

Леса России и хозяйство в них. 2021. № 3. С. 15–24.

Forests of Russia and economy in them. 2021. № 3. P. 15–24.

Аналитический обзор

УДК 630*52:630*174.754+303.732

doi: 10.51318/FRET.2021.30.50.002

О ПРОБЛЕМАТИКЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОМАССЫ ЛЕСОВ ЕВРАЗИИ

Иван Степанович Цепордей¹, Владимир Андреевич Усольцев²

^{1,2} Ботанический сад Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия,

² Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

¹ ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

² Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Аннотация. Нарастающие катастрофические сценарии последствий глобального потепления определяют актуальность оценки углероддепонирующей способности планетарной растительности. Поэтому исследование структуры и квалиметрии биомассы древесных и кустарниковых растений имеет важное значение. Проанализировано несколько методов неразрушающего контроля древесины, каждый из которых имеет свои ограничения, и представленный краткий их анализ может способствовать выбору варианта, наиболее пригодного для того или иного метода неразрушающего контроля. Дан анализ состояния проблемы квалиметрической оценки фитомассы деревьев как сырья в промышленном производстве, так и в селекционных программах. Показаны возможности квалиметрической оценки древесины путем лазерного зондирования. Бортовое и наземное лазерное сканирование дает с высокой точностью характеристики структуры дерева и древостоя, которые связаны с плотностью древесины. Разработка картографических продуктов по географическим градиентам в сочетании с возможностями дистанционного зондирования локальных структурных показателей древостоев обеспечивает поддержку мелкомасштабного картографирования плотности древесины. Дана характеристика впервые составленной базы данных о квалиметрии биомассы лесообразующих пород центральной Евразии и показаны перспективы ее использования.

Ключевые слова: неразрушающий контроль качества древесины, плотность древесины, трахеидная структура, угол микроволокон, регрессионный анализ, лазерное зондирование.

Analytical review

ON THE PROBLEMS OF STUDYING FOREST BIOMASS QUALIMETRY IN EURASIA

Ivan S. Tsepordey¹, Vladimir A. Usoltsev²

^{1,2} Botanical Garden of Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia,

² Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia,

¹ ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/>

² Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/>

Abstract: The increasing catastrophic scenarios of the consequences of global warming determine the relevance of the assessment of the carbon-depositing ability of planetary vegetation. Therefore, the study of the structure and qualimetry of the biomass of woody and shrubby plants is important. Several methods of non-destructive testing of wood are analyzed, each of which has its own limitations, and the presented brief analysis of them can contribute to the choice of the option most suitable for a particular method of non-destructive testing. The analysis of the state of the problem of the qualimetric assessment of the tree phytomass as raw materials in industrial production and in breeding programs is given. The possibilities of qualimetric assessment of wood by laser sensing are shown. Airborne and ground-based laser scanning provides high-accuracy characteristics of the structure of the tree and the stand, which are related to the density of the wood. The development of cartographic products based on geographical gradients, combined with remote sensing capabilities of local structural indicators of stands, provides support for small-scale mapping of wood density. The characteristic of the first compiled database on the qualimetry of the biomass of forest-forming species of central Eurasia is given and the prospects for its use are shown.

Keywords: non-destructive control of wood quality, wood density, tracheal structure, angle of microfibrils, regression analysis, laser sensing

Введение

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. 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 направле-

ния, научные ориентиры-маяки, ускоряющие прогресс в той или иной области знаний при минимизации потерь от дублирования и следования тривиальной методологии проб и ошибок.

О методах неразрушающего контроля качества древесины

Прогнозируемые изменения климата, вызванные выбросами парниковых газов, изменяют ландшафтные и экологические условия, увеличивают нестабильность во многих экосистемах и повышают глобальную роль лесного покрова [1]. В условиях непрерывно возрастающей биосферной роли лесов становится всё более актуальной оцен-

ка их биологической продуктивности и углероддепонирующей способности. При изучении биологической продуктивности лесов и разработке нормативов учета всех компонентов биомассы 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 биомассы деревьев.

Для оптимального использования наших лесных ресурсов необходимы детальные знания об изменениях квалиметрических показателей лесной биомассы и их влиянии на стоимость

конечного продукта. Например, результаты исследования квалитметрии стволов тонкомерных древостоев сосны желтой в северных районах штата Аризона (США) позволили существенно повысить их потребительную стоимость [2]. 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 [3]. Однако любая техника имеет свои ограничения, и важно суметь выбрать технику, наиболее пригодную для того или иного применения [4].

Использование возрастного бурава для взятия кернов древесины у растущих деревьев получило развитие в Германии в середине XIX столетия [5]. Метод имел целью определение прироста ствола без его спиливания и получил широкое распространение в дендрохронологии [6, 7], а создание безвинтового бурава расширило возможности его применения [8]. 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 [9]. 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 её плотность, угол микроволокон целлюлозы и модули упругости и разрыва, являются наиболее важными механическими характеристиками древесины [10] и наиболее значимы при селекции деревьев, направленной на улучшение качества конечного продукта [11]. Однако традиционные измерения этих характеристик являются либо дорогостоящими, либо разрушающими объект, и необходима разработка методов быстрого сканирования растущих деревьев [12]. 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 высокий углом микроволокон и более низким модулем упругости, что привело к снижению стоимости конечных продуктов [13].

К неразрушающим относится пилонин-метод [14] как один из наиболее простых и доступных. Он востребован в селекционных программах, однако отбор по показателю плотности, получаемому пилонин-тестером, оказался эффективным не для всех древесных видов, а изменчивость плотности, объясняемая этим методом, варьирует в диапазоне от 27 до 92 %. Квалитметрия методом сопротивления бурению

древесины на базе резистографа [15], как более чувствительного прибора по сравнению с пилонин-тестером, также нашла широкое применение в селекционных программах, но оба метода основаны на локальном зондировании, и его экстраполяция на всё дерево дает смещение оценок. Применение ригидометр-конструкции [16] лишено недостатка, присущего двум вышеупомянутым методам. Однако метод оказался слишком трудоемким и исключаяющим возможность выполнения множественных замеров при реализации селекционных программ [17].

Акустический метод оценки плотности древесины и модуля упругости [18] является чувствительным к наличию пороков древесины и позволяет снять противоречие двух целевых установок селекции, направленных одновременно на повышение скорости роста и плотности древесины. Радиационные методы [19] успешно регистрируют внутрикольцевую плотность, но требуют применения дорогого оборудования. Преимущество технологии ближнего инфракрасного спектра [4] перед всеми остальными методами состоит в возможности оценивать химию 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 [20].

Таким образом, любая техника имеет свои ограничения, и представленный краткий её анализ может способствовать выбору варианта, наиболее пригодного для того или иного метода неразрушающего контроля.

Состояние проблемы квалиметрических исследований биомассы лесов

В основу лесной таксации как науки первоначально была заложена стереометрическая парадигма оценки объема ствола как тела вращения линии сбега 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 биомассы [21–23].

Наиболее важными квалиметрическими свойствами древесины при использовании в цельном виде и в целлюлозно-бумажном производстве являются плотность, угол микроволокон, доля ранней древесины, размер трахеид, содержание целлюлозы и модуль упругости [24]. Из них наиболее важным показателем является базисная (условная) плотность древесины, в той или иной степени коррелирующая с остальными квалиметрическими показателями [25].

Базисная плотность признается наиболее значимым квалиметрическим свойством древесины и является функцией трахеидной структуры. У хвойных видов размер и расположение трахеид определяют свойства древесины и качество целлюлозы. Морфология трахеид определяет физические свойства древесины и влияет на ее гибкость, пластичность и устойчивость. Базисная плотность признана одной из важнейших составляющих механической устойчивости к деформации под действием приложенной нагрузки, которая определяется размером клетки и толщиной ее стенки. Она играет важную роль в управлении лесами, в экологии сообществ и оценке региональных углеродных циклов [26]. Согласно Г. Эллиоту [27], плотность древесины отражает комплексный эффект нескольких ростовых и физиологических переменных, объединенных этой относительно легко измеряемой характеристикой древесины.

Очевидно, что качество и количество древесины не могут рассматриваться как независимые факторы. Улучшение качества древесины стало неотъемлемой частью большинства селекционных программ, и плотность древесины является идеальным объектом для генетических экспериментов [28]. Среди всех проанализированных компонентов ранневесенние кольца выявили самый высокий и стабильный генетический контроль, не показав неблагоприятной генетической корреляции по отношению к другим компонен-

там. Поэтому плотность ранневесенних колец рекомендована как наиболее подходящий признак для включения в будущие селекционные программы [29].

Географически и филогенетически обусловленное варьирование плотности древесины было рассмотрено в рамках ее эволюционной экологии с использованием базы данных как для голосеменных, так и для покрытосеменных растений. Построено филогенетическое «супер-дерево», 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 таковыми в тропических низинных сообществах, где преобладали покрытосеменные. Последнее предполагает увеличение плотности древесины в зависимости от широты и высоты местности. Тем самым подтверждена идея о том, 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 [30].

Бортовое и наземное лазерное сканирование обеспечивает широкий спектр характеристик древостоев для целей моделирования. Это было продемонстрировано с предсказанием свойств древесных волокон на уровне пробных площадей с использованием данных как бортового [31],

так и наземного лазерного зондирования [32]. 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 [33]. Наземное лазерное сканирование дает с высокой точностью характеристики структуры дерева и древостоя, которые связаны с плотностью древесины [34]. Установление статистических связей между структурными характеристиками, полученными путем наземного лазерного сканирования и наземного определения плотности древесины, явилось важным шагом в определении 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 [32].

База данных о квалиметрии биомассы лесов центральной Евразии

Степень достигнутого прогресса в изучении биологической продуктивности лесов, в том числе ее квалиметрической составляющей, определяется фактологическим состоянием вопроса,

т. е. обеспеченностью фактическими данными о квалиметрических характеристиках фитомассы по полным видовому и экологическому спектрам. 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 [35]. Она состоит из двух разделов. В первом разделе 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 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.

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 [36]. Плотность компонентов биомассы наряду с количественными показателя-

ми биомассы и чистой первичной продукции входит в понятие биологической продуктивности лесного покрова планеты как «наиболее надежного источника пропитания всё возрастающего населения» [37, с. 110]. В связи с проблемой изменения климата количественные и квалиметрические показатели лесной биомассы стали необходимы для корректной оценки углеродного цикла в земной биосфере [38]. 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.

Выводы

1. Для оптимального использования наших лесных ресурсов необходимы детальные знания об изменениях квалиметрических показателей лесной биомассы и их влиянии на стоимость конечного продукта. Любая техника неразрушающего контроля древесины имеет свои ограничения, и представленный краткий её анализ может способствовать выбору варианта, наиболее пригодного для того или иного метода неразрушающего контроля.

2. Базисная плотность признается наиболее значимым квалиметрическим свойством древесины и является функцией трахеидной структуры. Улучшение качества древесины стало

неотъемлемой частью большинства селекционных программ, и плотность древесины является идеальным объектом для генетических экспериментов.

3. Бортовое и наземное лазерное сканирование обеспечивает широкий спектр характеристик древостоев для целей моделирования. Наземное лазерное сканирование дает с высокой точностью характеристики структуры

деревя и древостоя, которые связаны с плотностью древесины. Разработка картографических продуктов по географическим градиентам в сочетании с возможностями дистанционного зондирования локальных структурных показателей древостоев обеспечивает поддержку мелкомасштабного картографирования плотности древесины.

4. Сформированная база данных предоставляет возможность картирования и выявления закономерностей изменения квалитетических показателей в климатических градиентах центральной Евразии и может быть востребована в будущем лесоустройстве, оценке углеродного пула лесов и перспективных селекционных программах России.

Список источников

1. Malavasi U. C., Davis A. S., Malavasi M. M. Estimating water in living woody stems – a review // *Cerne*. 2016. Vol. 22. No. 4. P. 415–422. DOI: 10.1590/01047760201622032169
2. Ruggirello M. Nondestructive testing of ponderosa pine wood quality influence of stand and tree-level variables on acoustic velocity and wood density / Submitted to the Faculty of the Northern Arizona University School of Forestry in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Forestry, 2017. 36 p.
3. Allison R. B. Development of bioacoustic nondestructive testing instruments for early detection of bark beetle infestation / Wang X., Senalik C. A., Ross R. J. (eds.). 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. 264–269.
4. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation / L. Schimleck, J. Dahlen, L. A. Apiolaza, G. Downes, G. Emms et al. // *Forests*. 2019. Vol. 10. P. 728. DOI:10.3390/f10090728.
5. Pressler M. R. Der forstliche Zuwachsbohrer neuester Construction und dessen praktische Bedeutung und Anwendung für die forstliche Forschungs-, Taxations-, Pflege- und Nutzungs-Technik // *Tharander Jahrbuch*. 1866. Vol. 17. No. 3. P. 113–209.
6. Методы дендрохронологии / С. Г. Шиятов, Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов, В. Б. Круглов, В. С. Мазепа и др. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск : КрасГУ, 2000. 80 с.
7. Schweingruber E. H. Dendroökologische Holzanatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Berne : Paul Haupt Verlag, 2001. 472 p.
8. Алметов А. Н. Совершенствование конструкции бурава для извлечения кернов древесины из растущих деревьев различных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / Алметов Андрей Николаевич. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 24 с.
9. Zobel B. J., Jett J. B. Genetic controls in wood formation // *Genetics of Wood Production*. Berlin : Springer-Verlag, 1995. P. 26–49.
10. 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. DOI: 10.1007/s00107-017-1203-x.
11. 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. DOI:10.1139/X06-161.

12. 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. No. 2. P. 56–64. DOI: 10.1515/sg-2008-0009.
13. Fundova I. In situ wood quality assessment in interior spruce // Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Faculty of graduate studies (Forestry). The University of British Columbia (Vancouver), 2012. 80 p.
14. Hansen C. P. Application of the pilodyn in forest tree improvement // DFSC Series of Technical Notes. TN55. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark, 2000. 11 p.
15. Лавров М. Ф. Совершенствование метода оценки качества древесины лиственницы, произрастающей в климатических условиях Якутии : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Лавров Михаил Фрументьевич. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 15 с.
16. Mamdy C. Contribution à l'étude du module d'élasticité de troncs d'arbres sur pied; utilisation en amelioration génétique des arbres forestiers // Rapport DEA Matière condensée et diluée, ESEM Orléans, INRA Orléans, 1995. 47 p.
17. 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. DOI: 10.1051/forest:2000126.
18. Bucur V. Acoustics of wood. 2nd ed. New York : Springer-Verlag, 2006. 393 p.
19. Симоненко А. А. Методы и средства таможенного контроля плотности древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Симоненко Антон Анатольевич. Санкт-Петербург : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. 20 с.
20. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation / M. A. Moqsd, J. Yoshitake, Q. S. Bushra, M. Nyodo, K. Omine et al. // *Waste Management*. 2015. Vol. 36. P. 63–69. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.004.
21. Полуобояринов О. И. Плотность древесины. М. : Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
22. Мелехов В. И., Бабич Н. А., Корчагов С. А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск : Изд-во АГТУ, 2003. 110 с.
23. Джабык-Карагайский бор / Л. П. Абрамова, Л. И. Аткина, Е. А. Жучков, С. В. Залесов, Н. А. Луганский и др. Екатеринбург : УГЛТУ, 2005. 213 с.
24. Lutz J. How growth rate affects properties of softwood veneer // *Forest Products Journal*. 1964. Vol. 14. P. 97–102.
25. Heräjärvi H. Variation of basic density and Brinell hardness within mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems // *Wood and Fiber Science: Journal of the Society of Wood Science and Technology*. 2004. Vol. 36. No. 2. P. 216–227.
26. Fearnside P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia // *Forest Ecology and Management*. 1997. Vol. 90. No. 1. P. 59–87. DOI: 10.1016/S0378-1127(96)03840-6.
27. Elliott G. K. Wood density in conifers // Technical Communication. No. 8. Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, England, 1970. 44 p.
28. Genetic architecture of wood properties based on association analysis and co-expression networks in white spruce / M. Lamara, E. Raherison, P. Lenz, J. Beaulieu, J. Bousquet et al. // *New Phytologist*. 2015. Vol. 210. No. 1. P. 240–255. DOI: 10.1111/nph.13762.
29. Louzada J. L. Genetic correlations between wood density components in *Pinus pinaster* Ait. // *Annals of Forest Science*. 2003. Vol. 60. P. 285–294. DOI: 10.1051/forest:2003020.
30. Swenson N. G., Enquist B. J. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community – wide variation across latitude and elevation // *American Journal of Botany*. 2007. Vol. 94. No. 3. P. 451–459. DOI: 10.3732/ajb.94.3.451.

31. 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, O. R. van Lier, W. W. Bowers et al. // *Forestry*. 2014. Vol. 87. P. 313–326. DOI: 10.1093/forestry/cpt039.
32. 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. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.03.013.
33. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning / G. Giroud, R. Schneider, R. A. Fournier, J. E. Luther, O. Martin-Ducup // *Canadian Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 49. No. 6. P. 661–669. DOI:10.1139/CJFR-2018-0342.
34. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review / M. van Leeuwen, T. Hilker, N. C. Coops, G. Frazer, M. A. Wulder et al. // *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 261. P. 1467–1478. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.01.032.
35. Усольцев В. А., Цепордей И. С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет ; Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, 2020. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-94984-768-8. – URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf
36. Differences in growth and wood density in clones and provenance hybrid clones of Norway spruce / E. Levkoev, A. Kilpeläinen, K. Luostarinen, P. Pulkkinen, L. Mehtätalo et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 47. No. 3. P. 389–399. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0285.
37. Дювиньо П., Танг М. Биосфера и место в ней человека. М.: Прогресс, 1968. 255 с.
38. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 / H. Pretzsch, P. Biber, G. Schütze, J. Kemmerer, E. Uhl // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 429. P. 589–616. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.07.045.

References

1. Malavasi U. C., Davis A. S., Malavasi M. M. Estimating water in living woody stems – a review // *Cerne*. 2016. Vol. 22. No. 4. P. 415–422. DOI: 10.1590/01047760201622032169
2. Ruggirello M. Nondestructive testing of ponderosa pine wood quality influence of stand and tree-level variables on acoustic velocity and wood density / Submitted to the Faculty of the Northern Arizona University School of Forestry in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Forestry, 2017. 36 p.
3. Allison R. B. Development of bioacoustic nondestructive testing instruments for early detection of bark beetle infestation / Wang X., Senalik C. A., Ross R. J. (eds.). *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. 264–269.
4. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation / L. Schimleck, J. Dahlen, L. A. Apiolaza, G. Downes, G. Emms et al. // *Forests*. 2019. Vol. 10. P. 728. DOI:10.3390/f10090728.
5. Pressler M. R. Der forstliche Zuwachsbohrer neuester Construction und dessen praktische Bedeutung und Anwendung für die forstliche Forschungs-, Taxations-, Pflege- und Nutzungs-Technik // *Tharander Jahrbuch*. 1866. Vol. 17. No. 3. P. 113–209.
6. Methods of dendrochronology / S. G. Shiyatov, E. A. Vaganov, A.V. Kirilyanov, V. B. Kruglov, V. S. Mazepa, M. M. Naurzbaev, R. M. Khantemirov. Part 1. Fundamentals of dendrochronology. Collecting and receiving tree-ring information. Krasnoyarsk: KrasGU, 2000. 80 p.
7. Schweingruber E. H. *Dendroökologische Holz Anatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie*. Berne : Paul Haupt Verlag, 2001. 472 p.
8. Almetov A. N. Improving the design of the drill for extracting wood cores from growing trees of various species: PhD Thesis: 05.21.05 / Andrey Almetov. Ioshkar-Ola: MarGTU, 2001. 24 p.

9. Zobel B. J., Jett J. B. Genetic controls in wood formation // Genetics of Wood Production. Berlin : Springer-Verlag, 1995. P. 26–49.
10. 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. DOI: 10.1007/s00107-017-1203-x.
11. 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. DOI:10.1139/X06-161.
12. 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. No. 2. P. 56–64. DOI: 10.1515/sg-2008-0009.
13. Fundova I. In situ wood quality assessment in interior spruce // Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Faculty of graduate studies (Forestry). The University of British Columbia (Vancouver), 2012. 80 p.
14. Hansen C. P. Application of the pilodyn in forest tree improvement // DFSC Series of Technical Notes. TN55. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark, 2000. 11 p.
15. Lavrov M. F. Improving the method for assessing the quality of larch wood growing in the climatic conditions of Yakutia: PhD. Thesis: 05.21.05 / Mikhail Lavrov. Yekaterinburg : UGLTU, 2015. 15 p.
16. Mamdy C. Contribution à l'étude du module d'élasticité de troncs d'arbres sur pied; utilisation en amelioration génétique des arbres forestiers // Rapport DEA Matière condensée et diluée, ESEM Orléans, INRA Orléans, 1995. 47 p.
17. 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. DOI: 10.1051/forest:2000126.
18. Bucur V. Acoustics of wood. 2nd ed. New York : Springer-Verlag, 2006. 393 p.
19. Simonenko A. A. Methods and means of customs control of wood density: PhD. Thesis: 05.11.13 / Anton Simonenko. Saint Petersburg: National Mineral Resource University «Gorny», 2014. 20 p.
20. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation / M. A. Moqsud, J. Yoshitake, Q. S. Bushra, M. Hyodo, K. Omine et al. // Waste Management. 2015. Vol. 36. P. 63–69. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.004.
21. Poluboyarinov O. I. Wood density. M. : Lesnaya Promyshlennost', 1976. 160 p.
22. Melekhov V. I., Babich N. A., Korchagov S. A. The quality of pine wood in plantations. Arkhangel'sk : AGTU Publ., 2003. 110 p.
23. Dzhabyk-Karagay Forest / L. P. Abramova, L. I. Atkina, E. A. Zhuchkov, S. V. Zalesov, N. A. Luganskiy et al. Yekaterinburg : UGLTU, 2005. 213 p.
24. Lutz J. How growth rate affects properties of softwood veneer // Forest Products Journal. 1964. Vol. 14. P. 97–102.
25. Heräjärvi H. Variation of basic density and Brinell hardness within mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems // Wood and Fiber Science: Journal of the Society of Wood Science and Technology. 2004. Vol. 36. No. 2. P. 216–227.
26. Fearnside P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia // Forest Ecology and Management. 1997. Vol. 90. No. 1. P. 59–87. DOI: 10.1016/S0378-1127(96)03840-6.
27. Elliott G. K. Wood density in conifers // Technical Communication. No. 8. Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, England, 1970. 44 p.
28. Genetic architecture of wood properties based on association analysis and co-expression networks in white spruce / M. Lamara, E. Raherison, P. Lenz, J. Beaulieu, J. Bousquet et al. // New Phytologist. 2015. Vol. 210. No. 1. P. 240–255. DOI: 10.1111/nph.13762.

29. Louzada J. L. Genetic correlations between wood density components in *Pinus pinaster* Ait. // *Annals of Forest Science*. 2003. Vol. 60. P. 285–294. DOI: 10.1051/forest:2003020.
30. Swenson N. G., Enquist B. J. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community – wide variation across latitude and elevation // *American Journal of Botany*. 2007. Vol. 94. No. 3. P. 451–459. DOI: 10.3732/ajb.94.3.451.
31. 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, O. R. van Lier, W. W. Bowers et al. // *Forestry*. 2014. Vol. 87. P. 313–326. DOI: 10.1093/forestry/cpt039.
32. 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. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.03.013.
33. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning / G. Giroud, R. Schneider, R. A. Fournier, J. E. Luther, O. Martin-Ducup // *Canadian Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 49. No. 6. P. 661–669. DOI:10.1139/CJFR-2018-0342.
34. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review / M. van Leeuwen, T. Hilker, N. C. Coops, G. Frazer, M. A. Wulder et al. // *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 261. P. 1467–1478. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.01.032.
35. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Qualimetry of forest tree biomass : density and dry matter content: monograph. Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS. Yekaterinburg, 2020. (CD-ROM). ISBN 978-5-94984-768-8. URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf
36. Differences in growth and wood density in clones and provenance hybrid clones of Norway spruce / E. Levkoev, A. Kilpeläinen, K. Luostarinen, P. Pulkkinen, L. Mehtätalo et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 47. No. 3. P. 389–399. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0285.
37. Duvigneaud P., Tanghe M. *Ecosystemes et biosphere*. Moscow : «Progress», 1968. 255 p.
38. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 / H. Pretsch, P. Biber, G. Schütze, J. Kemmerer, E. Uhl // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 429. P. 589–616. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.07.045.

Информация об авторах

И. С. Цепардей – научный сотрудник;

В. А. Усольцев – доктор сельскохозяйственных наук, профессор.

Information about the authors

I. S. Tsepordey – scientific researcher;

V. A. Usoltsev – doctor of agricultural sciences, professor.

Статья поступила в редакцию 06.09.2021; принята к публикации 10.09.2021.

The article was submitted 06.09.2021; accepted for publication 10.09.2021.

Рецензент: Терехов Г. Г., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ науки «Ботанический сад» УрО РАН.

Reviewer: Terekhov G. G., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Science «Botanical Garden», Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.
