B. Vidaurre // *Holzforschung*. – 2017. – Vol. 71, No. 2. – P. 137–145.

Ostrovsky, R. Extensively damaged trees tested with acoustic tomography considering tree stability in urban greenery / R. Ostrovsky, M. Kobza, J. Gazo // *Trees*. – 2017. – Vol. 31. – P. 1015–1023.

Ovington, J. D. The growth and composition of natural stands of birch. 1. Dry-matter production / J. D. Ovington, H. A. I. Madgwick // *Plant and Soil*. – 1959. – Vol. 10. – No. 3. – P. 271–283.

Pandey, S. Climatic influence on tree wood anatomy: a review / S. Pandey // *Journal of Wood Science*. – 2021. – Vol. 67. – P. 24–31.

Pâques, L. E. Ranking larch genotypes with the Rigidimeter: relationships between modulus of elasticity of standing trees and of sawn timber / L. E. Pâques, P. Rozenberg // *Annals of Forest Science*. – 2009. – Vol. 66. – No. 4. – P. 1–7.

Paradis, N. Using a standing-tree acoustic tool to identify forest stands for the production of mechanically-graded lumber / N. Paradis, A. Auty, P. A. Carter // *Sensors*. – 2013. – Vol. 13. – P. 3394–3408.

Park, C. Y. Evaluation of specific gravity in post member by drilling resistance test / C. Y. Park, S. J. Kim, J. J. Lee // *Mokchae Konghak*. – 2006. – Vol. 34. – P. 1–9.

Parkinson, K. J. Bioelectric potentials in plants. Doctoral thesis / K. J. Parkinson. – Durham : Durham University, 1963. – 371 p.

Persson, A. Studies on the basic density in mother trees and progenies of pine / A. Persson // *Studia Forestalia Suecica*. – 1972. – Vol. 96. – P. 1–37.

Pfeifer, N. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data / N. Pfeifer, B. Gorte, D. Winterhalder // *Proceedings of the 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12–23 July 2004*. – P. 114–119.

Physical and Mechanical Characterization of Roots / N. M. O. Cavalcanti, C. Bertoldo, J. P. O. Ferreira, R. Gonçalves. General Technical Report FPL-GTR-249 // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 252–256.

Pilodyn repeatability study / T. Adams, S. Aitken, L. Balduman, N. Schermann // *Pacific Northwest Tree Improvement Research Cooperative Annual Report*, Oregon State University, Corvallis. – 1993. – P. 29–35.

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 / H. Polge. – Nancy : Université de Nancy, 1966. – 206 p.

Polge, M. Première appréciation de la qualité du bois en forgé par utilisation d'un torsiomètre / M. Polge, R. Keller // *Annals of Forest Science*. – 1970. – Vol. 27. – No. 2. – P. 197–223.

Predicting oven-dry density of Sugi (*Cryptomeria japonica*) using near infrared (NIR) spectroscopy and its effect on performance of wood moisture meter / K. Watanabe, I. Kobayashi, N. Kuroda [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2012. – Vol. 58. – P. 383–390.

Predicting structural timber grade-determining properties using acoustic and density measurements on young Sitka spruce trees and logs / K. Simic, V. Gendvilas, C. O'Reilly, A. M. Harte // *Holzforschung*. – 2019. – Vol. 73. – P. 139–149.

Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species / D. Blanchette, R. A. Fournier, J. E. Luther, J.-F. Côté // *Forest Ecology and Management*. – 2015. – Vol. 347. – P. 116–129.

Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data / J. E. Luther, R. Skinner, R. A. Fournier [et al.] // *Forestry*. – 2014. – Vol. 87. – P. 313–326.

Prediction of the mechanical properties of lumber by stress-wave velocity and Pilodyn penetration of 36-year-old Japanese larch trees / F. Ishiguri, R. Matsui, K. Iizuka [et al.] // *Holz als Roh- und Werkstoff*. – 2008. – Vol. 66. – P. 275–280.

Prediction of wood properties in trees from parameters obtained non-destructively in nursery seedlings / R. G. M. Lorensani, R. Gonçalves, E. Merlo [et al.] // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 377–385.

Prediction of wood quality in small-diameter Douglas-fir using site and stand characteristics / C. D. Morrow, T. M. Gorman, J. W. Evans [et al.] // *Wood and Fiber Science*. – 2013. – Vol. 5, No. 1. – P. 49–61.

Pressler, M. R. Der forstliche Zuwachsbohrer neuester Construction und dessen praktische Bedeutung und Anwendung für die forstliche Forschungs-, Taxations-, Pflege- und Nutzungs-Technik / M. R. Pressler // *Tharander Jahrbuch*. – 1866. – Vol. 17, No. 3. – P. 113–209.

Proceedings of 10th European Conference on Non-Destructive Testing, 2010 (ECNDT). Moscow, Russia 7-11 June 2010. Volume 1 of 5. NY : Curran Associates, Inc., 2011. – 29 p.

Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249 / X. Wang, C. A. Senalik, R. J. Ross [et al.]. – Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – 539 p.

Properties of eucalyptus wood hybrids and charcoal at three ages / V. C. Soares, M. L. Bianchi, P. F. Trugilho [et al.] // Cerne. – 2015. – Vol. 21. – P. 191–197.

Proto, A. R. Nuovi strumenti al servizio delle utilizzazioni forestali (New tools for forest utilization) / A. R. Proto, G. Zimbalatti, B. Bernardi // Proceedings of the “II International Congress of Silviculture”. Florence (Italy) 26–29 Nov. 2014. Italian Academy of Forest Sciences, Florence. – 2014. – P. 1107–1112.

Quantitative detection of internal decay degree for standing trees based on three NDT methods – electric resistance tomography, stress wave imaging and resistograph techniques / X. Yue, L. Wang, X. Ge, X. Wang // Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 167–179.

Radial variation in wood specific gravity, fibre length and vessel area for two Central American hardwoods: *Hyeronima alchorneoides* and *Vochysia guatemalensis*: natural and plantation-grown trees / R. P. Butterfield, R. P. Crook, R. Adams, R. Morris // IAWA Journal. – 1993. – Vol. 14. – P. 153–161.

Radial variation of basic density in *Pinus patula* Schltdl. et Cham. in three locations from Hidalgo state / J. R. G. Télles, A. V. Martínez, A. B. de la Rosa [et al.] // Revista Mexicana de Ciencias Forestales. – 2011. – Vol. 2, No. 7. – P. 71–78.

Radial variation of fiber dimensions, annual ring width, and wood density from natural and plantation trees of alder (*Alnus glutinosa*) wood / M. Kiaei, H. R. Naji, H. Abdul-Hamid, M. Farsi // Wood Research. – 2016. – Vol. 61. – Iss. 1. – P. 55–64.

Rapid measurement of trunk MOE on standing trees using RIGIDIMETER / J. Launay, M. Ivkovich, L. Pâques [et al.] // Annals of Forest Science. – 2002. – Vol. 59. – P. 465–469.

Razafindratsima, S. Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content / S. Razafindratsima, Z. M. Sbartai, F. Demontoux // *Wood Science and Technology*. – 2017. – Vol. 51. – P. 1421–1431.

Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species / J. Chave, H. C. Muller-Landau, T. R. Baker [et al.] // *Ecological Applications*. – 2006. – Vol. 16. – Iss. 6. – P. 2356–2367.

Relationship between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees / C. R. Mora, L. R. Schimleck, F. Isik [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2009. – Vol. 39. – P. 1421–1429.

Relationship between wood moisture content and drilling resistance in eucalypt trees / J. T. Silva Oliveira, X. Wang, G. B. Vidaurre, B. P. Rodrigues // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 154–166.

Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection / X. Wu, G. Li, Z. Jiao, X. Wang // *Applications in Plant Sciences*. – 2018. – Vol. 6. – Art. e1187.

Rinn, F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection / F. Rinn // *Holztechnologie*. – 2012. – Vol. 53. – P. 24–29.

Rinn, F. Basics of typical resistance-drilling profiles / F. Rinn // *Western Arborist*. – 2012. – Vol. 17. – P. 30–36.

Rinn, F. Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung / F. Rinn // *Holz-Zentralblatt*. – 1989. – Vol. 34. – P. 529–530.

Rinn, F. Key result of sonic tree tomography / F. Rinn // *Western Arborist*. – 2017. – P. 43–47.

Rinn, F. RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood : comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different species / F. Rinn, F. H. Schweingruber, E. Schär // *Holzforschung*. – 1996. – Vol. 50. – P. 303–311.

Root system investigation in sclerophyllous vegetation: an overview / G. Sanesi, R. Laforteza, G. Colangelo [et al.] // *Italian Journal of Agronomy*. – 2013. – Vol. 8. – P. 121–126.

Roque, R. M. Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate / R. M. Roque, M. T. Fo // *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. – 2007. – Vol. 16. – Iss. 3. – P. 267–276.

Rozenberg, P. Genetic variation of the Pilodyn-girth relationship in Norway pine spruce (*Picea abies* L. (Karst)) / P. Rozenberg, H. Van de Sype // *Annals of Forest Science*. – 1996. – Vol. 53. – P. 1153–1166.

Ruggirello, M. Nondestructive testing of ponderosa pine wood quality influence of stand and tree-level variables on acoustic velocity and wood density / M. Ruggirello. – Flagstaff : Northern Arizona University, 2017. – 36 p.

Rungwattana, K. Radial variation of wood functional traits reflect size-related adaptations of tree mechanics and hydraulics / K. Rungwattana, P. Hietz // *Functional Ecology*. – 2018. – Vol. 32. – P. 260–272.

Saikku, O. The effect of fertilization on the basic density of Scots pine (*Pinus silvestris* L.). A densitometric study on the X ray chart curves of wood / O. Saikku // *Communicationes Instituti forestalis Fenniae*. – 1975. – Vol. 85. – No. 3. – P. 1–49.

Sandoz, J.-L. Timber grading machine using ultrasonic and density measurements: Triomatic / J.-L. Sandoz, Y. Benoit // *15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Duluth, MN. – 2007. – P. 10–12.

Sandoz, J.-L. Wood testing using acousto-ultrasonic / J.-L. Sandoz, Y. Benoit, L. Demay // *12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. – 2000. – P. 97–104.

Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk / D. Gibert, J. Le Mouel, L. Lambs [et al.] // *Plant Science*. – 2006. – Vol. 171. – P. 752–584.

Saranpää, P. Wood density and growth / P. Saranpää // *Wood quality and its biological basis*. – 2003. – P. 87–117.

Saucier, R. Regional variation in specific gravity of seven pines in the Southern United States. USDA Forest Service Research Paper SE-45 / R. Saucier, M. A. Taras/ – Asheville, N.C. : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1969. – 16 p.

Savill, P. S. The influence of early respacing on the wood density of Sitka spruce / P. S. Savill, A. J. Sandels // *Forestry*. – 1983. – Vol. 65, No. 2. – P. 109–120.

Schajer, G. S. Lumber strength grading using X-ray scanning / G. S. Schajer // *Forest Products Journal*. – 2001. – Vol. 51. – P. 43–50.

Schajer, G. S. Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves / G. S. Schajer, F. B. Orhan // *Holz als Roh- und Werkstoff*. – 2006. – Vol. 64. – P. 483–490.

Schermann, N. Étude des paramètres génétiques de trois populations de Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), analyse d'un diallele 16'16, conséquences pour la stratégie d'amélioration génétique de l'espèce / N. Schermann. – Orléans : INRA Orléans, 1994. – 117 p.

Schweingruber, E. H. Dendroökologische Holzanatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie / E. H. Schweingruber. – Berne : Paul Haupt Verlag, 2001. – 472 p.

Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities / B. Šilinskas, I. Varnagiryte-Kabašinskiene, M. Aleinikovas [et al.] // Forests. – 2020. – Vol. 11 (5). – Art. 587.

Scots pine stem parameters in sites with different stand densities in Lithuania / L. Beniušienė, B. Šilinskas, R. Beniušis [et al.] // Forests. – 2020. – Vol. 11 (7). – Art. 716.

Searles, G. Measurement of wood stiffness in standing trees and logs: implications for end-product quality / G. Searles, J. Moore // Proceedings of the COST E53 Meeting «Quality Control for Wood and Wood Products». Bled (Slovenia) 21–23 Apr. 2009. Holyrood, Edinburgh, UK. – 2009. – P. 1–5.

Seeing the woods through the saplings: using wood density to assess the recovery of human-modified Amazonian forests / E. Berenguer, T. A. Gardner, J. Ferreira [et al.] // Journal of Ecology. – 2018. – Vol. 106 (6). – P. 2190–2203.

Selection efficiency for solid wood traits in *Pinus taeda* using time-of-flight acoustic and micro-drill resistance methods / J. T. Eckard, F. Isik, B. Bullock [et al.] // Forest Science. – 2010. – Vol. 56. – P. 233–241.

Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships / T. Wang, S. N. Aitken, P. Rozenberg, M. R. Carlson // Canadian Journal of Forest Research. – 1999. – Vol. 29. – P. 434–445.

Selection of wood density and diameter in controlled crosses of coastal Douglas-fir / J. N. King, F. C. Yeh, J. C. Heaman, B. P. Dancik // Silvae Genet. – 1988. – Vol. 37. – P. 152–157.

Shepard, K. R. Specific gravity and mechanical property-age relationships in red pine / K. R. Shepard, J. E. Shottafer // Forest Products Journal. – 1992. – Vol. 42. – Iss. 7/8. – P. 60–66.

Shipley, B. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts / B. Shipley, T.-T. Vu // New Phytologist. – 2002. – Vol. 153. – P. 359–364.

Shupe, T. F. Calibration of moisture meters for southern hardwoods / T. F. Shupe, Q. Wu, I. D. Hartley // *Forest Products Journal*. – 2002. – Vol. 52, No. 718. – P. 59–62.

Simplified methods to inventory the current annual increment of forest standing volume / P. A. Marziliano, G. Menguzzato, A. Scuderi, P. Corona // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. – 2012. – Vol. 5. – P. 276–282.

Sinn, G. A contribution of the proper assessment of the strength and stability of trees / G. Sinn, L. Wessolly // *Arboricultural Journal*. – 1989. – Vol. 13. – P. 45–65.

Smith, D. M. Measurement of sap flow in plant stems / D. M. Smith, S. J. Allen // *Journal of Experimental Botany*. – 1996. – Vol. 47. – P. 1833–1844.

Smith, K. T. Cambial and internal resistance of red spruce trees in eight diverse stands in the northeastern United States / K. T. Smith, W. D. Ostrofsky // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1993. – Vol. 23. – P. 322–326.

Smith, S. M. Correcting Pilodyn measurement of Douglas-fir for different moisture levels / S. M. Smith, J. J. Morrell // *Forest Products Journal*. – 1986. – Vol. 36. – P. 45–46.

Solid wood quality prediction capacity with acoustic methods in young trees / E. M. Sánchez, G. Caballé, R. Gonçalves [et al.] // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. General Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 395–401.

Sousa, V. B. Age trends and within-site effects in wood density and radial growth in *Quercus faginea* mature trees / V. B. Sousa, J. L. Louzada, H. Pereira // *Forest Systems*. – 2016. – Vol. 25. – No. 1. – Art. e053.

Spatial variation and mechanisms of leaf water content in grassland plants at the biome scale: evidence from three comparative transects / R. Wang, N. He, S. Li [et al.] // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – Art. 9281.

Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions / P. R. G. Hein, G. Chaix, B. Clair [et al.] // *Trees*. – 2016. – Vol. 30. – P. 871–882.

Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves / D. Vile, E. Garnier, B. Shipley [et al.] // *Annals of Botany*. – 2005. – Vol. 96. – P. 1129–1136.

Stem growth rhythms in trees of a tropical rainforest in Southern Brazil / C. Y. Shimamoto, P. C. Botosso, E. Amano, M. C. M. Marques // *Trees*. – 2016. – Vol. 30. – P. 99–111.

St-Germain, J.-L. Latitudinal variation in tree-ring and wood cell characteristics of *Picea mariana* across the continuous boreal forest in Quebec / J.-L. St-Germain, C. Krause // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2008. – Vol. 38. – No. 6. – P. 1397–1405.

Stress wave sorting of red maple logs for structural quality / X. Wang, R. J. Ross, D. W. Green [et al.] // *Wood Science and Technology*. – 2004. – Vol. 37. – P. 531–537.

Swenson, N. G. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community – wide variation across latitude and elevation / N. G. Swenson, B. J. Enquist // *American Journal of Botany*. – 2007. – Vol. 94. – No. 3. – P. 451–459.

Swenson, N. G. The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area / N. G. Swenson, B. Enquist // *American Journal of Botany*. – 2008. – Vol. 95. – P. 516–519.

Tackenberg, O. A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis / O. Tackenberg // *Annals of Botany*. – 2007. – Vol. 99. – P. 777–783.

Taki, S. Method for estimation of stem carbon fixation of Japanese black pine by combining stem analysis and soft X-ray densitometry / S. Taki, Y. Nobori, M. L. L. Caceres // *Journal of Forest Research*. – 2014. – Vol. 19. – No. 1. – P. 226–232.

Tang, D. Y. P. Plant traits demonstrate that temperate and tropical giant eucalypt forests are ecologically convergent with rainforest not savanna / D. Y. P. Tang, G. J. Jordan, D. M. J. S. Bowman // *PLoS ONE*. – 2013. – Vol. 8. – Art. e84378.

Taras, M. A. Wood density surveys of the minor species of yellow pine in the Eastern United States. I. Spruce pine (*Pinus glabra* Walt.). USDA Forest Service research paper. SE-34 / M. A. Taras, J. R. Saucier. – Asheville, N.C. : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1968. – 15 p.

Tattar, T. A. Comparison of electrical resistance and impedance measurements in wood in progressive stages of discoloration and decay / T. A. Tattar, G. C. Saufley // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1973. – Vol. 3, No. 4. – P. 593–595.

Taylor, F. W. Rapid determination of southern pine specific gravity with a Pilodyn tester / F. W. Taylor // *Forest Science*. – 1981. – Vol. 27. – P. 59–61.

Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment / M. Dassot, A. Colin, P. Santenoise [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2012. – Vol. 89. – P. 86–93.

The effect of moisture content on nondestructive probing measurements / D. F. Llana, E. Hermoso, S. T. Izquierdo [et al.] // *Proceedings: 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-239*. – 2015. – P. 187–191.

The effect of tree slenderness on wood properties in Scots pine. Part II: modulus of rupture and modulus of elasticity / A. Tomczak, T. Jelonek, M. Jakubowski, W. Pazdrowski // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. – 2016. – Vol. 96. – P. 188–194.

The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species / L. Poorter, I. McDonald, A. Alarcón [et al.] // *New Phytologist*. – 2010. – Vol. 185. – P. 481–492.

The potential of portable NIRS devices for rapid, nondestructive measurement of basic wood density on standing trees / E. M. Sánchez, J. P. Charpentier, V. Segura [et al.] // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-249*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017b. P. 351–359.

The practice of silviculture: Applied forest ecology / D. M. Smith, B. C. Larson, M. J. Kelty, P. M. S. Ashton. – 9th ed. – New York : John Wiley & Sons, 1997. – 537 p.

The relationship between wood density and mortality in a global tropical forest data set / N. J. Kraft, M. R. Metz, R. S. Condit, J. Chave // *New Phytol*. – 2010. – Vol. 188. – P. 1124–1136.

The role of wood density and stem support costs in the growth and mortality of tropical trees / D. A. King, S. J. Davies, S. Tan, N. S. M. Noor // *Journal of Ecology*. – 2006. – Vol. 94 (3). – P. 670–680.

Theoretical and Experimental Research on Moisture Content and Wood Property Indexes Based on Nondestructive Testing / L. Cheng, J. Dai, Z. Yang [et al.] // *BioResources*. – 2020. – Vol. 15 (1). – P. 1600–1616.

Thor, E. Relationships of some wood properties of shortleaf pine with radial growth and site factors / E. Thor, A. L. Bates // TAPPI. – 1970. – Vol. 53. – P. 290–294.

Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees / M. Thies, N. Pfeifer, D. Winterhalder, B. G. Gorte // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2004. – Vol. 19. – P. 571–581.

Todoroki, C. L. Validation of models predicting modulus of elasticity in Douglas-fir trees, boles, and logs / C. L. Todoroki, E. C. Lowell // New Zealand journal of forestry science. – 2016. – Vol. 46. – P. 1–13.

Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests / J. Chave, C. Andalo, S. Brown [et al.] // Oecologia. – 2005. – Vol. 145. – P. 87–99.

Tree growth traits and social status affect the wood density of pioneer species in secondary subtropical forest / L. Chen, W. Xiang, H. Wu [et al.] // Ecology and Evolution. – 2017. – Vol. 7. – P. 5366–5377.

Trejo, J. L. D. Using acoustic measurements and inventory data to estimate stiffness in standing Douglas-fir trees. M. Sc. Thesis / J. L. D. Trejo. – Corvallis : Oregon State University, 2015. – 35 p.

Trendelenburg, R. Das Holz als Rohstoff / R. Trendelenburg, H. Mayer-Wegelin. – München : Carl Hanser Verlag, 1955. – 541 p.

Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure / U. G. Hacke, J. S. Sperry, W. T. Pockman [et al.] // Oecologia. – 2001. – Vol. 126. – P. 457–461.

Trewavas, A. Aspects of plant intelligence / A. Trewavas // Annals of Botany. – 2003. – Vol. 92, No. 1. – P. 1–20.

TRY – a global database of plant traits / J. Kattge, S. Diaz, S. Lavorel [et al.] // Global Change Biology. – 2011. – Vol. 17. – P. 2905–2935.

TRY plant trait database – Enhanced coverage and open access // J. Kattge, G. Bönnich, S. Díaz [et al.] // Global Change Biology. – 2020. – Vol. 26. – P. 119–188.

Tsehaye, A. Within- and between-tree variations in the wood quality of radiata pine. Ph. D. Thesis / A. Tsehaye. – Christchurch : University of Canterbury, 1995. – 290 p.

Tsehaye, A. Sorting of logs using acoustics / A. Tsehaye, A. H. Buchanan, J. C. F. Walker // Wood Science and Technology. – 2000. – Vol. 34. – P. 337–344.

Tsoumis, G. Effect of growth conditions on wood quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.) / G. Tsoumis, N. Panagiotidis // Wood Science and Technology. – 1980. – Vol. 14. – P. 301–310.

Ultrasonic, electric, and radar measurements for living trees assessment / L. Sambuelli, L. V. Socco, A. Godio [et al.] // *Bulletin of Theoretical and Applied Geophysics*. – 2003. – Vol. 44. – P. 3–4.

Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens* / B. L. Greaves, N. M. G. Borralho, C. A. Raymond, A. Farrington // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1996. – Vol. 26. – P. 1643–1650.

Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States / J. R. Butnor, J. A. Doolittle, L. Kress [et al.] // *Tree Physiology*. – 2001. – Vol. 21. – P. 1269–1278.

Using Acoustic Sensors to Improve the Efficiency of the Forest Value Chain in Canada: A Case Study with Laminated Veneer Lumber / A. Achim, N. Paradis, P. Carter, R.E. Hernández // *Sensors*. – 2011. – Vol. 11. – P. 5716–5728.

Using acoustic tools to improve the efficiency of the forestry wood chain in eastern Canada / A. Achim, N. Paradis, A. Salenikovich, H. Power // *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products*' (4-7th May 2010, Edinburgh). The Final Conference of COST Action E53. – 2010. – P. 16–28.

Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China / L. Y. Fu, W. S. Zeng, S. Z. Tang [et al.] // *Journal of Forest Science*. – 2012. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 101–115.

Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data / B. T. Sagang, S. T. Momo, M. B. Libalah [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2018. – Vol. 424. – P. 519–528.

Usoltsev, V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia / V. A. Usoltsev // CD-monograph. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020с. – URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (дата обращения: 07.05.2023).

Utility of the Pilodyn in selection for mature wood specific gravity in loblolly pine / J. R. Sprague, J. T. Talbert, J. B. Jett, R. L. Bryant // *Forest Science*. – 1983. – Vol. 29, No. 4. – P. 696–701.

Vahey, D. W. Wood density and anatomical properties in suppressed-growth trees: Comparison of two methods / D. W. Vahey, J. Y. Zhu, C. T. Scott // *Wood and Fiber Science*. – 2007. – Vol. 39. – Iss. 3. – P. 462–471.

Variability in wood density and wood fibre characterization of woody species and their possible utility in Northeastern Mexico / H. G. Rodriguez, R. Maiti, A. Kumari [et al.] // *American Journal of Plant Sciences*. – 2016. – Vol. 7. – P. 1139–1150.

Variation and adaptation of leaf water content among species, communities, and biomes / R. Wang, N. He, S. Li [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2021. – Vol. 16 (12). – Art. 124038.

Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali / C. S. Montes, J. C. Weber, R. A. Garcia [et al.] // *Trees*. – 2017. – Vol. 31. – P. 833–849.

Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana / D. Yeboah, A. J. Burton, A. J. Storer, E. Opuni-Frimpong // *New Forests*. – 2014. – Vol. 45. – Iss. 1. – P. 35–52.

Veres, I. A. Wave propagation in a wooden bar / I. A. Veres, M. B. Sayir // *Ultrasonics*. – 2004. – Vol. 42, No. 1. – P. 495–499.

Vertical variations in wood basic density for two softwood species / A. Billard, R. Bauer, F. Mothe [et al.] // *European Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 140. – P. 1401–1416.

Vieira, J. Tree growth under climate change: Evidence from xylogenesis timings and kinetics / J. Vieira, A. Carvalho, F. Campelo // *Frontiers in Plant Science*. – 2020. – Vol. 11. – Art. 90.

Vihermaa, L. Influence of site factors and climate on timber properties of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) / L. Vihermaa. – Glasgow : University of Glasgow, 2010. – 372 p.

Villeneuve, M. Estimation of wood density in family tests of jack pine and black spruce using the Pilodyn tester / M. Villeneuve, E. K. Morgenstern, L. P. Sebastian // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1987. – Vol. 17. – P. 1147–1149.

Vincent, M. Variation in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood quality after thinning / M. Vincent, C. Krause, A. Koubaa // *Annals of Forest Science*. – 2011. – Vol. 68. – P. 1115–1125.

Vogt, U. K. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. / U. K. Vogt // *Journal of Experimental Botany*. – 2001. – Vol. 52. – P. 1527–1536.

Vyskot, M. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands / M. Vyskot. – Praha: Academia, 1981. – 397 p.

Waghorn, M. J. Influence of tree morphology, genetics, and initial stand density on outerwood modulus of elasticity of 17-year-old *Pinus ra-*

diata / M. J. Waghorn, M. S. Watt, E. G. Mason // Forest Ecology and Management. – 2007. – Vol. 244, No. 1–3. – P. 86–92.

Walker, J. C. F. Understanding corewood in some softwoods: a selective review on stiffness and acoustics / J. C. F. Walker, R. Nakada // International Forestry Review. – 1999. – Vol. 1 (4). – P. 251–259.

Wang, X. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. Acoustic wave behavior / X. Wang, R. J. Ross, P. Carter // Wood and Fiber Science. – 2007. – Vol. 39 (1). – P. 28–38.

Wang, X. Acoustic measurements on trees and logs: A review and analysis / X. Wang // Wood Science and Technology. – 2013. – Vol. 47. – P. 965–975.

Wang, X. Acoustic tomography for decay detection in black cherry trees / X. Wang, J. Wiedenbeck, S. Liang // Wood and Fiber Science. – 2009. – Vol. 41. – P. 127–137.

Wang, X. Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling / X. Wang, R. B. Allison // Arboriculture and Urban Forestry. – 2008. – Vol. 34. – P. 1–4.

Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study / J. P. Sparks, S. Gaylon, R. Campbell, A. Black // Oecologia. – 2001. – Vol. 127. – P. 468–475.

Water in the stems of sessile oak (*Quercus petraea*) assessed by computer tomography with concurrent measurements of sap velocity and ultrasound emission / A. Raschi, R. Tognetti, H. W. Ridder, C. Beres // Plant, Cell & Environment. – 1995. – Vol. 18. – P. 545–554.

Wayu, S. Evaluation of dry matter yield, yield components and nutritive value of selected alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars grown under Lowland Raya Valley, Northern Ethiopia / S. Wayu, T. Atspha // African Journal of Agricultural Research. – 2019. – Vol. 14 (15). – P. 705–711.

Wengert, G. Evaluation of electric moisture meters on kiln-dried lumber / G. Wengert, P. Bois // Forest Products Journal. – 1997. – Vol. 47. – No. 6. – P. 60–62.

Wessels, C. B. A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber / C. B. Wessels, F. S. Malan, T. Rypstra // European Journal of Forest Research. – 2011. – Vol. 130. – P. 881–893.

Westoby, M. Land-plant ecology on the basis of functional traits / M. Westoby, I. J. Wright // Trends in Ecology & Evolution. – 2006. – Vol. 21 (5). – P. 261–268.

What prevails in climatic response of *Pinus sylvestris* in-between its range limits in mountains: slope aspect or elevation? / D. F. Zhirnova,

L. V. Belokopytova, A. E. Barabantsova [et al.] // International Journal of Biometeorology. – 2020. – Vol. 64. – P. 333–344.

Wiemann, M. C. Geographic variation in wood specific gravity: effects of latitude, temperature and precipitation / M. C. Wiemann, G. B. Williamson // Wood and Fiber Science. – 2002. – Vol. 34, No. 1. – P. 96–107.

Williamson, G. B. Measuring wood specific gravity...Correctly / G. B. Williamson, M. C. Wiemann // American Journal of Botany. – 2010. – Vol. 97. – P. 519–524.

Wilson, P. J. Accuracy of a capacitance-type and three resistance-type pin meters for measuring wood moisture content / P. J. Wilson // Forest Products Journal. – 1999. – Vol. 49. – P. 29–32.

Wilson, P. J. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies / P. J. Wilson, K. Thompson, J. G. Hodgson // New Phytologist. – 1999. – Vol. 143 (1). – P. 155–162.

Within and between-tree variation of wood density components in *Pinus sylvestris* at five sites in Portugal / C. Fernandes, M. J. Gaspar, J. Pires [et al.] // European Journal of Wood and Wood Products. – 2017. – Vol. 75. – P. 511–526.

Wood anatomy and wood density in shrubs: responses to varying aridity along transcontinental transects / H. I. Martínez-Cabrera, C. S. Jones, S. Espino, H. J. Schenk // American Journal of Botany. – 2009. – Vol. 96. – P. 1388–1398.

Wood basic density for 125 tree forest species from the French forests / J.-M. Leban, B. Kerfriden, P. Jacquin [et al.]. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.15454/XFOPL1> (дата обращения: 07.05.2023).

Wood densities of tropical tree species. General Technical Report SO-88/ G. Reyes, S. Brown, J. Chapman, A. E. Lugo. – New Orleans : USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1992. – 15 p.

Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia / E. M. Nogueira, P. M. Fearnside, B. W. Nelson, M. B. França // Forest Ecology and Management. – 2007. – Vol. 248. – P. 119–135.

Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 / H. Pretzsch, P. Biber, G. Schütze [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2018. – Vol. 429. – P. 589–616.

Wood Quality Characterization of Sycamore Maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and its Utilization in Wood Products Industries / T. Sedlar, B. Šefc, S. Stojnić, T. Sinković // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2021. – Vol. 42 (3). – P. 543–560.

Woodcock, D. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree / D. Woodcock, A. Shier // *Trees*. – 2002. – Vol. 16. – P. 437–443.

Wylie, R. R. M. Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario / R. R. M. Wylie, M. E. Woods, J. P. Dech // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – Art. 2022.

Xu, H. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees / H. Xu, N. Gossett, B. Chen // *ACM Transactions on Graphics*. – 2007. – Vol. 26 (4). – P. 1–19.

Yanchuk, A. D. Genetic variation in growth and wood specific gravity and its utility in the improvement of interior spruce in British Columbia / A. D. Yanchuk, G. K. Kiss // *Silvae Genetica*. – 1993. – Vol. 42. – P. 141–148.

Yang, J.-L. Relationships between static and dynamic modulus of elasticity for a mixture of clear and decayed eucalypt wood / J.-L. Yang, J. Ilic, T. Wardlaw // *Australian Forestry*. – 2003. – Vol. 66, No. 3. – P. 193–196.

Yang, K. C. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana* / K. C. Yang, G. Hazenberg // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2011. – Vol. 24. – Iss. 5. – P. 996–1007.

Yang, K.-C. Impact of spacing on juvenile wood and mature wood properties of white spruce (*Picea glauca*) / K.-C. Yang // *Taiwan Lin Ye Ke Xue*. – 2002. – Vol. 17. – Iss. 1. – P. 13–29.

Zeng, W. S. Developing tree biomass models for eight major tree species in China / W. S. Zeng // *Biomass volume estimation and valorization for energy*. Chapter 1. Intech Publ., 2017. – P. 3–21.

Zeng, W. S. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China / W. S. Zeng, H. R. Zhang, S. Z. Tang // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2011. – Vol. 41. – Iss. 7. – P. 1547–1554.

Zhang, H. Application of a drill resistance technique for rapid determining wood density. Progress of machining technology / H. Zhang, Z. Guo, J. Su // *Key Engineering Materials*. – 2009. – Vol. 407–408. – P. 494–499.

Zhang, H. Ultrasonic method for evaluating wood quality of poplar seedlings / H. Zhang, D. Feng, X. Wang // *Proceedings: 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. General

Technical Report FPL-GTR-249. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – P. 360–369.

Zhang, S. Y. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories / S. Y. Zhang // Wood Science and Technology. – 1995. – Vol. 29. – P. 451–465.

Zobel, B. J. Genetic controls in wood formation / B. J. Zobel, J. B. Jett // Genetics of Wood Production. – Berlin : Springer-Verlag, 1995. – P. 26–49.

Zobel, B. J. Wood variation, its causes and control / B. J. Zobel, J. P. van Buijtenen. – Berlin : Springer-Verlag, 1989. – 363 p.

Нормативная литература

ГОСТ 16483.7–71. Древесина. Методы определения влажности. – Введен 1973.01.01. – Москва : Стандартиформ, 2006. – 4 с.

ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введен 1980.07.01. – Москва : Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.

ГОСТ 23829–85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. – Введен 1987.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.

ГОСТ 26266–90. Преобразователи ультразвуковые. – Введен 1991.01.01. – Москва : Издательство стандартов, 1998. – 16 с.

Научное издание

Усольцев Владимир Андреевич
Цепордей Иван Степанович

**КВАЛИМЕТРИЯ ФИТОМАССЫ
ЛЕСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ.
МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ,
БАЗА ДАННЫХ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

ISBN 978-5-94984-891-3



Редактор Л. Д. Черных
Оператор компьютерной верстки О. А. Казанцева

Подписано в печать 20.11.2023. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Цифровая печать.

Уч.-изд. л. 10,51. Усл.-печ. л. 10,69.

Тираж 500 экз. (1-й завод 30 экз.).

Заказ № 7779

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».

620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Редакционно-издательский отдел. Тел.: 8(343) 221-21-44.

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УПИ».

620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2.

Тел.: 8(343)362-91-16.