

В. А. Усольцев И. С. Цепордей

КВАЛИМЕТРИЯ ФИТОМАССЫ ЛЕСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ: ПЛОТНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ СУХОГО ВЕЩЕСТВА



Екатеринбург 2020

Электронный архив УГЛТУ

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: ПЛОТНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ СУХОГО ВЕЩЕСТВА

Монография

Электронный архив УГЛТУ

УДК 630*52:630*174.754+303.732 ББК 43.62(051) У76

Рецензенты:

кафедра лесоводства и лесопаркового хозяйства Оренбургского государственного аграрного университета, доктор сельскохозяйственных наук, профессор Колтунова А. И.; Колтунов Е. В. – доктор биологических наук, профессор Ботанического сада УрО РАН

Усольцев, В. А.

У76

Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества: 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, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Мин. системные требования: IBM IntelCeleron; Microsoft Windows XP SP3; 4,24 Мб. Видеосистема Intel HD Graphics; дисковод, мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-94984-768-8

В необъятном море экспоненциально нарастающей информации важно вычленить и обосновать перспективные направления, научные ориентиры-маяки, ускоряющие прогресс в той или иной области науки, при минимизации потерь от дублирования и следования тривиальной методологии проб и ошибок. Как можно видеть в предложенном анализе проблем, связанных с оценкой квалиметрических свойств древесины, количество публикаций по данной теме в последние годы катастрофически нарастает, а методы и алгоритмы их моделирования неуклонно совершенствуются. Тем не менее в ходе решения той или иной конкретной проблемы обнаруживается масса неопределенностей, требующих корректного решения. Попытке систематизации как опубликованных разными авторами результатов, так и выявленных неопределенностей посвящен предлагаемый обзор.

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.

Usoltsev, V.A.

Qualimetry of forest tree biomass: density and dry matter content: monograph / V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey; Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS. – Yekaterinburg, 2020.

In the vast sea of exponentially growing information, it is important to identify and justify promising directions, scientific landmarks-beacons that accelerate progress in a particular field of science while minimizing losses from duplication and following a trivial methodology of trial and error. As can be seen in the proposed analysis of problems related to the assessment of qualimetric properties of wood, the number of publications on this topic has been growing catastrophically in recent years, and methods and algorithms for modeling them are steadily improving. However, in the course of solving a particular problem, a lot of uncertainties are found that require a correct solution. The proposed review is devoted to an attempt to systematize both the results obtained by different authors and the uncertainties generated by them.

For professionals in the development and management of forestry and forest inventory, to develop systems for monitoring forest and environmental programs in different forest science areas.

УДК 630*52:630*174.754+303.732 ББК 43.62(051)

ISBN 978-5-94984-768-8

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2020 © Усольцев В. А., Цепордей И. С., 2020

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 всё более актуальной оценка их биологической продуктивности и углероддепонирующей способности. Однако результаты моделирования откликов лесной растительности на глобальные изменения температуры и осадков противоречивы и характеризуются существенной прогнозах климатически обусловленной неопределенностью В динамики лесного покрова. Одним из наиболее значимых является противоречие двух возможных сценариев: с одной стороны, повышение биологической продуктивности вследствие потенциального обогащения атмосферы СО2 и его мелиорирующего воздействия на растительность, а с другой стороны, ее снижение вследствие потери устойчивости при резком сокращении адаптационного временного лага (Kellomäki et al., 2005; Santini et al., 2014; Berdugo et al., 2020).

В исследованиях биологической продуктивности лесов и их реакции на изменение климата необходимо знание закономерностей динамики их не только количественных, но и качественных характеристик, варьирующих с возрастом, экологическими и другими факторами. Их исследование относится к области квалиметрии — науки о количественной оценке качества (Азгальдов, Райхман, 1973).

Квалиметрия лесной фитомассы входит составной частью в дисциплину экологического (биологического) древесиноведения (Полубояринов, 1976а), в котором можно выделить два направления. Одно из них – техническое, включающее исследования анатомических и физико-механических свойств древесины как технологического сырья. Изначально качество древесины связывали с ее использованием и определяли как совокупность физических и химических характеристик, присущих дереву или его части, которые позволяют ему удовлетворять требованиям, предъявляемым к свойствам различных конечных продуктов (Mitchell, 1961). Плотность древесины и содержание сухого вещества в компонентах фитомассы деревьев и древостоев являются ключевыми признаками, дающими сведения о механических свойствах древесины и полезную информацию для многих промышленных и научных целей (Исаева, 1963; Hakkila, 1966, 1972; Перелыгин, Уголев, 1971; Полубояринов, 1974; Larocque, 1993; Heräjärvi, 2004; Wiemann, Green, 2007; Rosner, 2017; Лавров, 2015; Rodriguez et al., 2016).

Другое направление – ресурсоведческое, располагающее сведениями в основном о плотности и влажности (содержании сухого вещества) фракций фитомассы, необходимыми в расчетах биологической продуктивности лесных фитоценозов (Ando, Hirozami, 1961; Поздняков и др., 1969; Уткин, 1969, 1970; Поздняков, 1973; Полубояринов, 1976а; Технеряднов, Шоманов, 1976; Семечкина, 1978; Успенский, 1980; Bartelink, 1996; Nogueira et al., 2005; Sagang et al., 2018). В последние годы в этом же ряду выделяют биоэкономическое направление (Levkoev et al., 2017). Роль древесины становится все более значимой, особенно в контексте формирующейся биоэкономики, поскольку мы вступаем в новую эру, характеризующуюся глобальным стремлением к достижению экономической, социальной и экологической устойчивости (The Principal Attributes..., 2010). Плотность компонентов фитомассы и содержание сухого вещества в них наряду с количественными показателями фитомассы и чистой первичной продукцией входят в понятие биологической продуктивности лесного покрова планеты как «наиболее надежного источника пропитания всё 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 (Ilic et al., 2000; Wright et al., 2004; Chave et al., 2006; Donegan et al., 2014; Pretzsch et al., 2018; Vaughan et al., 2019).

В настоящем исследовании основное внимание уделено биопродукционному аспекту квалиметрии растущих деревьев, а именно, плотности и влажности (или содержанию сухого вещества) компонентов их биомассы.

Глава 1. КВАЛИМЕТРИЯ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВА: ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Плотность древесины — это физическая величина, которая представляет собой массу натуральной древесины в единице объема (Полубояринов, 1976а; Fearnside, 1997; ASTM, 2007). Плотность ρ прямо пропорциональна массе и обратно пропорциональна объему и вычисляется по формуле

$$\rho = m / V, \tag{1}$$

где m и V — соответственно масса (г или кг) и объем (см 3 или м 3) образца древесины.

Электронный архив УГЛТУ

Плотность древесины зависит от ее влажности, поэтому при обозначении ρ в индексе указывают влажность, при которой измеряют плотность. Например, обозначение ρ_{20} соответствует плотности древесины с влажностью W=20%.

При выражении плотности цельной древесины различают плотность древесины в абсолютно сухом состоянии ρ_0 , в натуральном виде («кажущуюся») ρ_W , нормализованную (табличную) ρ_{12} , парциальную ρ_W и базисную ρ_0 (Боровиков, Уголев, 1989).

Плотность древесины меньше плотности древесного вещества, так как она включает пустоты (полости клеток и межклеточные пространства, заполненные воздухом). Плотность древесинного вещества $\rho_{\text{д.в.}}$, г/см³, или плотность материала клеточных стенок, определяется соотношением

$$\rho_{\text{\tiny J,B}} = m_{\text{\tiny J,B}} / V_{\text{\tiny J,B}}, \tag{2}$$

где $m_{\text{д.в}}$ и $V_{\text{д.в}}$ — соответственно масса (г) и объем (см³) древесинного вещества. В зависимости от способа определения объема древесинного вещества этот показатель может варьировать от 1,44 до 1,53 г/см³ (Боровиков, Уголев, 1989).

В последние годы в связи с повышенным вниманием к оценке углеродно-кислородного баланса в биосфере важное значение имеет содержание углерода в древесинном веществе или абсолютно сухой биомассе того или иного ее компонента. Хотя принято считать содержание углерода в массе абсолютно сухой древесины равным 50 %, в действительности оно варьирует у разных пород и в разных компонентах биомассы, поскольку химический состав компонентов биомассы довольно изменчив. В древесине 10 древесных и кустарниковых видов Мексики химический состав варьирует в следующих диапазонах: углерод – от 37 до 44, азот – от 9 до 19, сера – от 31 до 34, лигнин – от 15 до 24, гемицеллюлоза – от 20 до 27 и целлюлоза – от 34 до 46 % (Maiti et al., 2016). Углерод связывается в органических соединениях фитомассы дерева, соотношения которых варьируют в зависимости от вида, положения в дереве, географического положения, возраста и других факторов в следующих диапазонах: целлюлоза – от 35 до 85, гемицеллюлоза – от 5 до 46, лигнин – от 13 до 35, экстрагируемые вещества – от 1 до 26, протеин – от 0,2 до 2,1 и зольные элементы – от 0,6 до 2,3 % (Matthews, 1993). Соответственно варьирует и доля углерода в сухой фитомассе. В результате анализа данных 255 литературных источников установлены для разных древесных видов диапазоны варьирования содержания углерода в древесине от 46,1 до 54,2 %, в коре — от 46,3 до 52,5 %, в листве и хвое — от 45,0 до 52,9 % (Matthews, 1993). В русскоязычной литературе показатели фитомассы в абсолютно сухом состоянии обычно пересчитывают на углерод по коэффициентам 0,45 для хвои и нижних ярусов растительности и 0,5 для остальных компонентов (Кобак, 1988).

Плотность древесины в абсолютно сухом состоянии ρ_0 получают на основе опытных данных путем деления массы абсолютно сухого образца на его объем в этом же состоянии:

$$\rho_0 = m_0 / V_0, \tag{3}$$

где m_0 — масса абсолютно сухой древесины (г или кг); V_0 — объем древесины (см³ или м³) в абсолютно сухом состоянии. Для данного образца древесины ρ_0 — однозначная воспроизводимая величина. Ее широко используют в научной работе и в некоторых практических расчетах как характеристику древесины, не зависящую от ее влажности (Боровиков, Уголев, 1989).

Плотность ρ_W древесины в свежем состоянии, или в натуральном виде («кажущаяся» плотность — bulk density, volume density), определяется соотношением

$$\rho_W = m_W / V_W, \tag{4}$$

где ρ_W — плотность древесины при влажности W (г/см³) или (кг/м³); m_W и V_W — соответственно масса (г или кг) и объем (см³ или м³). W — влажность древесины (%) в момент определения плотности ее образца. В данном случае плотность древесины показывает, какое количество древесины (вместе с влагой) содержится в единице ее объема при данной влажности.

Плотность древесины при нормализованной влажности ρ_{12} представляет собой отношение массы образца при влажности, равной 12 %, к его объему при этой же влажности. Нормализованной, или стандартной, плотностью обычно пользуются для сравнения свойств различных древесных пород. К недостаткам нормализованной плотности относят трудности ее экспериментального определения, так как для этого нужно привести древесину к точному значению влажности 12 %. Поэтому обычно ρ_{12} получают расчетным путем с использованием соответствующих справочников (Боровиков, Уголев, 1989).

Базисная (условная) плотность древесины ρ_{δ} (г/см³) или (кг/м³) представляет собой отношение массы абсолютно сухого образца к его объему при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок Vmax (Боровиков, Уголев, 1989):

$$\rho_{\tilde{o}} = m_0 / V_{max}. \tag{5}$$

Поскольку объемы свежесрубленных и влагонасыщенных образцов древесины практически одинаковы, базисная плотность в исследованиях биопродуктивности лесов обычно рассчитывается по отношению к объему в свежесрубленном состоянии (Bastin et al., 2015; Sytnyk et al., 2018; Usoltsev, 2020c).

Между названными видами плотности имеются определенные количественные соотношения. Формулы для пересчета одного вида в другой приведены в соответствующих справочных изданиях (Полубояринов, 1976а; ГОСТ..., 1984; Reyes et al., 1992; Bastin et al., 2015). Наряду с понятием базисной плотности, широко применяется понятие удельного веса древесины (wood specific gravity) (Pronini, 1971; Keduolhouvonuo, Kumar, 2017). Плотность древесины – это масса древесины, приходящаяся на единицу её 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; Donegan et al., 2014).

Содержание сухого вещества (S, %) в компонентах фитомассы определяется как отношение массы абсолютно сухого образца к массе в свежем состоянии, или в натуральном виде:

$$S = (m_0/m_W)100. (6)$$

Соответственно, влажность компонентов фитомассы (W, %) определяется как влагосодержание по отношению к массе в свежем состоянии:

$$W = [(m_W - m_0)/m_W]100. (7)$$

Наконец, третий вид влажности, абсолютная влажность ($W_{aбc}$, %), определяется как влагосодержание по отношению к абсолютно сухой массе (Полубояринов и др., 1982):

$$W_{a\delta c} = [(m_W - m_0)/m_0]100. (8)$$

Как отмечалось выше, объем ствола дерева был первоочередным объектом исследования с момента зарождения лесной таксации как науки, и по настоящее время исходные стереометрические методы определения объема ствола и запаса древостоя лежат в основе традиционной лесной таксации. Стереометрические методы оценки сбега,

Электронный архив УГЛТУ

полнодревесности и объема ствола были перенесены на оценку названных показателей корней (Калинин, 1978) и ветвей деревьев (Усольцев, 1985а). Для последних были составлены таблицы сбега и объема пихты сибирской (Голиков, 1963), осины (Данилин, 1965), сосны обыкновенной (Воробьева, 1968) и березы повислой (Усольцев, 1985а), позволяющие определять по диаметру нижнего среза ветвей объемы их коры и древесины.

Соотношение коры и древесины, или процентное содержание коры, как в стволах, так и в ветвях является важной характеристикой при оценке биологической продуктивности названных компонентов фитомассы. При оценке массы древесины и коры спиленного дерева определение доли коры в массе ствола не представляет проблемы (Нахабцев, 1990). Определение доли коры в массе кроны дерева, обычно методом взвешивания, более проблематично. Для расчетов биопродуктивности древостоев предложены средние для региона значения «кажущейся» плотности и содержания сухого вещества (табл. 1).

Таблица 1 Средние квалиметрические показатели для основных лесообразующих древесных пород степной зоны (Усольцев, 1985а)

Фракция фитомассы	«Кажущаяся» плотность $(\rho_W, \kappa \Gamma/M^3)$			Содержание абсолютно сухого вещества (S, %)		
	Береза	Осина	Сосна	Береза	Осина	Сосна
Древесина ветвей	863±7	784±5	929±5	56,6±0,46	59,4±0,26	49,1±0,27
Кора ветвей	1165±21	1109±10	992±8	55,2±0,50	51,6±0,33	46,7±0,30
Древесина ствола	863±7	762±8	809±6	56,2±0,66	55,3±0,65	52,1±0,45
Кора ствола	937±16	962±8	512±10	57,5±1,19	48,9±0,31	50,8±0,59
Хвоя (листва)	-	-	-	38,5±0,31	36,6±0,47	46,9±0,18
Отмершие ветви	-	-	-	89,0±1,50	77,2±1,70	86,7±1,40

Процентное содержание коры по объёму и массе в свежесрубленном состоянии может совпадать только при условии одинаковой плотности коры и древесины ветвей, однако в действительности этого нет (см. табл. 1).

Была предложена формула (Усольцев, 1973):

$$P_{c\theta}^{\theta} = \frac{100P_{c\theta}^{o}\rho_{\kappa}}{100\rho_{o} + P_{c\theta}^{o}(\rho_{\kappa} - \rho_{o})};$$
(9)

где Π_{cs}^{ϵ} — содержание коры в процентах от массы образца ветви в свежесрубленном состоянии, Π_{cs}^{ϵ} — содержание коры в процентах от объема образца ветви в свежесрубленном состоянии, ρ_{δ} и ρ_{κ} – плотность в свежесрубленном состоянии соответственно древесины и коры (г/см³). Поскольку статистически значимого изменения плотности в зависимости от толщины ветви не было выявлено, она принята постоянной, и выражение (9) приведено к частному виду для каждого из трех древесных видов (Усольцев, 1985а):

– для сосны обыкновенной

$$\Pi_{ce}^{e} = \frac{99,2\Pi_{ce}^{e}}{92,9+0,063\Pi_{ce}^{e}};$$
(10)

– для березы

$$\Pi_{ce}^{e} = \frac{116.5\Pi_{ce}^{e}}{86.3 + 0.302\Pi_{ce}^{e}};$$
(11)

- для осины

$$\Pi_{ce}^{\theta} = \frac{110.9\Pi_{ce}^{\theta}}{78.4 + 0.325\Pi_{ce}^{\theta}}.$$
(12)

Для пересчета процентного содержания коры в ветвях со свежесрубленного состояния на абсолютно сухое была предложена формула (Усольцев, 1973)

$$\Pi_{cyx}^{e} = \frac{100\Pi_{ce}^{e}}{\Pi_{ce}^{e} + \frac{(100 - \Pi_{ce}^{e})(1 + 0.01W_{\kappa})}{1 + +0.01W_{o}}};$$
(13)

где $\Pi_{\text{сух}}^{\beta}$ – содержание коры в процентах от массы образца ветви в абсолютно сухом состоянии, $\Pi_{\text{сs}}^{\beta}$ – содержание коры в процентах от массы образца ветви в свежесрубленном состоянии, W_{∂} и W_{κ} – соответственно содержание влаги в древесине и коре, % от абсолютно сухой массы. Поскольку какой-либо закономерности в изменении

влажности в зависимости от толщины ветвей не было выявлено, влажность была принята постоянной по всей длине ветви, и выражение (13) приведено к частному варианту для каждого из трех древесных видов:

– для сосны обыкновенной

$$\Pi_{cyx}^{\epsilon} = \frac{100\Pi_{cs}^{\epsilon}}{105,1-0,051\Pi_{cs}^{\epsilon}};$$
(14)

– для березы

$$\Pi_{cyx}{}^{6} = \frac{100\Pi_{cs}{}^{6}}{102,5 - 0,025\Pi_{cs}{}^{6}};$$
(15)

- для осины

$$\Pi_{cyx}^{\quad \epsilon} = \frac{100\Pi_{cs}^{\quad \epsilon}}{115,1-0,151\Pi_{cs}^{\quad \epsilon}}$$
(16)

которые дают возможность пересчета процента коры в ветвях и получения необходимого его значения без рубки модельных деревьев. В приведенных выше формулах использованы фактические данные плотности, содержания сухого вещества и доли коры в ветвях, полученные на 483, 525 и 325 модельных деревьях, взятых соответственно в сосновых, березовых и осиновых древостоях лесостепной и степной зон (Усольцев, 1985б).

Если соотношение объемов древесины и коры ствола традиционно представляет предмет лесной таксации, то показатели плотности и содержания сухого вещества древесины ствола исследуются лесным ресурсоведением, включающим оценку биологической продуктивности лесного покрова. С точки зрения проблематики биологической продуктивности древостоев, оцениваемой в абсолютно сухом состоянии, наибольший интерес представляют базисная плотность и влажность (или содержание абсолютно сухого вещества). Фитомасса любого компонента дерева в абсолютно сухом состоянии может быть определена путем непосредственного взвешивания образцов с последующим вычетом влаги по результатам их сушки до нулевой влажности. В подобных случаях первостепенное значение имеет содержание сухого вещества в компонентах фитомассы.

Но фитомасса ствола обычно подразделяется на древесину и кору. При прямом взвешивании их практически невозможно разделить, особенно у крупных деревьев. Поэтому фитомасса ствола определяется не прямым взвешиванием, а по двухэтапной процедуре. На первом этапе рассчитывается объем древесины и коры по каждой секции ствола и по выпиленным дискам (шайбам) – значения влажности и

базисной плотности древесины и коры. На втором этапе секционные объемы коры и древесины умножают на соответствующие значения базисной плотности и путем сложения результатов получают массу коры и древесины всего ствола в абсолютно сухом состоянии. В подобных случаях первостепенное значение имеет величина базисной плотности древесины и коры (Miles, Smith, 2009; Zhang et al., 2012; Sytnyk et al., 2018). Предпочтение базисной плотности обусловлено также тем, что варьирование влажности древесины намного превышает варьирование базисной плотности (Полубояринов и др., 1982). Поэтому при оценке массы абсолютно сухой древесины путем взвешивания и использования показателя влажности мы получаем менее надежный результат по сравнению с получаемым по названной двухэтапной процедуре.

Итак, в исследованиях биологической продуктивности насаждений с учетом фракционной структуры фитомассы показатели влажности и плотности используются в разных приложениях: фитомасса древесины и коры стволов определяется с использованием только базисной плотности, а фитомасса листвы, хвои, ветвей, корней и нижних ярусов — с использованием только влажности (или содержания сухого вещества). Поэтому, несмотря на взаимосвязь названных двух квалиметрических показателей, анализ методов и результатов их определения, имеющихся в литературных источниках, в дальнейшем изложении выполняется раздельно.

Глава 2. БАЗИСНАЯ ПЛОТНОСТЬ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВА: ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗЕЙ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

2.1. Общие положения и взаимосвязи

Формирование древесины (ксилогенез) деревьев происходит в сосудистом камбии — тонком слое меристемных клеток, расположенных под корой. Камбиальная активность и модификация древесной клетки в течение короткой фазы ее дифференциации являются основными причинами изменения свойств древесины (Zobel, Van Buijtenen, 1989; Plomion et al., 2001). Было показано наличие умеренного и сильного генетического контроля свойств древесины у хвойных пород, в частности ели (Ivkovich et al., 2002 a, b; Lenz et al., 2010) и дугласии (Rozenberg et al., 2001). Однако этот контроль, в конечном сче-

те выраженный определенным фенотипом, в значительной степени регулируется факторами окружающей среды (Savidge, 1996; Raiskila et al., 2006). Например, в многочисленных исследованиях сообщалось о сильном влиянии условий местопроизрастания на такие свойства древесины, как ее плотность (Skolmen, 1963; Zobel, Van Buijtenen, 1989; Watt et al., 2008 a,b; Šilinskas et al., 2020), а влияние климата на анатомию древесины изучается такими областями исследований, как дендрохронология и дендроклиматология, где связывают прошлые климатические события с изменением плотности древесины и ее компонентов, включая диаметр клеток и толщину клеточных стенок (Schweingruber, 1996; Bouriaud et al., 2003; Park, Spiecker, 2005).

В экспериментах 1960–1970-х годов, проводимых в фитотронах, изучалось влияние факторов окружающей среды, таких как температура, продолжительность светового дня и режимы питания, на клеточную структуру годичных колец (Denne, 1971). В более поздних сообщениях описывалась сложная взаимосвязь между климатом и ксилогенезом в естественных древостоях в течение вегетационного периода (Antonova, Stasova, 1997; Deslauriers, Morin, 2005; Lupi et al., 2012). Было показано, что основные изменения в размерах клеток, утолщении клеточных стенок и одревеснении тканей у канадских бореальных хвойных видов связаны с климатическими переменными, особенно с температурой, осадками и влажностью почв (Wang et al., 2002; Krause et al., 2010). В целом установлено, что названные свойства древесины изменяются в зависимости от климата, географической локализации и других факторов окружающей среды (Lenz et al., 2014).

Несмотря на большое количество подтверждений влияния факторов окружающей среды на формирование древесины, сегодня очевидно, что имеется недостающее звено между результатами квалиметрических исследований и конечной целью лесопользования, а именно производством высококачественной древесины. Качество древесины вызывает все большую озабоченность в области лесопользования, особенно в связи с нынешним сдвигом парадигмы в лесной промышленности в сторону производства древесной продукции с высокой добавленной стоимостью и повышения конкурентоспособности сектора в контексте биоэкономики. Для конечных продуктов требуется сырье, которое обладает специфическими свойствами волокон древесины, соответствующими спецификации качества продукции. Знание свойств древесины растущих древостоев и технологии их выращивания занимает центральное место в оптимизации цепочки форми-

рования стоимости древесной продукции (MacKenzie, Bruemmer, 2009), однако качество древесины часто упускается из виду из-за отсутствия априорных знаний и вследствие трудоемкости оценки ее свойств. Таким образом, существует очевидная потребность в методах, позволяющих прогнозировать качество древесины с использованием факторов окружающей среды путем разработки соответствующих моделей (Lenz et al., 2014; Cortini et al., 2014, 2016).

Исследования показали, что характеристики роста и морфологии деревьев позволяют прогнозировать свойства древесины растущих деревьев ели (Huang, Liu, 1959; Liu et al., 2007; Lenz et al., 2012; Cortini et al., 2016) и сосны (Watt et al., 2006, 2008 a, b). Также известно, что морфологические переменные (van Leeuwen et al., 2011) и на их коррелятивной основе свойства волокон древесины (Luther et al., 2014) могут быть измерены и смоделированы с приемлемой точностью на основе данных наземного дистанционного зондирования и бортовых лазерных носителей. Имеются все предпосылки к тому, что в скором времени будут внедрены дистанционные методы инвентаризации лесов, включающие информацию о качестве древесины (Hilker et al., 2013; Lenz et al., 2014).

Квалиметрия древесины различается между видами, в пределах вида, древостоя, а также в пределах ствола отдельного дерева (Johansson, 1940; Hildebrandt, 1954; Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955; Бюсген, 1961; Larson, 1969; Elliott, 1970; Meylan, 1978; Zobel, van Buijtenen, 1989; Thornqvist, 1993; Kučera, 1994; Fimbel, Sjaastad, 1994; Heräjärvi, Junkkonen, 2006; Bjurhager et al., 2008; Xiang, 2013; Jati et al., 2014; Tomczak et al., 2016; Horáček et al., 2017; Viherä-Aarnio, Velling, 2017; De Mil, 2018). У многих древесных видов с возрастом изменяются плотность древесины, морфологические признаки волокон, а также химический состав древесины (Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955). Плотность древесины ствола служит также показателем деформации сосудов ксилемы в виде кавитации (Rosner, 2017). Основные сведения об изменении размеров волокон с возрастом деревьев хвойных видов были получены еще в XIX в. (Sanio, 1872; Hartig, 1892c, 1895 a, b; Bertog, 1895; Omeis, 1895). В 1960-е годы было выяснено, что ширина волокон или их площадь поперечного сечения обычно больше в годичных кольцах, отложенных в спелом возрасте, чем в кольцах вблизи сердцевины. Как внутренний диаметр, так и толщина стенок волокон в наружных слоях древесины больше, чем во внутренних. Вследствие этого количество волокон на единице площади в спелой древесине меньше, чем в молодой (Götze, Zenker, 1965; Schultze-Demitz, 1965).

Было установлено, что плотность древесины сосны обыкновенной в Германии достигает текущего годичного оптимума (laufendjähriges Optimum) в камбиальном возрасте около 60 лет (Schwappach, 1897). Затем по мере снижения камбиального возраста плотность понижается вначале медленно, затем всё быстрее, особенно между 1 и 30 годами. Следовательно, в возрастной стадии тонкомерных деревьев сосна формирует очень лёгкую древесину, за исключением низкопродуктивных лесорастительных условий (Schwappach, 1897).

У нескольких хвойных видов было выявлено повышение содержания целлюлозы в волокнах в направлении от сердцевины к периферии ствола (Wardrop, 1951; Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955; Schütt, Augustin, 1961). В этом же направлении повышается базисная плотность у эвкалипта в Австралии (Wilkes, 1984), у березы повислой в Финляндии (Heräjärvi, 2004) и у акации в Малайзии (Lokmal, Mohd Noor, 2010), а у ели европейской в Норвегии она вначале снижается, в середине радиуса ствола слегка повышается, образуя «мини-выступ», а по мере приближения к коре вновь возрастает (Gjerdrum, Eikenes, 2014). Похожая закономерность, но более приближенная к U-образной, была установлена у дугласии в Чехии (Remeš, Zeidler, 2014), у ели Энгельмана в Канаде (Mansfield et al., 2015), а также у осины (Heräjärvi, Junkkonen, 2006) и ели европейской (Jyske et al., 2008) в Финляндии.

В. Клаудиц (1949) (цит. по: Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955) показал, что у старых деревьев бука древесина светового прироста с широкими кольцами содержит целлюлозы на 2,3–5,6 % больше, чем в таких же участках ствола с узкими кольцами. Собрав в литературе опубликованные данные о квалиметрии древесины и содержании лигнина у 35 лиственных и хвойных видов, Р. Тренделенбург и Г. Майер-Вегелин (Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955) выявили в их совокупности прямо пропорциональную связь «индекса добротности» (как отношения прочности на сжатие к объемной плотности) с содержанием лигнина в волокнах.

Базисная плотность признается наиболее значимым квалиметрическим свойством древесины и является функцией трахеидной структуры. У хвойных видов размер и расположение трахеид определяют свойства древесины и целлюлозы. Морфология трахеид определяет физические свойства древесины и влияет на гибкость, пластичность и устойчивость (Zobel, van Buijtenen, 1989), а также на процент

усушки (Budgen, 1981; Saranpää, 1994; Schulgasser, Witztum, 2015; Rosner, 2017). Базисная плотность, интегрирующая размер клетки, толщину ее стенки и долю поздней древесины, признана одной из важнейших составляющих механической устойчивости к деформации под действием приложенной нагрузки (Lindström, 1997; Mansfield et al., 2015). Она играет важную роль в управлении лесами, экологии растительных сообществ и оценке региональных углеродных циклов (Fearnside, 1997). Согласно Г. Эллиоту (Elliott, 1970), плотность древесины отражает комплексный эффект нескольких ростовых и физиологических переменных, объединенных этой одной, довольно легко измеряемой характеристикой древесины.

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 (Mitchell, 1958; Joranson, 1960; Hale et al., 1961; Lutz, 1964; Carlson, 1964). Плотность и угол наклона волокон тесно связаны с прочностью древесины (Knapic et al., 2018). Установлены тесные корреляции между модулем упругости, углом наклона волокон и плотностью древесины (Booker et al., 1997). Плотность и угол наклона волокон оказались наиболее надежными переменными при оценке модуля упругости древесины у дугласии (Lachenbruch et al., 2010). Влияние угла наклона волокон на качество древесины надежно установлено у хвойных (Hori et al., 2002), но менее очевидно у лиственных видов (Donaldson, 2008). По мере увеличения угла наклона волокон снижается модуль упругости древесины (Cave, 1968; Cave, Walker, 1994; Walker, Butterfield, 1995; Barnett, Bonham, 2004). У эвкалипта угол наклона волокон является основной переменной, определяющей модуль упругости (Evans, Ilic, 2001; Yang, Evans, 2003; Hein, Lima, 2012). Установлено также, что величина угла наклона волокон связана с содержанием лигнина в древесине (Bailleres et al., 1995; Barnett, Bonham, 2004; Via et al., 2009; Hein et al., 2010).

Плотность древесины может характеризовать жизненную историю деревьев, их механические и физиологические стратегии. Дж. Чейв с соавторами (Chave et al., 2006) количественно определили расхождения в плотности древесины вдоль филогенетического «супердерева», содержащего около 2400 видов, расположенных в Амазонии и Центральной Америке. Они обнаружили, что этот показатель филогенетически сохраняется в целом, но это не было должным образом проверено с помощью методов рандомизации (Blomberg et al., 2003).

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 для более 4600 таксонов (Swenson, Enquist, 2007). Было построено филогенетическое «супердерево», что позволило провести всесторонний анализ различий в филогенезе семенных растений. Плотность древесины, как правило, сохранялась во всем филогенезе семенных растений, однако в некоторых случаях были обнаружены расхождения. 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, что предполагает усиление признаков с изменениями 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 (Swenson, Enquist, 2007).

Базисная плотность явилась одним из продукционных показателей при анализе разных восстановительных сукцессий на основе 1403 пробных площадей в тропических лесах. Проанализированы изменения в составе древостоев с использованием видоспецифичной базисной плотности стволовой древесины как ключевого показателя роста и накопления углерода в лесах. Во влажных лесах сукцессия протекает от низкой к высокой базисной плотности в соответствии со стандартной сукцессионной теорией. Но в сухих условиях сукцессия протекает от высокой к низкой плотности древесины, вероятно, потому, что высокая плотность отражает засухоустойчивость в суровых условиях на ранних стадиях сукцессий. Выраженный сухой сезон стимулирует повышение плотности, влияя на начало и траекторию сукцессии, что приводит к конвергенции показателей плотности с течением времени по мере развития лесного покрова (Poorter et al., 2019).

Квалиметрические свойства древесных волокон являются результатом комбинированного воздействия биотических и абиотических факторов, определяющих развитие деревьев (Zhu et al., 1998; Searson et al., 2004; Swenson, Enquist, 2007; Xiang, 2013; Tomczak et al., 2016). Из всех квалиметрических свойств, доступных для измерений, плотность древесины считается лучшим предиктором качества древесины, связанным с ее функциональными свойствами (Chave et al., 2009; Woodcock, Shier, 2002). Она варьирует в зависимости от региона

и древесного вида, причем близкородственные виды имеют мало различающуюся плотность древесины (Chave et al., 2009).

В высоких широтах севера Канады, в условиях низких запасов стволовой древесины, предполагалось, что их древесина обладает более высокими качествами, и это скомпенсирует потери от низких древесных запасов. Исследования проведены на пяти постоянных пробных площадях, распределенных между 48 и 53 параллелями в широтном и высотном градиентах хвойных лесов (Rossi et al., 2015). Вдоль стволов деревьев на разных высотах были взяты диски, на которых измерены ширина годичных колец и доля поздней древесины. Известно, что быстрый рост деревьев приводит к образованию древесины с низкой плотностью и более короткими волокнами (Zobel, van Buijtenen, 1989). Однако у разных древесных видов и в разных экотопах одного и того же вида были обнаружены различные и даже контрастные реакции свойств древесины на условия роста. Современные знания свидетельствуют о том, что скорость роста и основные свойства древесины, по-видимому, связаны с древесным видом и средой, в которой растут деревья, и ее трудно предсказать без специальных предварительных исследований (Rossi et al., 2015).

Исследованиями, проведенными на упомянутых пяти пробных площадях ели черной, установлено, что в направлении от сердцевины к коре, т.е. с увеличением камбиального возраста, на всех широтах увеличиваются плотность древесины, толщина клеточных стенок, длина и толщина волокон, доля поздней древесины, модуль упругости и модуль растяжения, при этом толщина клеточных стенок, значения модулей упругости и растяжения увеличиваются в широтном градиенте, т.е. в направлении с юга на север. Тем не менее сделан вывод, что потери от снижения запаса стволовой древесины в северном направлении не компенсируются повышением ее основных квалиметрических показателей (Rossi et al., 2015).

Общие тенденции изменения плотности древесины были проанализированы в связи с географической широтой, температурой и осадками (Howe, 1974; Kellomäki, 1979; Swenson, Enquist, 2007; Wiemann, Williamson, 2002; St-Germain et al., 2008). Было показано (Zhang, Shi, 2003), что географическое положение является определяющим фактором роста деревьев. Однако было высказано предположение, что лучшее понимание влияния экологических характеристик на свойства древесных волокон может быть достигнуто с помощью более сложного подхода, основанного на локальных структурных признаках, влияющих на физиологию дерева (Jacobs, Drew, 2002). Это требует дальнейшего понимания взаимосвязей между свойствами древесных волокон (СДВ) и переменными, влияющими на рост отдельных деревьев и древостоев (Blanchette et al., 2015).

Например, Х. Линдстрём (Lindström, 1996b) количественно определил зависимость между плотностью древесины и размерами кроны ($R^2 = 0.61$), а также между плотностью древесины и характеристиками древостоя, включая относительную высоту (stand density) и фактор прореживания ($R^2 = 0.95$). Деревья могут также реагировать изменением различных структурных признаков, таких как сбег ствола, размер и форма кроны, в ответ на различные локальные структурные факторы, в частности на конкуренцию между деревьями (Amarasekara, Denne, 2002), на прореживание (MacDonald, Hubert, 2002), на изменение возраста (Wilhelmsson et al., 2002), диаметра на высоте груди, высоты и густоты древостоя (Liu et al., 2007; van Leeuwen et al., 2011). В целом опубликованные результаты свидетельствуют о том, что локальные структурные характеристики обычно коррелируют со свойствами древесных волокон или другими предикторами качества древесины.

Оценка свойств древесных волокон требует разработки моделей, которые могут надежно их предсказывать в зависимости от ключевых факторов, влияющих на рост деревьев. Общую функцию, описывающую отношения между СДВ и наиболее важными факторами, можно определить следующим образом:

Учитывая сложность получения прямых измерений свойств древесных волокон, лишь немногие исследователи пытались их описать на ландшафтном уровне. В одном из таких исследований были нанесены на карту показатели плотности древесины на территории Северной и Южной Америки в зависимости от факторов окружающей среды, таких как температура и осадки (Chave et al., 2009). Пространственное распределение свойств древесных волокон было функцией видового разнообразия, встречающегося на больших географических градиентах. В другом исследовании (Lessard et al., 2014) для построения моделей прогнозирования внутривидовых свойств древесных волокон применена приведенная выше общая функция (17) на основе комбинации экологических и структурных переменных. Переменные среды включали географические и климатические показатели, полученные на основе цифровых моделей рельефа и пространственных обобщений данных метеорологических станций (McKenney et al.,

2011), тогда как структурные переменные были взяты с фотоинтерпретированных карт древостоев, которые обычно имеются в материалах лесоинвентаризации. Одним из ограничений были относительно нечеткие переменные древостоев, описывающие видовой состав, сомкнутость крон, высоту и класс возраста, оцененные с помощью фотоинтерпретации. Более точная информация о трехмерной структуре древостоев отсутствовала. Это ограничивало уровень структурной информации, которую можно было бы использовать для разработки моделей с целью картирования свойств древесных волокон в ландшафтном масштабе.

2.2. Теории формообразования ствола и их значение в объяснении изменчивости базисной плотности древесины

Начиная с конца XIX в., были проведены обширные и детальные исследования влияний видовой принадлежности деревьев, генотипа, географического положения, температуры и осадков, высоты над уровнем моря, добротности местопроизрастания, ценотического статуса и возраста дерева, а также лесоводственных мероприятий на формирование древесины и ее плотность (Schwendener, 1874; Metzger, 1893; Guttenberg, Müller, 1927; Klem, 1934; Spurr, Hsiung, 1954; Hildebrandt, 1954; Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955; Schniewind, 1962; Larson, 1969; Elliott, 1970; Uusvaara, 1974; Madsen et al., 1978, 1985; Howell et al., 1984; Chafe, 1987; Kyrkjeeide, 1990; Wang, Chen, 1992; Harris, 1993; Kučera, 1994; Koga et al., 1996; Briffa et al., 2002; Stener, Hedenberg, 2003; Repola, 2006; Baliuckienė, Baliukas, 2006; Al-Sagheer, 2010; Fundová, 2012; Liepiņš, Rieksts-Riekstiņš, Franceschini et al., 2013; Ramananantoandro et al., 2016; Tomczak et al., 2016; Viherä-Aarnio, Velling, 2017; Levkoev et al., 2017; Groot, Cortini, 2017; Šilinskas et al., 2020).

В обзоре X. Линдстрёма (Lindström, 1996а) показано, что исследования процессов формирования древесины базируются на четырёх основных теориях, ориентированных на связи данных процессов с развитием кроны. Объединяет эти теории формирования древесины то положение, что камбиальная активность ствола и структура древесины хвойных деревьев определяются развитием кроны и являются функцией:

- механических воздействий ветровой или гравитационной нагрузки (Schwendener, 1874; Metzger, 1893),
 - наличия элементов питания для камбия (Hartig, 1891),

Электронный архив УГЛТУ

- условий ксилемного транспорта (Jaccard, 1913) и
- гормональной регуляции роста (Larson, 1962).

Описывая основные положения названных теорий, П. Ларсон (Larson, 1963) полагает, что сбег ствола является результатом развития кроны или результатом адаптации хвойных деревьев к физиологическим и механическим требованиям, опосредованной через развитие кроны, в условиях постоянно меняющейся окружающей среды. Кратко рассмотрим суть теорий формообразования древесных стволов применительно к объяснению изменчивости базисной плотности древесины.

Механическая теория. Первая серьезная попытка объяснить процесс формирования древесины принадлежит С. Швенденеру (Schwendener, 1874), и позднее она была развита К. Мецгером (Metzger, 1893, 1908), П.Д. Козицыным (1909), С.В. Беловым (1974), Т. Константом с соавт. (Constant et al., 2003). Сбег ствола рассматривается как результат ветровой нагрузки, когда различные механические требования к изгибу ствола заставляют дерево принимать форму ствола, подобную брусу равного сопротивления изгибу. К. Метцгер (Metzger, 1893, 1908) утверждал, что изгиб ствола под действием ветровой нагрузки регулирует его сбег ниже уровня кроны в форме кубического параболоида. Позднее X. Грей (Gray, 1956) показал, что форма квадратичного параболоида более соответствует эмпирическим данным. На деревья разного ценотического положения ветровая нагрузка действует в разной степени, в результате чего деревьялидеры имеют больший сбег ствола по сравнению с угнетенными, которые вследствие высоко поднятой кроны имеют форму ствола, более близкую к цилиндрической (Petterson, 1927; Tiren, 1928; Büsgen, Münch, 1929; Klem, 1934; Baker, 1950; Burger, 1939, 1953; Assmann, 1961; Mattheck, 1991; Lindström, 1996a). Установлено, что древесные виды, произрастающие на ветреных территориях, как правило, имеют более плотную древесину, чем виды, характерные для защищенных от ветра местообитаний (Lawton, 1984).

Теория водной проводимости. П. Джаккард (Jaccard, 1913, 1915) утверждал, что сбег ствола и дифференцировка трахеид у хвойных регулируются ксилемным потоком, зависящим от транспирационной потребности кроны. Согласно П. Жаккарду, наблюдаемое изменение ширины одного и того же годичного кольца на разных высотах дерева вызвано необходимостью поддержания постоянной проводящей площади по всему стволу. В постепенно сужающейся кроне поток воды уменьшается пропорционально количеству транспирирующих ветвей.

В результате площадь поперечного сечения ствола пропорциональна количеству транспирирующих тканей, расположенных выше сечения. Поэтому доминирующие деревья с крупными ветвями имеют больший сбег, чем промежуточные и угнетенные деревья.

Однако имеются отклонения от теории водной проводимости вследствие того, что размер просвета трахеид изменяется внутри ствола с высотой дерева, причем более широкие просветы в зоне ранней древесины вблизи кроны и более узкие у основания ствола приводят к неравному сопротивлению движению воды внутри ствола. Доминирующие деревья с сильно транспирирующими кронами образуют трахеиды с большими просветами для улучшения адаптации к предполагаемому ксилемному потоку. Таким образом, предполагалось, что дифференцировка трахеид определяется общим тургорным давлением, оказываемым кроной дерева (Lindström, 1996a).

Было высказано сомнение в обоснованности модели водной проводимости, поскольку распределение масс в растении всегда далеко от оптимального, и фактическое распределение масс определяется исходя из обеспечения устойчивости растения под действием ветровой нагрузки (Taneda, Tateno, 2004).

Теория лимитирующих элементов в питании камбия утверждает, что различия в строении трахеид определяются взаимосвязями между транспирацией и ассимиляционными потребностями кроны дерева, что сказывается на соотношении ранней и поздней древесины. А доступность питательных веществ для сосудистого камбия рассматривается как основной вклад в толщину клеточной стенки и, соответственно, в показатель плотности древесины (Hartig, 1891, 1892a, 1892b, 1901; Hildebrandt, 1954; Vorreiter, 1954; Pechmann, Schaite, 1955; Trendelenburg, Mayer-Wegelin, 1955; Lindström, 1996a).

Гормональная теория. Было признано, что факторы, регулирующие рост, должны контролировать и активировать сосудистый камбий в сложной регулирующей системе крона — камбий (Büsgen, Münch, 1929; Went, Thimann, 1937; Davies, 2003). Согласно концепции гормональной регуляции роста, формирование древесины рассматривается как реакция сосудистого камбия на базипетальный (т.е. от вершины к основанию дерева) поток стимуляторов роста, продуцируемых в побегах, бутонах и ассимилирующих меристемах кроны дерева, а расстояние между сосудистым камбием и кроной дерева контролирует дифференциацию трахеид (Larson, 1969; Elliott, 1970). С этой точки зрения активность сосудистого камбия является пластическим ответом на количество гормонов и углеводов, вырабатываемых в

кроне. Камбиальная активность, в свою очередь, регулирует дифференциацию трахеид и изменение структуры древесины (Larson, 1962; Lindstrom, 1996a).

В вышеприведенном описании теорий формообразования ствола акцент сделан на объяснении изменчивости лишь базисной плотности и связанной с ней ширины годичного кольца, хотя они имеют более широкую биологическую направленность. Наиболее детально биологические аспекты теории формообразования древесных стволов рассмотрены в монографии Г.Б. Кофмана (1986), посвященной проблеме соотношения роста и формы деревьев, ознакомиться с которой можно по адресу: (https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/kofm/text.pdf).

2.3. Базисная плотность древесины ствола и ее связь с таксационными показателями и внешними факторами

Исследования показателей плотности древесины часто ограничиваются установлением среднего значения без анализа их изменений по определяющим факторам (Бюсген, 1961; Поздняков и др., 1969; Уткин, 1970; Usoltsev, 1971; Усольцев, 1973, 1975a; Götze et al., 1972; Поздняков, 1973; Технеряднов, Шоманов, 1976; Семечкина, 1978; Исаева, 1974, 1978; Смоляк и др., 1978; Успенский, 1980; Голиков, 1982; Singh, 1987; Bartelink, 1996; Détienne, Chanson, 1996; Мелехов и др., 2003; Todoroki et al., 2012; Johansson, 2013). Показатели базисной плотности, средние для древесного вида, имеются в соответствующих стандартах (Древесина..., 1962) и обзорных работах (Kennedy et al., 1968; Полубояринов, 1976a; Jessome, 1977; Nygård, Elfving, 2000; Chave et al., 2009; Zanne et al., 2009) и используются при оценках древесины как технологического сырья, а также при глобальных оценках углеродного цикла путем конверсии запасов стволовой древесины в углеродные пулы (Chave et al., 2005). В тропических лесах учет показателя базисной плотности значительно повышает точность оценок углеродного запаса и изменений углеродного баланса, и он считается вторым по значимости предиктором биомассы после диаметра ствола на высоте груди (Chave et al., 2005).

Но диаметр ствола, взятый в качестве единственной независимой переменной, объясняет лишь от 5 до 19 % изменчивости базисной плотности древесины в европейских лесах (Hakkila, 1979; Levkoev et al., 2017), а в дождевых лесах Мадагаскара — лишь доли процента (Ramananatoandro et al., 2016). Напротив, в плантациях *Bombacopsis quinata* Коста Рики диаметр ствола объяснял 49–50 % изменчивости

базисной плотности (Cordero, Kanninen, 2002). Анализ связи плотности древесины ρ_0 с высотой дерева показал для нескольких древесных видов Канады устойчивый отрицательный тренд (Singh, 1987), что связано с увеличением доли поздней древесины при ухудшении условий произрастания (Montagu et al., 2005), в данном случае опосредованных высотой дерева. С возрастом дерева (Молчанов, 1964; Erickson, Harrison, 1974; Андрущенко, 1977; Bhat, 1980; Ferm, 1993; Heräjärvi, 2004; Giagli et al., 2019) и с густотой древостоя Cariniana legalis в Бразилии (Oliveira et al., 2018), а также сосны и ели в Литве (Šilinskas et al., 2020) связь плотности древесины стабильно положительная, но у эвкалипта в Австралии – отрицательная (Montagu et al., 2005). Анализ базисной плотности 28 древесных видов Канады показал, что изменчивость локальной плотности (т.е. плотности древесины диска или керна) объясняется такими переменными, как относительная высота дерева и его возраст, на уровне от 5 до 55 %, а изменчивость средней для ствола плотности объясняется переменными возраста, высоты и диаметра на высоте груди на уровне от 1 до 34 % (Alemdag, 1984).

Оценка базисной плотности сосны обыкновенной по известным значениям «кажущейся» плотности, т.е. плотности свежесрубленной древесины, характеризовалась коэффициентом детерминации от 0,69 до 0,75 (Wang, 1998). Аналогичная оценка базисной плотности древесины ели европейской показала наличие коэффициента детерминации 0,60, а включение в качестве второй независимой переменной положения диска по высоте ствола практически не улучшило результата (Brännstöm, 2005).

На основании фактических данных о квалиметрии 18 древостоев березы разного возраста в Ленинградской области была рассчитана двухфакторная зависимость базисной плотности древостоев от их возраста и среднего диаметра, которая объясняла 36 % варьирования искомого показателя на 5 %-ном уровне значимости. При одном и том же значении среднего диаметра (и, соответственно, густоты) базисная плотность древесины увеличивается с возрастом, а при одном и том же значении возраста снижается по мере увеличения среднего диаметра и соответствующего снижения густоты древостоя. Эта двухфакторная зависимость объясняется снижением ширины годичного кольца как с увеличением возраста, так и с повышением густоты (Полубояринов, Давидов, 1975). При исследовании плотности древесины сосны в абсолютно сухом состоянии ρ_0 разного возраста и географического положения установлено совместное влияние названных фак-

торов на уровне 61 % при 5 %-ном уровне значимости. С возрастом плотность древесины увеличивается, достигая максимума в 110 лет ($\rho_0 = 542 \text{ кг/м}^3$), а затем снижается к возрасту 140 лет до 525 кг/м³ (Успенский, 1980). Увеличение базисной плотности древесины у эвкалипта с 414 до 501 кг/м³ было выявлено с увеличением возраста от 3 до 12 лет (Sseremba et al., 2020).

Исследование географической изменчивости плотности древесины актуально как в целях повышения точности оценки биологической продуктивности в климатических градиентах, так и при расчете норм расхода сырья и выхода продукции на предприятиях целлюлозно-бумажной продукции. Исследованиями зарубежных ученых установлено увеличение плотности 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).

В исследовании ели белой в Канаде был применен регрессионный анализ с учетом ключевых морфологических переменных, которые являются прогностическими для квалиметрии древесины. Ель белая в Канаде — это фенотипически пластичная древесная порода, растущая в сильно изменчивых условиях, как климатических, так и почвенных (Nienstaedt, Zasada, 1990). Её древесина высоко ценится в производстве целлюлозы благодаря длинным волокнам и в изготовлении пиломатериалов вследствие благоприятных механических свойств (Zhang, Koubaa, 2008). Было обнаружено, что рост и фенологические признаки связаны с клинальной (постепенной) изменчивостью в климатических и географических градиентах (Nienstaedt, Zasada, 1990; Li et al., 1997; Xiang, 2013).

В ряде работ изучалась изменчивость роста и плотности древесины ели белой в Западной (Yanchuk, Kiss, 1993; Ivkovich et al., 2002а) и Восточной Канаде (Corriveau et al., 1991). В исследовании, проведенном в естественных лесах провинции Квебек, были показаны региональные вариации плотности древесины (Corriveau et al., 1987), в других же работах сообщалось о генетической изменчивости длины волокон и прочности пиломатериалов на изгиб, изготовленных из древесины ели белой (Beaulieu et al., 2006), а также ее свойств при механической обработке (Hernandez et al., 2001) и в производстве шпона (Zhang et al., 2004). Однако в большинстве этих исследований отсутствовали данные о географической изменчивости свойств древесины ели белой.

Было высказано предположение, что более глубокое понимание закономерностей и причин изменения свойств древесины в различных регионах будет способствовать оптимизации использования древесины и установлению ее реальной ценности (Lenz et al., 2014). С этой целью у 495 деревьев в 30-летней плантации ели белой в Канаде были измерены высоты деревьев и размеры живой кроны, а также количество и диаметр живых ветвей в выбранных мутовках. Квалиметрические признаки древесины оценивались по взятым кернам с помощью технологии SilviScan. Установлено, что морфологические признаки объясняли почти 29 % общей изменчивости квалиметрических свойств, однако уровень корреляций и способность морфологических признаков кроны прогнозировать свойства древесины сильно различались. Средняя ширина кольца и радиальный диаметр клеток, связанные с приростом древесины, хорошо коррелировали с морфологией дерева, тогда как признаки, связанные с субклеточной структурой, как, например, угол микрофибрилл, были слабо коррелированы. Эти результаты послужили ориентиром при выборе квалиметрических признаков древесины для совершенствования методов инвентаризации и оптимизации процесса лесовыращивания (Lenz et al., 2012).

В другом исследовании ели белой в Канаде были проанализированы квалиметрические характеристики деревьев из 13 экорегионов и были выявлены климатические и географические переменные, а также таксационные показатели деревьев, дающие возможность прогнозировать квалиметрические показатели древесины в новых подходах к инвентаризации лесов. Для определения признаков древесины, которые связаны с ее анатомией и использованием древесины в конечных продуктах, было взято 111 дисков ствола. Полученные результаты свидетельствовали о существенных различиях между экорегионами по большинству исследуемых признаков древесины. Образцы из нескольких прибрежных районов показали, например, анатомические свойства древесины, которые являются предпочтительными для некоторых сортов целлюлозы и бумаги, но дают сравнительно слабые возможности в использовании изделий механической обработки. Максимальная температура воздуха, географическое положение, высота и диаметр ствола дерева оказались важными прогностическими переменными для квалиметрии деревьев, объясняющими от 13 до 59 % их общей изменчивости (Lenz et al., 2014).

На глобальном уровне сделан анализ изменчивости базисной плотности 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 °C), объясняя 80 % изменчивости искомого показателя, по сравнению со всем исследуемым температурным диапазоном с объясненной изменчивостью 62 % или по сравнению с теплыми тропическими районами (> 23°C) 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 %). По мере увеличения среднегодовой температуры в умеренной зоне максимальная величина базисной плотности возрастала, а минимальная оставалась постоянной, что приводило к увеличению диапазона плотности, но величина стандартного отклонения оставалась постоянной. В теплой тропической зоне по сравнению с зоной умеренных лесов и диапазон плотности, и стандартное отклонение резко возрастали, показывая тем самым, что изменчивость плотности в теплых тропиках намного больше, чем можно было ожидать, исходя только из большего видового разнообразия (Wiemann, Williamson, 2002).

2.4. Базисная плотность древесины ствола и ее парная связь с базисной плотностью на высоте груди

С практической точки зрения изначально представляла интерес возможность определения средней плотности древесины растущего дерева с использованием легко измеряемых значений в локальных сечениях ствола. Начиная с первых исследований плотности древесины в XIX и начале XX столетия, ее пытались связать с шириной годичного кольца, но какой-либо значимой зависимости не было обнаружено (Bauschinger, 1887; Janka, 1904; Богословский, 1915; Терлецкий, 1927). Однако была установлена прямо пропорциональная связь плотности с процентным содержанием поздней древесины, и объяснялось это тем, что осенние сосуды и трахеиды имеют более толстые стенки, чем весенние, и несут преимущественно механические функции (Schwappach, 1897; Яхонтов, 1913; Бюсген, 1961).

В более поздних исследованиях связь базисной плотности с шириной годичного кольца обычно была статистически значимой (Liepiņš, Rieksts-Riekstiņš, 2013). Имеются даже рекомендации использовать показатели базисной плотности в качестве идентификато-

ра темпов роста того или иного вида в тех случаях, когда данные о годичном приросте древесины недоступны. Основанием подобных рекомендаций служит выявленный тренд: в сомкнутых древостоях виды с низкой плотностью древесины обычно являются первопроходцами, промежуточными значениями плотности обычно обладают спелые древостои, а исключительно высокие ее значения часто относятся к медленно растущим в подпологе видам (Wiemann, Williamson, 2002).

Однако имеются и прямо противоположные заключения. Исследованиями, проведенными в Португалии в естественных 40–110-летних древостоях дуба португальского, не было выявлено статистически значимой взаимосвязи между базисной плотностью годичного кольца и его шириной. Это позволило сделать вывод, что выполнением одних и тех же лесоводственных мероприятий и селекционных программ можно одновременно получить два взаимоисключающих результата, т.е. повысить как годичный прирост, так и базисную плотность годичного кольца (Sousa et al., 2018).

В последующих исследованиях анализ изменчивости плотности в пределах ствола дерева показал, что между средней плотностью всего ствола и плотностью на отдельных его уровнях существуют довольно тесные корреляции (Hakkila, 1966; Исаева, 1978; Dobrowolska et al., 2020). Было установлено, что плотность стволовой древесины у сосны, ели и березы на высоте 25 % от общей высоты дерева равна средней плотности древесины всего ствола (Nylinder, 1961; Hakkila, 1966, 1979), а на высоте 10 % от общей высоты локальная плотность древесины выше средней ее плотности у сосны и ели соответственно на 7 и 2 % (Nylinder, 1961). Обычно плотность древесины на высоте груди выше средней плотности древесины ствола на 2–6 % (Hakkila, 1979), но между ними существует довольно тесная корреляция, дающая возможность по значению плотности древесины, полученному путем взятия кернов, рассчитать плотность древесины всего ствола (Столяров и др., 1988).

С целью выявить количество кернов, необходимых для обеспечения требуемой точности оценки базисной плотности древесины, был выполнен специальный анализ, проведенный на данных 50 деревьев сосны ладанной. Взято по три керна, развернутых в тангентальном направлении на 120°, и установлено, что увеличение количества кернов сверх одного не повышает точности оценки искомого показателя (Zobel, Rhodes, 1955).

Путем анализа 100 модельных деревьев, взятых у каждой из четырех южных сосен в штате Миссисипи, США, установлено, что изменчивость плотности древесины керна превышает таковую всего диска в том же сечении (Wahlgren, Fassnacht, 1959). Расчет зависимости плотности диска от плотности керна, описываемой гиперболической функцией, показал наличие коэффициента детерминации для сосен ладанной, короткохвойной, длиннохвойной и Эллиота соответственно 0,49; 0,52; 0,37 и 0,36. Аналогичной формы зависимость базисной плотности всего ствола от базисной плотности керна на высоте груди объясняла 53, 47, 41 и 25 % изменчивости искомого показателя со средними значениями 597, 641, 692 и 677 $\kappa \Gamma/M^3$ соответственно. Включение в качестве второй независимой переменной произведения плотности керна на возраст дерева и среднего годичного прироста на высоте груди повысило коэффициент детерминации на 14-16 %. У всех четырех сосен обнаружено монотонное снижение базисной плотности в направлении от основания ствола к вершине (Wahlgren, Fassnacht, 1959).

Изучение изменчивости базисной плотности древесины ствола по уравнению связи с базисной плотностью керна у ладанной и короткохвойной сосен в штате Иллинойс по данным соответственно 39 и 47 модельных деревьев (Gilmore et al., 1961) показало наличие коэффициента детерминации уравнений 0,64 и 0,50, более высоких по сравнению с коэффициентами детерминации 0,53 и 0,47 уравнений этих же видов в штате Миссисипи (Wahlgren, Fassnacht, 1959). В штате Джорджия по данным 79 и 100 деревьев сосен длиннохвойной и Эллиота были получены другие значения коэффициента детерминации при той же структуре уравнения: 0,54 и 0,53 соответственно. При увеличении числа взятых кернов на высоте груди до четырех коэффициенты детерминации возросли соответственно до 65 и 55 % (Taras, Wahlgren, 1963).

Еще более высокие коэффициенты детерминации были показаны для ельника-кисличника и хвощево-сфагнового ельника в Ленинградской области О.И. Полубояриновым (1976а), который получил линейную зависимость средней плотности ствола от плотности древесины керна на высоте груди, объясняющую соответственно 88 и 92 % изменчивости искомого показателя. Различие названных зависимостей было выявлено не только между типами леса, но и между древостоями разной густоты. При этом показатель детерминации составил для редких и густых ельников соответственно 0,89 и 0,88.

Мы видим, что адекватность одной и той же зависимости для ельников России оказалась существенно выше, чем для южных сосен США. Причина различия может быть в том, что в ельниках анализировались данные модельных деревьев на одной пробной площади, а в сосняках — на нескольких пробных площадях разного возраста и разных экологических условий. В первом случае модель учитывала лишь ценотические условия в пределах пробной площади, а во втором неучтенное влияние возраста и условий произрастания повысило долю необъясненного варьирования искомого показателя.

2.5. Базисная плотность древесины ствола и ее многофакторная связь с базисной плотностью на высоте груди и другими показателями

Задача исследования базисной плотности древесины деревьев и древостоев в ресурсоведческом плане состоит в разработке принципов многомерного подхода к объяснению ее возрастной и экологической изменчивости с реализацией этого подхода на конкретных примерах. Обычно они выполняются на уровне регрессионных моделей с включением одного или нескольких определяющих факторов в качестве независимых переменных (Усольцев, 1988; Lindstrom, 1996 a, b, c; Rozenberg et al., 2001; Bouriaud et al., 2004; Repola, 2006; Jyske et al., 2008; Henry et al., 2010; Skovsgaard et al., 2011; Iida et al., 2012; Pospieszyńska et al., 2018). В уравнениях связи показателя базисной плотности древесины ствола с соответствующим показателем керна в качестве дополнительных независимых переменных исследователи включали различные характеристики модельных деревьев, из которых наиболее значимой переменной чаще всего оказывался диаметр ствола на высоте груди, и соответственно рассчитывались двухфакторные модели. Однако сравнительный анализ одно- и двухфакторных линейных уравнений для базисной плотности ствола шести древесных видов западной части США (Maeglin, Wahlgren, 1972) показал, что для сосен сахарной и скрученной и ели Энгельмана введение в уравнение диаметра ствола дополнительно к базисной плотности керна не повышает коэффициента детерминации, а наибольший вклад диаметра ствола в дополнительное объяснение изменчивости искомого показателя выявлен у сосен желтой и западной (табл. 2).

Анализ многофакторной связи базисной плотности ствола с географическими независимыми переменными (широта, долгота, высота над ур. м. и ориентация склона) показал, что в совокупности они

Электронный архив УГЛТУ

объясняют 29 % общей изменчивости искомого показателя, а из парных связей наиболее тесная связь выявлена с географической долготой, объяснившей 13 % изменчивости (Maeglin, Wahlgren, 1972). Анализ парных связей базисной плотности диптерокарпа *Dipterocarpus indicus* в Индии с широтой, долготой, высотой над ур. м., годичными осадками и температурой показал, что они объясняют соответственно 35, 29, 28, 38 и 22 % изменчивости искомого показателя (Al-Sagheer, Prasad, 2010).

Таблица 2

Средние значения базисной плотности ствола и коэффициенты детерминации для одно- и двухфакторных линейных уравнений зависимости базисной плотности древесины ствола от базисной плотности керна и диаметра ствола для шести древесных видов западной части США (Maeglin, Wahlgren, 1972)

		Среднее	Коэффициент детерминации		
	Число мо-	значение	уравнения при независимых переменных		
Древесный вид	дельных	ρ_{δ} ствола,			
	деревьев	кг/м ³	$ ho_{\it 6}$ керна	$ ho_{\delta}$ керна и диаметр	
				ствола	
Сосна желтая	364	370	0,58	0,62	
С. сахарная	109	340	0,71	0,71	
С. западная	62	360	0,49	0,62	
С. скрученная	213	380	0,75	0,75	
Ель Энгельмана	260	350	0,69	0,69	
Кедр западный	153	320	0,42	0,43	
Итого	1161	_	-	-	

Исследование фенотипических корреляций между базисной плотностью 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 базисной плотности на 0,006 г/см³ (Levkoev et al., 2017). Модифицирование широты было вызвано невозможностью в данном случае непосредственно оценить влияние высоты над уровнем моря на изучаемые признаки, и широта местности была скорректирована путем введения высотно-климатической поправки в предположении, что каждое увеличение высоты над ур. м. на 100 м соответствует сдвигу широты на один градус к северу (Laaksonen, 1976).

В Финляндии П. Хаккила (Hakkila, 1979) построил уравнения регрессии для прогнозирования средней плотности ствола сосны, ели и березы на основе плотности древесины керна, измеренной на высоте груди, а также таких характеристик дерева, как диаметр ствола, высота, возраст дерева и их сочетания. Результаты сведены в табл. 3. Из сопоставления данных табл. 2 и 3 видно, что базисная плотность керна объясняет у древесных видов Финляндии большую долю общей изменчивости древесины ствола по сравнению с древесными видами США, а из древесных видов Финляндии большая доля изменчивости выявлена у ели. Последний феномен связан с различной степенью изменчивости локальных значений базисной плотности вдоль по стволу: наименьшей у ели и наибольшей у сосны и березы (Hakkila, 1979). Возможно, меньшие показатели детерминированности уравнений парной связи у видов США по сравнению с таковыми у видов Финляндии связаны с большей изменчивостью локальных значений в США.

Таблица 3

Средние значения базисной плотности ствола и коэффициенты детерминации для одно- и двухфакторных линейных уравнений зависимости базисной плотности древесины ствола от базисной плотности керна и нескольких дендрометрических показателей ствола для трех древесных видов Финляндии (Hakkila, 1979)

Древесный вид	Число модель- ных деревьев	Среднее значение $\rho_{\tilde{o}}$ ствола, $\kappa \Gamma / M^3$		рициент детерминации ения при независимых переменных $ ho_{\delta}$ керна и дендрометрические показатели ствола
Сосна обыкновенная	785	409	0,78	0,82
Ель европейская	751	387	0,86	0,88
Береза белая	559	489	0,77	0,84
Итого	2095	-	-	-

После ввода в модели для названных трех древесных видов Финляндии в качестве независимых переменных дендрометрических показателей деревьев и широтной зональности, выраженной числом дней вегетационного периода (в интервале от 120 дней на севере до 175 дней на юге Финляндии), было установлено, что при одних и тех же дендрометрических показателях деревьев базисная плотность древесины сосны существенно возрастает в направлении с юга на

север вследствие повышения доли поздней древесины, а у ели и березы закономерности оказались слабо выраженными (Hakkila, 1979).

Результаты исследований в штате Миссисипи, показанные выше (Wahlgren, Fassnacht, 1959), позднее были скорректированы на основе привлечения более полных фактических данных в количестве 25 тыс. модельных деревьев южных сосен, в том числе ладанной – 12, короткохвойной – 8, длиннохвойной – 2,4 и Эллиота – 2,3 тыс. (Wahlgren, Schumann, 1975). Кроме возросшего объема исходных данных, модели были дополнены второй независимой переменной – диаметром на высоте груди. Коэффициенты детерминации оказались существенно более высокими по сравнению с результатами, полученными в штате Миссисипи для тех же древесных видов (Wahlgren, Fassnacht, 1959): соответственно 61, 55, 58 и 45 %, а средние значения более низкими: 470, 470, 530 и 530 кг/м³ соответственно (Wahlgren, Schumann, 1975).

В Калифорнии (США) по материалам 1402 модельных деревьев 9 лесообразующих видов были рассчитаны линейные 2-факторные зависимости базисной плотности древесины ствола от базисной плотности древесины керна, взятого на высоте груди, и диаметра ствола на высоте груди, объясняющие от 44 (лиственница западная) до 70 % (тсуга западная) изменчивости искомого показателя. Его средние значения варьировали от 310 (тополь волосистоплодный) до 480 кг/м³ (лиственница западная) (Wahlgren, 1965). В штате Висконсин по материалам 635 модельных деревьев 10 лесообразующих видов аналогичные двухфакторные регрессии объяснили от 46 (пихта бальзамическая) до 72 % (тополь осинообразный) изменчивости искомого показателя со средними значениями, варьирующими от 342 (пихта бальзамическая) до 500 кг/м³ (лиственница американская) (Maeglin, 1973).

2.6. Основные факторы, влияющие на базисную плотность ствола в связи с развитием кроны

Считалось, что крона дерева играет определяющую роль в формировании качественных характеристик древесины, поскольку качество древесины является результатом биологического процесса ее формирования, который, в свою очередь, регулируется физиологическими процессами, протекающими в листве (Larson, 1969). Однако в отношении ряда свойств древесных волокон было проведено очень мало исследований, в частности о взаимосвязи между характеристиками кроны и качеством древесины (Lindström, 1996а).

Установлено, что ширина годичного кольца тесно связана с увеличением массы листьев у сосны черной, но связь плотности древесимодуля упругости с массой листьев довольно (Amarasekara, Denne, 2002). В древостоях сосны обыкновенной, выращенной при разных режимах формирования, расстояние до зеленой кроны и доля зеленой кроны в моделях для ряда свойств волокон были значимыми предикторами (Eriksson et al., 2006). У сосны скрученной и ели Энгельмана переход от ювенильной к спелой древесине и соответствующее изменение ее плотности были связаны с протяженностью кроны, положением относительно основания кроны и возрастом дерева (Mansfield et al., 2007; 2015). У сосны смолистой адекватность зависимости плотности годичных колец на высоте груди от размеров кроны повышалась с возрастом дерева (Larocque, Marshall, 1995).

Накопленные в Канаде данные многочисленных экспериментов с различной густотой посадки и разной интенсивностью прореживаний дали возможность на основе различных характеристик крон установить связь свойств волокон с соответствующими параметрами крон, обусловленными различными лесоводственными мероприятиями и получаемыми путем дистанционного зондирования. Однако текущие значения плотности древесины не были связаны с характеристиками кроны; вместо этого установлено, что плотность древесины регулируется гидравлическими и биомеханическими ограничениями. Совершенствование технологии дистанционного зондирования и связанных с ней исследований (Leckie et al., 2003; Coops et al., 2004, Wulder et al., 2008) дает возможность получить более надежные закономерности (Kuprevicius, 2011; Groot et al., 2015).

Взаимосвязь между развитием кроны, распределением прироста и базисной плотностью в одновозрастных древостоях. Развитие кроны и сбег ствола были изучены применительно к кроновому отношению, т.е. проценту кроны как отношению длины кроны к высоте дерева (Petrini, 1921; Jonson, 1927; Gevorkiantz, Hosley, 1929; Kramer, 1962, 1966; Kuprevicius, 2011). Для одновозрастных еловых древостоев было показано, что возраст и густота древостоя, а также интенсивность его прореживания влияют на длину кроны, расстояние до нижней живой ветви и сбег ствола (Hagberg, 1942; Kramer, 1962, 1966), что подтверждает предпосылки, лежащие в основе рассмотренных теорий формообразования, а именно: развитие кроны является детерминантой активности сосудистого камбия и, следовательно, распределения прироста по высоте и диаметру на уровне дерева и древостоя.

Тем самым высота дерева и сбег ствола, наблюдаемые в результате развития кроны, коррелируют с процессом формированием древесины (Lindström, 1996a).

Установлено, что угнетенные и промежуточные деревья имеют меньшее соотношение между длиной кроны и высотой дерева по сравнению с доминирующими деревьями, поскольку в густых древостоях основания крон расположены выше, чем в более редких древостоях того же возраста. В итоге угнетенные деревья имеют более высокую базисную плотность, чем согосподствующие и господствующие (Hartig, 1892a, 1892b; Burger, 1939, 1953; Schultze-Dewitz, 1960; Kirkkainen, 1984; Kyrkjeeide, 1990; Johansson, 1993; Lindström, 1996b; Tomczak et al., 2016)

Средний сбег стволов в древостое как индикатор его густоты. Установлено, что средний сбег стволов отражает степень конкуренции крон деревьев, возрастающей по мере увеличения густоты (Schotte, 1912; Petrini, 1921; Gevorkiantz, Hosley, 1929; Klem, 1934; Klem et al., 1945; Langsaeter, 1941; Hagberg, 1942; Gevorkiantz, 1944; Wiksten, 1960; Assmann, 1961, 1970; Li et al., 2012). А. Гуттенберг и Дж. Мюллер (Guttenberg, Müller, 1927) показали, что в одновозрастном древостое сбег ствола уменьшается, когда после смыкания крон начинается формирование сплошного полога с последующей дифференциацией деревьев по размеру крон и, соответственно, по степени сбежистости стволов (Gevorkiantz, Hosley, 1929; Baker, 1950; Kramer, 1962, 1966; Newnham, 1965; Assmann, 1970; Kyrkjeeide, 1990). Однако между 20 провениенциями лиственницы европейской в Польше не было выявлено различий по степени сбежистости ствола (Socha, Kulej, 2007).

Влияние развития кроны на ширину годичного кольца. В результате камбиальной активности величина радиального прироста зависит от размера кроны, ее жизнеспособности и расстояния между кроной дерева и сосудистым камбием. Любые изменения в развитии кроны отражаются на сбеге ствола, ширине годичного кольца и структуре древесины (Guttenberg, Müller, 1927; Klem, 1934; Klem et al., 1945; Burger, 1939, 1953; Gevorkiantz, 1944; Gray, 1956; Schultze-Dewitz, 1960; Larson, 1963, 1969; Kramer, 1966; Elliott, 1970; Brazier, 1977; Kramer, Kozlowski, 1979; Kyrkjeeide, 1990; Kucera, 1994; Kuprevicius, 2011).

Влияние прореживания и удобрений на развитие кроны и базисную плотность. Установлено, что лесоводственные мероприятия, такие как выбор начальной густоты посадки (Klem, 1942; Persson, 1975;

Moltesen et al., 1985; Oliveira et al., 2018), обрезка ветвей, прореживание (Hildebrandt, 1954; Ericson, 1966; Madsen et al., 1978) и удобрение (Madsen et al., 1985), влияют на развитие кроны, сбег ствола, ширину годичного кольца и структуру древесины, и регулирование развития кроны с помощью лесоводственных мероприятий влияет на базисную плотность (Larson, 1969; Brazier, 1977; Kramer, Kozlowski, 1979; Moltesen et al., 1985; Zobel, van Buijtenen, 1989; Kyrkjeeide, 1990; Thörnqvist, 1993; Kucera, 1994). Лесоводственные мероприятия, способствующие ускоренному развитию кроны, формируют деревья с большей конусностью ствола и меньшей базисной плотностью (Kyrkjeeide, 1990; Thörnqvist, 1993; Lindström, 1996 a, b). Хотя сама по себе высокая скорость роста не связана с квалиметрией древесины, неограниченное развитие кроны оказывает определяющее влияние на активность сосудистого камбия до смыкания крон и при последующей их конкуренции. Это является регулятором камбиальной активности, дифференциации трахеид и, следовательно, базисной плотности (Larson, 1963, 1969; Elliott, 1970).

Несмотря на различия теорий формирования ствола, они рассматривают развитие кроны в качестве главного регулятора структуры древесины и базисной плотности. Однако в моделях, предсказывающих базисную плотность, почти исключительно использовались косвенные показатели развития кроны, а именно сбег ствола и ширина годичного кольца. Для прогнозирования базисной плотности более предпочтительны модели, которые включали бы переменные, прямо связанные с развитием кроны (Lindström, 1996а).

Это намерение X. Линдстрём реализовал в специальном эксперименте на 35-летних еловых культурах, заложенных в центральной Швеции из семян одного происхождения с несколькими вариантами удобрений и прореживаний (Lindström, 1996b). Разнообразие доз, видов удобрений и их сочетаний обеспечило большое варьирование скоростей роста деревьев в увязке с развитием их крон и соответствующими изменениями базисной плотности, а прореживания дали возможность выявить влияние разных темпов развития крон на квалиметрию древесины.

Основное внимание было уделено следующим соотношениям:

- базисная плотность сбег ствола,
- базисная плотность средняя ширина годичного кольца,
- средняя ширина годичного кольца внешние характеристики дерева и переменные древостоя,

- базисная плотность — внешние характеристики ствола и переменные древостоя.

Переменные, использованные при построении регрессионных моделей для 35-летних еловых культур. Влияние прореживания на плотность древесины Б. Эриксон (Ericson, 1966) предложил учитывать с помощью коэффициента селективного прореживания α , определяемого как отношение площади сечений на высоте груди удаленных деревьев к аналогичной площади сечений оставляемых деревьев. Х. Линдстрёмом (Lindström, 1996b) для оценки общего эффекта прореживания применен модифицированный коэффициент, рассчитанный как коэффициент прореживания 1982 г., умноженный на коэффициент прореживания 1988 г., т. е. $\alpha_{\text{tot}} = \alpha_{1982} \alpha_{1988}$.

Средняя ширина годичного кольца рассчитана путем деления диаметра без коры на двукратное число годичных колец. Объем образца при расчете базисной плотности определен методом вытеснения воды. Под плотностью (густотой) древостоя понимается, согласно модифицированному предложению Ф. Бейкера (Baker, 1950), отношение средней высоты к среднему диаметру (Нср/Dср), т. е. то, что в русскоязычной литературе называется относительной высотой древостоя (Медведев, 1910). Сбег ствола, в понимании Х. Линдстрёма (Lindström, 1996 b), определяется отношением высоты дерева к его диаметру на высоте груди, что в русскоязычной литературе называется относительной высотой дерева (Медведев, 1910; Нагимов, 1999). При анализе результатов исследования X. Линдстрёма (Lindström, 1996b) 35-летних культур ели европейской под плотностью древостоя (stand density) в дальнейшем будем иметь в виду относительную высоту древостоя (Hcp/Dcp), а под сбегом (stem taper) – относительную высоту дерева (H/D).

Получены следующие регрессионные модели для культур ели европейской:

- линейная зависимость базисной плотности на высоте груди от логарифма относительной высоты дерева, объясняющая 51 % общего варьирования искомого показателя (Lindström, 1996b);
- линейная зависимость базисной плотности на высоте груди от средней ширины годичного кольца на высоте груди, объясняющая 61 % общего варьирования искомого показателя (Lindström, 1996b);
- нелинейная зависимость базисной плотности на высоте груди от средней ширины годичного кольца там же, предложенная П. Олесеном (Olesen, 1976, 1977) и объясняющая 50 % общего варьирования искомого показателя (Lindström, 1996c); для сравнения: аналогичного

Электронный архив УГЛТУ

вида гиперболическая зависимость базисной плотности древесины всего ствола от средней ширины годичного кольца на высоте груди, выведенная для культур ели в Дании и Швеции, объясняет лишь 26 % варьирования искомого показателя (Bergstedt, Olesen, 2000);

- многофакторная линейная зависимость средней ширины годичного кольца на высоте груди от высоты дерева, диаметра ствола на высоте груди в коре, класса бонитета древостоя, относительной высоты древостоя и коэффициента селективного прореживания, объясняющая 95 % общего варьирования искомого показателя; при этом из 6 регрессионных коэффициентов 5 значимы на уровне $P \le 0,001$ и лишь один на уровне $P \le 0,05$ (Lindström, 1996b);
- многофакторная линейная зависимость средней ширины годичного кольца на высоте груди от камбиального возраста (cambial age номер годичного кольца в направлении от сердцевины к коре), класса бонитета древостоя, класса Крафта, густоты посадки, коэффициента селективного прореживания, средней летней температуры, средних летних осадков и их сочетаний, объясняющая 63 % общего варьирования искомого показателя; при этом из 16 регрессионных коэффициентов 10 значимы на уровне $P \le 0,001, 2$ на уровне $P \le 0,01, и$ 4 на уровне $P \le 0,05$ (Lindström, 1996c);
- линейная зависимость базисной плотности отдельного годичного кольца от относительной высоты дерева на момент формирования кольца, объясняющая 28 % общего варьирования искомого показателя (Lindström, 1996c);
- линейная и полулогарифмическая зависимости базисной плотности отдельного годичного кольца от его ширины, объясняющие соответственно 33 и 41 % общего варьирования искомого показателя (Lindström, 1996c);
- линейная зависимость базисной плотности отдельного годичного кольца от его ширины и камбиального возраста на момент формирования кольца, объясняющая 53 % общего варьирования искомого показателя (Lindström, 1996c);
- многофакторная линейная зависимость базисной плотности на высоте груди от высоты дерева, коэффициента селективного прореживания и произведения высоты дерева на диаметр ствола на высоте груди, объясняющая 68% общего варьирования искомого показателя; при этом все регрессионные коэффициенты значимы на уровне $P \leq 0,001$ (Lindström, 1996b).

Следует отметить, что эксперимент с 35-летними культурами ели европейской был изначально спланирован с целью оптимизиро-

Электронный архив УГЛТУ

вать условия получения максимального запаса стволовой древесины и фиксировались лишь переменные, необходимые для решения исходной задачи. Для оценки взаимосвязи базисной плотности с развитием кроны этих переменных оказалось недостаточно, и в регрессионные модели X. Линдстрёму пришлось включать косвенные переменные, связанные с развитием кроны, а не прямые измерения длины, ширины и фитомассы кроны.

Перспектива повышения точности модели будет зависеть от того, какой вид базисной плотности мы прогнозируем. Очевидно, что гораздо легче объяснить варьирование между древостоями, чем между деревьями, а еще легче объяснить ее варьирование внутри дерева. Одно из возможных объяснений этого явления состоит в том, что генетическая изменчивость при усреднении показателя для древостоя значительно меньше, чем фактическая генетическая изменчивость на уровне деревьев. Средние характеристики древесины на уровне деревостоя легче предсказуемы, чем характеристики древесины на уровне дерева и внутри дерева (Lindström, 1996с; Bergstedt, Olesen, 2000).

На точность прогностической модели для базисной плотности и на различия результатов разных исследователей влияет также способ определения базисной плотности всего ствола по известным локальным (секционным) значениям. Можно, например, рассчитать среднюю базисную плотность с использованием объема ствола, рассчитанного по взвешенным секционным сечениям ствола (Ericson, 1966; Hakkila, 1966), или непосредственно по площади, находящейся ниже графика зависимости «кусочных», или секционных, значений базисной плотности от расстояния сечения от основания ствола (Bergstedt, Olesen, 2000).

В работе Х. Линдстрёма (Lindström, 2000), выполненной в естественных древостоях ели европейской в Швеции, было взято 104 дерева в возрасте от 51 до 152 лет, у которых на 4 дисках, выпиленных на равном расстоянии вдоль по стволу (всего 277 дисков), и у всех дисков в радиальном направлении вырезаны 1597 сегментов толщиной 2 см. Получены следующие регрессионные модели для естественных древостоев ели европейской, учитывающие положение сегмента вдоль по радиусу сечения ствола, но игнорирующие его положение по высоте:

- 2-факторная линейная зависимость базисной плотности от логарифма ширины годичного кольца в пределах сегмента и расстояния от сегмента до сердцевины, деленного на камбиальный возраст, объясняющая 37 % общего варьирования искомого показателя, при этом

оба регрессионных коэффициента значимы на уровне $P \leq 0{,}001$ (Lindström, 2000); вторая из названных переменных представляет среднюю ширину годичного кольца на участке от сердцевины до сегмента;

- 4-факторная линейная зависимость базисной плотности от индекса увлажнения Мартона (Eriksson, 1986), расстояния от сегмента до сердцевины, деленного на диаметр ствола без коры в данном сечении, географической широты и диаметра ствола на высоте груди, деленного на возраст дерева, объясняющая 40 % общего варьирования искомого показателя, при этом все регрессионные коэффициенты значимы на уровне Р ≤ 0,001 (Lindström, 2000);
- 4-факторная линейная зависимость базисной плотности от логарифма ширины годичного кольца в пределах сегмента, средней ширины годичного кольца на участке от сердцевины до сегмента, индекса увлажнения Мартона и географической широты, объясняющая 51 % общего варьирования искомого показателя, при этом все регрессионные коэффициенты значимы на уровне P ≤ 0,001 (Lindström, 2000).

В приведенных трех моделях влияние высоты дерева или положения диска вдоль по стволу не было включено в качестве независимых переменных, поскольку они обычно учитываются при оценке базисной плотности всего сечения диска. Известно, что вдоль по стволу количество годичных колец уменьшается, а их средняя ширина имеет тенденцию к увеличению, и обе эти переменные коррелируют с базисной плотностью. В данном случае, где каждый диск разделен на 2-сантиметровые сегменты, изменения в структуре годичного кольца на разных высотах ствола были несущественными (Lindström, 2000).

Последнюю из трех моделей, как наиболее адекватную фактическим данным, Х. Линдстрём (Lindström, 2000) интерпретирует следующим образом: два дерева могут иметь одинаковые значения средней ширины годичного кольца в данном сегменте и средней ширины годичного кольца на участке от сердцевины до сегмента, но в разных лесорастительных условиях структура их трахеид в данном сегменте будет различаться. Разные значения базисной плотности в данном случае могут быть результатом разной толщины клеточной стенки и (или) разного среднего диаметра трахеид.

В упомянутых трех моделях в лучшем случае 49 % изменчивости базисной плотности остаются необъясненными и для повышения их точности необходимо учитывать генетическую составляющую, формовое разнообразие, вид лесоводственного мероприятия, биопотенциал дерева как характеристику его физиологического состояния,

условия роста и развития деревьев и древостоев. Но чтобы иметь практическую ценность, получение этих дополнительных переменных должно быть экономически оправданным. Х. Линдстрём (Lindström, 2000) задает вопрос: возможен ли здесь компромисс или же существует множество препятствий? И оставляет этот вопрос открытым.

2.7. Базисная плотность как дополнительный фактор при оценке фитомассы деревьев и древостоев в тропических лесах

Поскольку в тропических лесах на одном гектаре может произрастать несколько сотен видов деревьев, показатель плотности древесины используется в качестве одного из важных предикторов при оценке их фитомассы (Fayolle et al., 2013). М. Кэннел (Cannell, 1984) пробные площади сформированной им базы данных (Cannell, 1982) распределил в группы с разной долей массы кроны в надземной фитомассе и рассчитал уравнения

$$Pa = F H G \rho_{\delta} , \qquad (18)$$

где Pa — надземная фитомасса древостоя, F — видовое число дерева (вместе с кроной), H — высота дерева, G — сумма площадей сечений древостоя, ρ_{δ} — базисная плотность древесины ствола. Коэффициенты регрессии были наименьшими в группах, имеющих наименьший процент фитомассы ветвей, и наибольшими в группах, имеющих повышенную долю массы ветвей. Видовое число, равное 0,5, соответствовало группам, имеющим 5–10 % ветвей, но широколиственные древостои с сильно разветвленной кроной имели видовое число 0,6–0,8, а у гевеи, имеющей в массе 81 % ветвей, оно превышало 1 (Cannell, 1984; Colgan et al., 2014).

Поскольку в дождевых лесах высота дерева определяется недостаточно точно, для этих лесов получено обобщенное уравнение (Chave et al., 2005):

$$Pa = \rho_{\delta} \exp(-1,239+1,98\ln D+0,207(\ln D)^2-0,0281(\ln D)^3; R^2=0,958,$$
 (19) где Pa — надземная фитомасса дерева, кг; D — диаметр ствола на высоте груди, см. Несмотря на высокую адекватность уравнения (19), в тропических лесах Африки существует большая неопределенность в оценке фактической надземной фитомассы (Chave et al., 2005).

С целью проверки обоснованности использования обобщенных аллометрических уравнений (Chave et al., 2005) для оценки надземной фитомассы деревьев в Центральной Африке было выполнено специ-

альное исследование в низинных тропических лесах Юго-Восточного Камеруна, на границе между вечнозелеными и полувечнозелеными лесами (Fayolle et al., 2013). Данные о надземной древесной фитомассе были получены в результате взятия 138 модельных деревьев, принадлежащих к 47 таксонам, в широком диапазоне диаметров (от 5,3 до 192,5 см) и базисной плотности древесины (от 0,284 до 1,152 г/см³). В качестве независимых переменных были выбраны диаметр ствола дерева и базисная плотность древесины. Наилучшая локальная многовидовая модель имела ту же структуру и параметры, что и пантропическое уравнение (19), разработанное Дж. Чейвом с соавторами (Chave et al., 2005) для влажных тропических лесов. Оценки фитомассы по пантропическому многовидовому уравнению (19) по точности не уступали оценкам по местному многовидовому уравнению. Использование базисной плотности древесины из глобальной базы данных лишь незначительно увеличило погрешность оценки, поскольку для исследуемых таксонов базисная плотность древесины была сильно коррелирована с базисной плотностью древесины из глобальной базы данных. Сделан вывод, что пантропическое многовидовое аллометрическое уравнение (19), разработанное для влажных лесов, может быть использовано для получения точных оценок запасов фитомассы и углерода во влажных лесах Центральной Африки на основе диаметра ствола, измеренного при лесоинвентаризации, и базисной плотности древесины, взятой из глобальной базы данных на видовом уровне (Fayolle et al., 2013).

Вариации в фитомассе деревьев одинакового размера среди древесных видов африканских саванн были обусловлены широким межвидовым диапазоном базисной плотности древесины, однако остается неясным, какой из двух факторов является определяющим различия в фитомассе равновеликих деревьев между древесными видами: изменение видового числа (сбежистости) как отношения объема ствола к объему равновеликого цилиндра или же изменение плотности древесины (Colgan et al., 2014).

Для выяснения этого вопроса на юге Африки было взято 782 модельных дерева, у которых измеряли влажную фитомассу всего дерева, базисную плотность и влажность древесины, а также видовое число. Установлено, что из четырех доминирующих видов три вида могут варьировать по массе более чем в два раза, однако межвидовое варьирование сбега было незначительное. Средние видовые числа древесных видов варьировали от 0,57 до 0,77 (тогда как видовое число квадратичного параболоида и цилиндра составляет соответственно

0,5 и 1,0). Сравнение общей аллометрической модели фитомассы с видоспецифическими моделями показало, что межвидовые различия в фитомассе равновеликих деревьев на 97 % объясняются включением в модель средней для каждого вида плотности, диаметра и высоты ствола при постоянном видовом числе. Главным фактором межвидовых различий в фитомассе равновеликих деревьев является видовая специфика плотности древесины, а не видовое число (Colgan et al., 2014).

Глава 3. КВАЛИМЕТРИЯ ТОНКОМЕРНОЙ ДРЕВЕСИНЫ КАК ПРОМЫШЛЕННОГО СЫРЬЯ

Свойства волокон древесины разных древесных видов в значительной степени влияют на стоимость обработки и качество конечных продуктов. Например, выработка целлюлозы из древесины ели черной в Канаде требует больше энергии из-за ее более высокой плотности и более длинных волокон (Li et al., 2011), но и обеспечивает более высокие прочностные свойства, в то время как пихта бальзамическая дает превосходные оптические свойства из-за своей меньшей толщины клеточных стенок. Однако в реальности это обеспечение качества никогда не бывает последовательным, поскольку свойства волокон данного древесного вида варьируют как локально, так и территориально, что было показано для ели черной на востоке Канады (Lessard et al., 2014; Giroud et al., 2017). Отмечена важность знания количества и качества лесных ресурсов для обеспечения необходимых качеств древесных волокон с целью оптимизации стоимости продукта, а также для понимания влияния управленческих решений на ее качество при выращивании древесины (Defo et al., 2015).

В условиях дефицита древесины в промышленно развитых странах постепенно вовлекается в промышленное использование древесина, ранее считавшаяся экономически недоступной. Это так называемая некоммерческая, или тонкомерная, древесина (Dünnholz, small-sized wood) с максимальным диаметром около 8–10 см, характеризуемая низким отношением объема к длине, большой долей коры и другими специфичными свойствами (Blossfeld et al., 1963). К этой же категории относится значительная часть урожая короткоротационных плантаций быстрорастущих древесных видов, ориентированных на получение фитомассы и энергии (Schmidt, DeBell, 1973; Hummel et al., 1988). Однако проблема промышленного использования тонкомерной

древесины заключается не только в технической, но и в экономической сфере, поскольку высоким затратам на заготовку и транспортировку противостоит ее низкая потребительная стоимость (Jülich et al., 1966), что Г. Штейнлин (Steinlin, 1962) определил как «закон возрастающих издержек производства». При этом стоимость условной единицы топлива при использовании тонкомерной древесины в 3 раза выше, чем при использовании угля, и в 10 раз выше, чем при использовании газа (Воронин, 1962).

Для полного использования всей выращенной древесины имеются не только технические и экономические, но и экологические ограничения. Суть их состоит в том, что с удалением из леса всей фитомассы, включая мелкую древесину и листву, выносятся элементы питания, находящиеся в естественном лесу в режиме непрерывного круговорота. Хотя есть рекомендации компенсировать их изъятие из круговорота веществ внесением удобрений (Mälkönen, 1973), это увеличивает затраты на выращивание древесины. И тем не менее тонкомерная древесина находит применение в сфере промышленного использования преимущественно как сырье в производстве древесностружечных и древесноволокнистых плит и в химической промышленности (Buschbeck et al., 1961; Strehlke, 1961; Hilf, 1965; Gillwald, 1967; Jacob, Wallmüller, 1967; Громов, 1982).

3.1. Сравнительная квалиметрическая характеристика различных категорий тонкомерной древесины (на примере осины и березы лесостепной зоны)

По мере роста значения тонкомерной древесины в производстве плитных материалов и целлюлозы растет потребность в более точных сведениях о ее квалиметрии, и есть ряд работ, посвященных квалиметрической оценке такой древесины у разных древесных видов (Лопатко, 1939; Шкиря, 1960; Schulz, 1961; Buschbeck et al., 1961; Strehlke, 1961; Götze, 1961, 1965, 1966, 1969; Osika, Woda, 1962; Симонов, 1962; Осипенко, 1963; Голиков, 1963; Blossfeld et al., 1963; Budniak, 1964; Dumitrescu, 1964; Götze, Zenker, 1965; Hilf, 1965; Данилин, 1965; Штибе, 1967; Jacob, Wallmüller, 1967; Packman, Laidlaw, 1967; Zenker, Poller, 1968; Воробьева, 1968; Левченко, 1969; Конаш, 1971; Усольцев, 1971, 1973, 1975а,б, 1983, 1984а, 1985а, 1988; Gryc et al., 2011; Dibdiakova, Vadla, 2012). В основном перечисленные работы были посвящены квалиметрии ветвей спелых деревьев как сырья в производстве древесных плит, и лишь единичные исследования —

Электронный архив УГЛТУ

квалиметрии тонкомерных стволов в молодняках. Довольно редки также сравнительные исследования квалиметрии тонкомерной древесины разных древесных видов.

Так, в исследовании, посвященном квалиметрии тонкомерных стволов сосновых и еловых молодняков (II класс возраста) в Германии, установлено наличие более высокой плотности древесины у сосны -396 (от 345 до 446 кг/м³), чем у ели, -386 (от 342 до 430 кг/м³), но по плотности коры, наоборот, у сосны 309 (от 220 до 346 кг/м³), а у ели 332 (от 230 до 422 кг/м³). В направлении от основания к вершине плотность снижается у обоих древесных видов как древесины, так и коры ствола. Также снижается у обоих древесных видов плотность древесины ветвей в направлении от точки прикрепления к стволу к периферии кроны (Götze, 1969).

Аналогичная закономерность снижения базисной плотности древесины ветвей в направлении от ствола к периферии кроны установлена в спелых и приспевающих насаждениях сосны, ели, березы и осины, а также в скелетных корнях по мере удаления образца от пня у березы и осины в Ленинградской области. Плотность древесины корней обычно ниже плотности древесины ствола (Полубояринов, 1976а). Квалиметрические особенности древесины ветвей, в том числе в сравнении с древесиной ствола, изучались у разных древесных видов другими исследователями (Ионайтис, 1963; Розен, 1969; Закревский, 1972; Hsu, 2003; Gurau et al., 2008; Gryc et al., 2011; Dibdiakova, Vadla, 2012; Jati et al., 2014), и обычно констатировалась повышенная базисная плотность древесины ветвей по сравнению с таковой древесины ствола.

Разделение древесины на тонкомерную и «толстомерную» довольно условное, поскольку тонкомерная и толстомерная древесина различается не только по толщине, но и по возрасту. Стволы одного и того же возраста могут быть различной толщины, равно как стволы равной толщины могут иметь различный возраст. В этой связи имеет значение различие в возрасте тонкомерной и толстомерной древесины. В работе, посвященной исследованию различий квалиметрических показателей сосны обыкновенной в Эберсвальде (Германия) были задействованы 18-летние стволы и 79-летние срединные отрезки стволов 90-летних сосен, имеющие различие как по возрасту, так и по диаметру (Zenker, Poller, 1968). Установлено, что образцы толстомерной древесины имели среднюю базисную плотность 0,50 г/см³ (от 0,45 до 0,54 г/см³), а образцы древесины тонкомерных стволов – 0,40 г/см³ (от 0,38 до 0,42 г/см³), т.е. существенно ниже по сравнению

Электронный архив УГЛТУ

с первыми. Было установлено различие двух категорий древесины и по ширине годичных колец: средняя ширина годичного кольца у толстомерной древесины существенно меньше, чем у тонкомерной, а доля поздней древесины, наоборот, больше. Сделан вывод, что в расчете на 1 м³ тонкомерной древесины выход целлюлозы из древесины тонкомерных стволов будет ниже, чем из толстомерных (Zenker, Poller, 1968).

В колочных березово-осиновых лесах лесостепной зоны было проведено сравнительное исследование квалиметрических показателей березы и осины (Усольцев, 1973). Поскольку, как отмечалось выше, квалиметрия тонкомерной древесины различается не только по ее толщине, но и по возрасту, в данном исследовании сопоставлялись две категории древесины – тонкомерные стволы молодых деревьев и ветви спелых древостоев – примерно в одинаковом диапазоне толщин, а возраст был фиксированным: стволы в молодняках ограничены ІІ классом возраста древостоев, а ветви – VI–VII классами возраста в березовых древостоях и IV–V в осиновых. Получены и проанализированы квалиметрические показатели 80 дисков у березы и 100 у осины (Усольцев, 1973). Выполнен сравнительный анализ элементов и категорий тонкомерной древесины (табл. 4), где под её элементами понимаются древесина и кора, а под категориями – стволы в молодняках и ветви в спелых древостоях.

Таблица 4
Плотность в свежесрубленном состоянии категорий и элементов тонкомерной древесины осины и березы (Усольцев, 1973)

Элементы	Категории	Осина			Береза		
тонкомера	тонкомера	M	±m	t	M	±m	t
	Стволы в	0,837	0,015	15,1	0,891	0,008	11,5
	молодняках	0,837					
Древесина	Ветви в				0,846	0,009	
	спелых	0,812	0,007				
	древостоях						
Кора	Стволы в	0,997	0,016	39,6	1,023	0,023	
	молодняках	0,997				0,023	
	Ветви в		0,012		1,024	0,024	-
	спелых	1,075					
	древостоях						

Примечание. M – среднее значение, r/cm^3 ; m – ошибка среднего; t – уровень значимости различия средних значений.

Из данных табл. 4 следует, что плотность древесины березовых и осиновых стволиков (соответственно 0,891 и 0,837) выше плотности древесины ветвей (соответственно 0,846 и 0,812), а плотность коры, наоборот, выше в ветвях (соответственно 1,023 и 0,997) по сравнению со стволиками (соответственно 1,024 и 1,075). Различие средних значений искомых показателей для категорий тонкомерной древесины достоверно на уровне вероятности выше 0,999, за исключением коры березы, у которой различие плотности стволиков и ветвей статистически незначимо. Поскольку условия произрастания насаждений, в которых взяты образцы, однородны, различие названных квалиметрических свойств связано, по-видимому, с разными физическими и физиологическими функциями элементов и категорий тонкомерной древесины (Усольцев, 1973).

Основным квалиметрическим показателем тонкомерной древесины, ограничивающим ее использование в производстве древесных плит, является содержание коры (Budniak, 1964; Dumitrewscu, 1964; Конаш, 1971; Liepiņš J., Liepiņš K., 2015; Viherä-Aarnio, Velling, 2017), допустимое значение которой в технологической щепе для производства древесноволокнистых плит составляет 20 % (Республиканские технические условия..., 1962), древесностружечных — 15 %, а для гидролизного производства — 12 % (Межреспубликанские технические условия..., 1966). В производстве лигноуглеводных пластиков, технология которых была разработана в Уральском лесотехническом институте, примесь коры повышала их качество (Петри, 1976), но вся технология была слишком энерго- и трудозатратной и не нашла промышленного применения.

Результаты регрессионного анализа зависимости процента коры от локальной толщины тонкомерной древесины приведены в табл. 5. В процессе построения регрессий было обнаружено, что зависимость содержания коры от локальной толщины тонкомерной древесины (т.е. толщины образца-выпила в данном сечении) у березы и осины не может быть выражена одной и той же структурой названной зависимости. Оказалось, что для березы более приемлемо уравнение гиперболы, а для осины — уравнение аллометрической функции (см. табл. 5).

Для того чтобы выяснить, как соотносятся полученные закономерности изменения локальных значений процента коры в тонкомерной древесине с техническими условиями производства технологической щепы, были построены соответствующие графики (рис. 1). Они

показывают, что в тонкомерной древесине по мере перемещения локального сечения от вершины к основанию стволика или ветви и связанного с этим увеличения диаметра содержание коры по массе в свежесрубленном состоянии резко снижается, особенно в интервале толщин от 5 до 20 мм, что подтверждает ранее полученные У.Л. Штибе (1967) результаты в ельниках Латвии. Содержание коры в вершинной части тонкомерной древесины больше у осины, а в комлевой части больше у березы.

Таблица 5 Характеристика уравнений зависимости содержания коры
(в % от свежей массы) от локальной толщины
тонкомерной древесины (Усольцев, 1973)

			Коэф-
Древесный	Категория тонко-	Vnonualiua narnacciui	фициент
вид	мерной древесины	Уравнение регрессии	детер-
			минации
	Стволики в мо-	$\lg \Pi_{cg}^{\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ } = -0.408 \lg d + 1.99$	0,887
Осина	лодняках	$1g H_{c\theta} = -0,408 1g u + 1,99$	0,887
	Ветви в спелых	$\lg \Pi_{cs}^{\ \ e} = -0.385 \lg d + 2.07$	0,974
	древостоях	$1g H_{c\theta} = -0.363 1g u + 2.07$	0,974
Береза	Стволики в мо-	$\Pi_{cg}^{\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ $	0,835
	лодняках	$II_{CB} - (127,0/\mu) + 18,1$	0,833
	Ветви в спелых	$\Pi_{c6}^{\ \ 6} = (136,7/d) + 20,8$	0,812
	древостоях	$11_{C6} - (130, 1/a) + 20,8$	0,012

Примечание: Π_{cs}^{6} – содержание коры в процентах от массы образца в свежесрубленном состоянии, взятого в произвольном сечении тонкомерной древесины; d – диаметр образца в коре в том же сечении, мм; \lg – обозначение десятичного логарифма.

Однако даже в комлевой части тонкомерной древесины обоих древесных видов содержание коры слишком высокое по сравнению с допускаемым в древесностружечных плитах и в гидролизном производстве. В производстве древесноволокнистых плит по содержанию коры подходит лишь нижняя часть тонкомерных стволиков толщиной более 5–6 см, в ветвях же спелых древостоев содержание коры превышает допускаемую величину (см. рис. 1).

Уравнения, приведенные в табл. 5, и их графическая интерпретация (см. рис. 1) не дают, однако, представления о содержании коры в стволике или ветви в целом при заданном диаметре их нижнего среза. В.В. Голиковым (1963), В.М. Воробьевой (1968) и М.А. Данилиным (1965) составлены таблицы объемов ветвей пихты, сосны и оси-

ны в коре и без коры по заданному диаметру нижнего среза ветви и ее длине. Таблицы предназначены для определения объема ветвей в коре и без коры и дают возможность оценивать содержание коры в ветвях по диаметру их нижнего среза и длине, но их использование для оценки процента коры в кроне дерева связано с большой трудоемкостью перечета по толщине ветвей всех порядков в кроне.

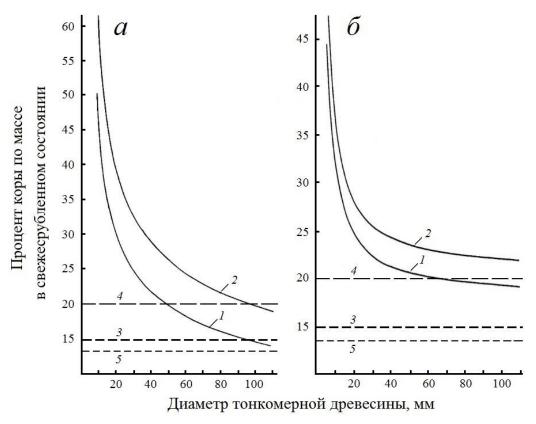


Рис. 1. Изменение процента коры по массе в свежесрубленном состоянии от локального диаметра тонкомерного стволика (1) или ветви спелого древостоя (2) осины (a) и березы (δ). Линии 3, 4 и 5 соответствуют допускаемым значениям процента коры в производстве древесностружечных, древесноволокнистых плит и в гидролизном производстве соответственно (Усольцев, 1973)

При исследовании квалиметрии ветвей и стволиков березы и осины в колочных лесах лесостепной зоны была разработана упрощенная методика определения процента коры в тонкомерной древесине по диаметру ее нижнего среза путем последовательного суммирования по локальным площадям сечений (Усольцев, 1973, 1975б). Длина и сбег древесины не учитывались, так как они находят свое выражение в долях диаметра. Чем больше сбег древесины, тем меньшая ее длина заключена между локальными сечениями с постоянным интервалом локальных диаметров. На этом основании был сделан пе-

Электронный архив УГЛТУ

реход от содержания коры в данном сечении древесины к содержанию ее в древесине с задаваемым диаметром нижнего среза. Последовательно вычислялись объемы коры и древесины в отрезках ветвей или стволиков, ограниченных сечениями, диаметр которых возрастал последовательно с интервалом 5 мм. Далее вычислялись отношения объемов древесины и коры, нарастающих с локальными диаметрами, а затем проценты коры по объему, значения которых в зависимости от диаметра нижнего среза даны в табл. 6.

Таблица 6 Изменение процента коры по объему в тонкомерной древесине осины и березы в зависимости от ее диаметра нижнего среза (Усольцев, 1973; 1975 а,б)

Диаметр	Осина		Береза		
нижнего	Тонкомерные	Ветви спе-	Тонкомерные	Ветви спе-	
среза, мм	стволики	лых древо-	стволики	лых древо-	
		стоев		стоев	
5	50,7	62,2	47,5	56,4	
10	41,4	50,7	34,5	38,2	
15	34,1	42,0	28,2	31,1	
25	27,0	33,1	23,3	25,3	
40	21,9	27,0	21,0	23,0	
60	19,0	23,4	19,4	21,4	
80	17,1	21,0	18,5	20,4	
100	15,5	19,0	18,0	19,8	

Толщина коры тонкомерной древесины вычислена как полуразность диаметров в коре и без коры для каждой градации диаметра нижнего среза, кратного 5 мм (рис. 2). Судя по графикам на рис. 2, толщина коры нарастает по мере увеличения диаметра нижнего среза, и в ветвях кора толще, чем в стволиках. У березы нарастание толщины коры в зависимости от диаметра имеет линейный характер, у осины по мере увеличения диаметра нарастание толщины коры несколько замедлятся (Усольцев, 1973).

Поскольку масса кроны при изучении биологической продуктивности древостоев определяется прямым взвешиванием, а не перечетом всех ветвей по диаметру и длине, представляет интерес содержание коры в тонкомерной древесине не по объему, а по массе, как в свежесрубленном, так и в абсолютно сухом состояниях.

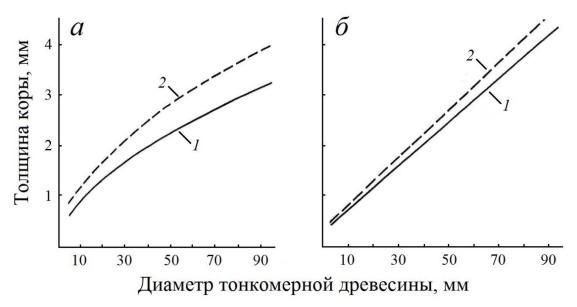


Рис. 2. Изменение толщины коры тонкомерных стволиков (1) и ветвей спелых древостоев (2) в зависимости от диаметра нижнего среза у осины (а) и березы (б) (Усольцев, 1973)

В этой связи были выведены соответствующие формулы для пересчета процентного содержания коры по объему на содержание по массе в свежесрубленном состоянии:

- в осиновых древостоях:
- а) для тонкомерных стволиков

$$\Pi_{ce}^{e} = \frac{99,7\Pi_{ce}^{o}}{83,7+0,160\Pi_{ce}^{o}};$$
(20)

б) для ветвей спелых древостоев

$$\Pi_{ce}^{e} = \frac{107.5\Pi_{ce}^{o}}{81.2 + 0.263\Pi_{ce}^{o}};$$
(21)

- в березовых древостоях:
- а) для тонкомерных стволиков

$$\Pi_{ce}^{\theta} = \frac{102,3\Pi_{ce}^{o}}{89,1+0,132\Pi_{ce}^{o}};$$
(22)

б) для ветвей спелых древостоев

$$\Pi_{ce}^{g} = \frac{102, 4\Pi_{ce}^{o}}{84, 6 + 0,178\Pi_{ce}^{o}}.$$
(23)

В формулах (20)–(23) $\Pi_{cs}^{}$ и $\Pi_{cs}^{}$ соответственно процент коры в свежесрубленном состоянии по массе и по объему.

Для пересчета процентного содержания коры по массе со свежесрубленного состояния на содержание по массе в абсолютно сухом состоянии были предложены формулы:

- в осиновых древостоях:
- а) для тонкомерных стволиков

$$\Pi_{cyx}^{e} = \frac{100\Pi_{ce}^{e}}{123,9 - 0,239\Pi_{ce}^{e}};$$
(24)

б) для ветвей спелых древостоев

$$\Pi_{cyx}^{e} = \frac{100\Pi_{ce}^{e}}{123, 2 - 0,232\Pi_{ce}^{e}};$$
(25)

- в березовых древостоях:
- а) для тонкомерных стволиков

$$\Pi_{cyx}^{e} = \frac{100\Pi_{ce}^{e}}{104,2 - 0,042\Pi_{ce}^{e}};$$
(26)

б) для ветвей спелых древостоев

$$\Pi_{cyx}^{g} = \frac{100\Pi_{cg}^{g}}{101,6-0,016\Pi_{cg}^{g}}.$$
(27)

В формулах (24)–(27) $\Pi_{cyx}^{\ \ \ \ \ \ \ \ }$ – процент коры по массе в абсолютно сухом состоянии.

На основе данных табл. 6 для процентов коры по объему с использованием формул (20)–(23) были получены проценты коры по массе в свежесрубленном (формулы (20)–(23)) и в абсолютно сухом (формулы (24)–(27)) состояниях (табл. 7) в зависимости от диаметра нижнего среза (Усольцев, 1973).

Вследствие различия как влажности, так и плотности древесины и коры проценты коры в разных состояниях тонкомерной древесины различаются по некоторым показателям существенно, по другим незначительно.

Таблица 7

Изменение процента коры в тонкомерной древесине осины и березы по объему и массе в свежесрубленном и абсолютно сухом состояниях в зависимости от ее диаметра нижнего среза (Усольцев, 1973)

Пио	Тонкомерные стволики			Ветви спелых древостоев		
Диа-		Процент коры по			Процент коры по	
метр ниж-	-	массе		Процент	массе	
него	Процент коры по	Свеже-	Абсо-	Процент коры по объему	Свеже-	Абсо-
среза,	объему	срублен-	лютно		срублен-	лютно
MM	ООВСМУ	ное со-	cyxoe co-		ное со-	cyxoe co-
141141		стояние	стояние		стояние	стояние
	T	Oc	иновые дрег	востои		
5	51	67	62	62	69	64
10	41	54	48	51	57	52
15	34	44	38	42	48	43
25	27	34	29	33	40	35
40	22	27	23	27	33	28
60	19	23	20	23	28	24
80	17	21	18	21	26	22
100	15	19	16	19	24	20
		Беј	резовые дре	востои		
5	48	51	50	56	61	61
10	34	38	37	38	43	42
15	28	31	30	31	35	35
25	23	26	25	25	29	29
40	21	23	23	23	27	26
60	20	22	21	22	25	24
80	19	21	20	21	24	23
100	18	20	19	20	23	23

В табл. 7 приведены проценты коры для совокупности ветвей двух древесных видов в зависимости от диаметра ветви у ее основания. Представляет интерес зависимость процента коры в кроне дерева в целом от его морфометрических показателей, в частности от возраста дерева и его диаметра на высоте груди. Эта зависимость была получена в лесостепной зоне по фактическим данным 525 модельных деревьев березы на 45 пробных площадях и 325 деревьев осины на 32 пробных площадях в возрастных диапазонах березы и осины от 5 до 86 и от 10 до 53 лет соответственно. Ее графическая интерпретация (рис. 3) показывает, что процент коры по массе в сухом состоянии у

обоих древесных видов снижается по мере увеличения диаметра ствола при одном и том же возрасте и по мере увеличения возраста дерева при одном и том же диаметре. Аналогичная тенденция снижения процента коры в ветвях по мере увеличения возраста дерева была установлена в сосновых культурах Джабык-Карагайского бора в Челябинской области (Джабык-Карагайский бор, 2005).

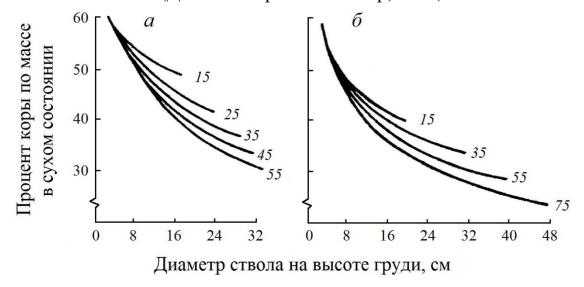


Рис. 3. Изменение процента коры в массе ветвей в абсолютно сухом состоянии в зависимости от диаметра ствола на высоте груди и возраста дерева (обозначен цифрами): а – осины и б – березы (Усольцев, 1985а)

В производственных условиях возможны ситуации, когда нет необходимости оценивать процент коры в древесине и коре в отдельности, а нужны проценты коры в тонкомерных стволиках и ветвях спелых древостоев в целом, т.е. без разделения на древесину и кору. Подобные данные процентов коры в категориях тонкомерной древесины в коре приведены в табл. 8.

Таблица 8 Плотность в свежесрубленном состоянии категорий тонкомерной древесины осины и березы в коре (Усольцев, 1973)

Категории тонкомерной	Осина		Береза	
древесины	M	±m	M	±m
Стволы в молодняках II класса возраста	0,855	0,016	0,915	0,013
Ветви деревьев II–III классов возраста	0,898	0,008	0,961	0,015
Ветви деревьев V–VII классов возраста	0,834	0,015	0,919	0,008

Примечание. M – среднее значение, r/cm^3 ; m – ошибка среднего.

Таким образом, на статистически значимом уровне было установлено, что плотность всех категорий тонкомерной древесины осины в целом ниже, чем берёзы. У березы и осины плотность ветвей деревьев старших возрастов меньше плотности ветвей деревьев младших возрастов за счет большего участия крупных ветвей, имеющих меньший процент коры, которая обладает большей плотностью, нежели древесина. Тонкомерные стволики березы и осины имеют меньшую плотность по сравнению с ветвями спелых древостоев, в которых за счет их ветвления больше участие категорий тонких фракций (побегов), содержащих больший процент коры.

В ельниках-кисличниках Латвии было показано аналогичное снижение плотности ветвей в абсолютно сухом состоянии в возрастном диапазоне от 50 до 100 лет: с 0,685 до 0,645 г/см³. Однако гораздо большее влияние добротности местопроизрастания на показатель плотности ветвей было выявлено в 80-летних ельниках: при снижении бонитета с Іб до ІІ класса плотность ветвей в ельниках возрастает с 0,635 до 0,757 г/см³ за счет снижения прироста и соответствующей ширины годичных колец (Штибе, 1967).

3.2. Древесина и кора ветвей растущих деревьев: сравнительный анализ их квалиметрических показателей в естественных сосняках и культурах

В онтоценогенезе древостоя после смыкания полога его морфоструктура непрерывно изменяется. Происходит отпад угнетенных деревьев с сокращением общего их числа на занимаемой площади; отпад ветвей первого порядка в нижней части кроны, сопровождающийся поднятием древесного полога над уровнем почвы; отпад ветвей второго порядка в приствольной части ветвей первого порядка с формированием безлистной части кроны вдоль ствола. В результате последнего снижается продуктивность ассимиляционного аппарата деревьев и древостоев, отнесенная к занимаемому ими пространству роста (Assmann, 1961; Усольцев и др., 1985а).

Вследствие морфологических сдвигов изменяются квалиметрические характеристики ветвей: плотность, содержание сухого вещества, соотношение коры и древесины, закономерности динамики которых в пространстве и времени растущих деревьев и древостоев являются составной частью исследований биологической продуктивности лесов. Исследования названных показателей ветвей в литературе обычно фрагментарны, они представляют крону в целом, без учета ее

морфологии (Ando, Hirozami, 1961; Усольцев, 1971, 1975а; Usoltsev, 1971; Götze et al., 1972; Hakkila, 1972; Голиков, 1982). Тем не менее морфология кроны была описана в Северо-Баденской части долины Рейна в Германии в 16 сосновых насаждениях в возрасте жердняка с густотой от 3,4 до 16,1 тыс. деревьев на 1 га, и была получена регрессионная модель, прогнозирующая изменение диаметра ветви в точке крепления на стволе в зависимости от положения ветви по оси ствола, диаметра ствола на высоте груди и густоты древостоя с коэффициентом детерминации 0,64 (Abetz, 1970). Размерные характеристики ветвей ели европейской в связи с густотой древостоев изучены также в Финляндии (Mäkinen, Hein, 2006).

В Аман-Карагайском бору в условиях сухой степи в 1983 г. была выполнена сравнительная оценка квалиметрии ветвей деревьев, произрастающих в естественном состоянии и в культурах (Усольцев и др., 1985). Естественный сосняк в возрасте 22 лет характеризовался III классом бонитета с густотой 43,8 тыс. экз/га и суммой площадей сечений 36,7 м²/га. Культуры сосны в возрасте 24 лет характеризовались Іа классом бонитета с густотой 5,34 тыс. экз/га и суммой площадей сечений 46,5 м²/га. Крону модельных деревьев, взятых по группам рангов (10 моделей в естественном сосняке и 6 в культурах), отделяли от ствола и от каждой второй мутовки брали среднюю по размерам ветвь первого порядка, разрезали ее через 0,1 длины в культурах и через 0,2 длины в естественном сосняке. В местах срезов брали диски для определения плотности древесины и коры в свежесрубленном состоянии, содержания сухого вещества в древесине и коре, а также доли коры по массе. Всего было взято 390 дисков на 42 ветвях в культурах и 365 дисков на 73 ветвях в естественном сосняке (Усольцев и др., 1985).

С целью выявить наиболее информативные дендрометрические показатели скелета кроны опытные значения названных квалиметрических показателей для каждого дерева в отдельности были аппроксимированы линейными зависимостями общего вида:

$$Y_{i} = f(X_{1}, X_{3}), \qquad (28)$$

$$Y_{i} = f(X_{1}, X_{4}), \qquad (29)$$

$$Y_{i} = f(X_{1}, X_{5}), \qquad (30)$$

$$Y_{i} = f(X_{2}, X_{3}), \qquad (31)$$

$$Y_{i} = f(X_{2}, X_{4}), \qquad (32)$$

$$Y_{i} = f(X_{2}, X_{5}), \qquad (33)$$

где Y_i – один из исследуемых квалиметрических показателей: ρ_{π} и ρ_{κ} – плотность в свежесрубленном состоянии соответственно древесины и коры (кг/м³); S_{π} и S_{κ} – содержание сухого вещества в древесине и коре

ветви 1-го порядка, %; $\Pi_{cg}{}^{6}$ — содержание коры в процентах от массы образца ветви в свежесрубленном состоянии; X_{1} — относительная длина ветви в долях от общей длины; X_{2} — диаметр ветви в коре в і-м сечении, см; X_{3} — высота крепления ветви 1-го порядка на стволе дерева, м; X_{4} — диаметр основания ветви 1-го порядка, см; X_{5} — возраст ветви, лет.

Независимые переменные X_1 и X_2 характеризуют положение образца (диска) вдоль оси ветви 1-го порядка, X_3 — положение ветви вдоль оси ствола. X_3 тесно связана с X_5 (r=0.98...0.99); X_3 и X_4 связаны в естественном сосняке менее тесно, чем X_3 и X_5 (r=0.90), а в культурах слабо (r=0.29). Переменные X_4 и X_5 более тесно связаны в культурах (r=0.78) и менее в естественном сосняке (r=0.30).

Коэффициенты детерминации уравнений (28)—(33) для совокупностей деревьев естественного древостоя и культур (табл. 9) показывают, что все приведенные дендрометрические независимые переменные могут быть использованы для описания изменчивости локальных квалиметрических показателей плотности, содержания сухого вещества и процента коры. Они наименее информативны для плотности древесины и коры ветвей и более информативны для содержания сухого вещества и процента коры на том или ином участке ветви 1-го порядка. Удовлетворительными характеристиками обладали уравнения (30) и (31), причем в естественном сосняке они адекватнее, чем в культурах. Остальные уравнения отличались от них несущественно.

Таблица 9 Средние значения коэффициентов детерминации и ошибки уравнений (28)–(33) для совокупностей деревьев в естественном сосняке и культурах (Усольцев и др., 1985)

Квалимет-	Номер уравнения						
рический показатель	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	
		Есте	ственный сос	сняк			
$ ho_{\scriptscriptstyle m A}$	0,24±0,04	$0,24\pm0,06$	$0,24\pm0,04$	$0,30\pm0,04$	$0,26\pm0,04$	$0,30\pm0,04$	
$ ho_{\scriptscriptstyle ext{K}}$	$0,12\pm0,02$	$0,11\pm0,01$	$0,12\pm0,02$	$0,18\pm0,04$	$0,11\pm0,03$	$0,19\pm0,04$	
$S_{\scriptscriptstyle m I\!\!I}$	$0,53\pm0,07$	$0,31\pm0,05$	$0,53\pm0,07$	$0,48\pm0,07$	$0,25\pm0,06$	$0,47\pm0,07$	
S_{κ}	$0,35\pm0,06$	$0,16\pm0,04$	$0,35\pm0,06$	$0,37\pm0,07$	$0,21\pm0,05$	$0,37\pm0,07$	
Π_{ce}^{e}	0,52±0,06	$0,54\pm0,07$	0,53±0,06	$0,55\pm0,07$	0,43±0,06	$0,55\pm0,07$	
	Культуры						
$ ho_{\scriptscriptstyle m A}$	0,38±0,06	$0,33\pm0,06$	0,39±0,06	$0,39\pm0,05$	$0,33\pm0,05$	$0,39\pm0,04$	
$ ho_{\scriptscriptstyle ext{K}}$	$0,43\pm0,04$	$0,35\pm0,08$	$0,45\pm0,05$	$0,42\pm0,05$	$0,34\pm0,07$	$0,42\pm0,06$	
$S_{\scriptscriptstyle m I\!\!I}$	0,62±0,06	$0,55\pm0,05$	$0,65\pm0,06$	$0,58\pm0,08$	$0,54\pm0,05$	$0,60\pm0,07$	
$S_{\scriptscriptstyle m K}$	$0,48\pm0,08$	$0,39\pm0,07$	$0,49\pm0,08$	$0,47\pm0,10$	$0,38\pm0,07$	$0,49\pm0,10$	
Π_{ce}^{e}	0,72±0,06	0,81±0,02	$0,74\pm0,05$	$0,79\pm0,02$	0,79±0,02	$0,80\pm0,02$	

По алгоритму, изложенному ранее (Усольцев, 1983), была создана компьютерная программа, по которой с использованием экспериментальных значений локальных квалиметрических показателей плотности, содержания сухого вещества, процента коры по массе в свежесрубленном состоянии и сбега ветвей 1-го порядка рассчитаны средние для каждой ветви соответствующие показатели. Полученные средние для ветви значения проанализированы в связи с двумя независимыми переменными, первая из которых характеризует ценотическое положение дерева в пологе, опосредованное диаметром ствола на высоте груди, а вторая, учитывающая положение ветви по оси кроны, представлена, как и в случае описания локальных квалиметрических показателей, в трех вариантах, представленных тремя вышеназванными дендрометрическими независимыми переменными.

Структура рассчитанных уравнений имеет общий вид с уравнениями (28)–(30).

Результаты расчета уравнений (28)—(30) показали, что принятые независимые переменные объясняют изменчивость средних для ветвей 1-го порядка квалиметрических показателей в меньшей мере в естественном сосняке и в большей в культурах. То же соотношение сосняков двух происхождений было и по объясненной изменчивости локальных квалиметрических показателей (см. выше). Это явление может быть связано с различием морфоструктуры тех и других (Усольцев и др., 1985).

Из трех независимых переменных, учитывающих положение ветви по оси ствола и включенных в модели (28)–(30), явного преимущества перед двумя другими не показал ни один. Сравнение трех вариантов (28)–(30) по показателю детерминации показало, что из 10 повторностей (5 квалиметрических показателей × 2 происхождения древостоев) в 4 случаях преимуществом обладал первый вариант, в 3 случаях – второй и в остальных 3 случаях – третий. Некоторое превышение первого варианта нельзя считать значимым, так что включенные в (28)–(30) три независимые переменные учитывают ценотическое положение ветви дерева по его вертикальному профилю примерно с равной степенью адекватности. При этом доля остаточного варьирования во всех случаях довольно высокая. Модели, наиболее надежные по показателю детерминации, получены для среднего содержания сухого вещества и процента коры и наименее надежные – для плотности древесины и коры ветвей (Усольцев и др., 1985).

Таким образом, несмотря на значительную долю остаточного варьирования, была показана возможность моделирования локальных

квалиметрических показателей ветвей растущих деревьев с использованием легко измеряемых дендрометрических независимых переменных, представляющих положение диска по длине ветви и по оси ствола. Изменчивость средних для ветви квалиметрических показателей объясняется ценотическим положением дерева в пологе и ценотическим положением ветви первого порядка в кроне дерева, причем в культурах доля объясненной изменчивости по всем квалиметрическим показателям выше, чем в естественном древостое того же возраста.

3.3. Тонкомерная древесина и «зелёная» энергетика

Леса, наряду с огромной биосферной ролью, представляют собой ещё и неисчерпаемый источник «зелёной» энергии как альтернативы ископаемым видам топлива. Лесной покров планеты обеспечивает устойчивость биосферы, а сведение лесов в результате интенсивных рубок и пожаров существенно её снижает, так же как и экологическую и энергетическую безопасность отдельных стран и всей цивилизации. Использование «зелёной» энергии позволяет избежать широкомасштабного обезлесения территорий (Kraxner et al., 2013), однако в мировом энергетическом балансе «зелёная» энергия и древесные отходы занимают пока лишь 10 %, а 81 % приходится на традиционные ископаемые виды энергии (Nybakk, Lunnan, 2013).

Мир вступает в эру биоэкономики, т. е. экономики, основанной на биотехнологиях, использующих возобновляемое сырье для производства энергии и материалов (Groenestijn et al., 2020). Биомасса – естественный источник энергии, ее воспроизводство не изменяет климат, она присутствует во всех климатических зонах России и при сжигании не образует экологически вредных соединений. В то же время при использовании традиционного ископаемого топлива возрастает не только выброс парниковых газов, основным из которых является СО₂, но и общее загрязнение среды. При этом разрыв между глобальными выбросами и поглощением углерода из года в год растет.

Наиболее экономически и технологически доступными являются отходы деревообработки, объём которых в нашей стране достигает 50 млн т (http://5fan.ru/wievjob.php?id=2666). Эти отходы сконцентрированы на территориях лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий и в основном сжигаются. В целом нерациональное сжигание энергоресурсов (не только лесных) достигает почти половины общего энергопотребления (Маргулов, 2003).

При оценке потенциала «зеленой» энергетики в России обычно ориентируются на расчетную лесосеку и соответствующий объем заготовляемой древесины. Поскольку на каждые 100 м³ заготовленной деловой древесины приходится около 60–70 м³ отходов от лесозаготовок и деревообработки (Усольцев, 1988), то в стране остаются невостребованными около 60–70 млн м³, или около 30 млн т органического вещества, включающего 50 %, или около 15 млн т, чистого углерода. В терминах «зеленой» энергетики важен весовой, а не объемный метод учета древесины. Одновременное применение двух методов — объемного и весового — требует разработки переводных коэффициентов, позволяющих пересчитывать данные с одного состояния в другое, из которых наиболее важной характеристикой является базисная плотность древесины (Тамаркин, 1968; Полубояринов, 1976а).

Но значительно большие резервы «зеленой» энергетики сокрыты в неиспользуемых пока запасах древесины «на корню». Известно, что лес, как любой живой организм, растет и постепенно старится. Поэтому лесные ресурсы нуждаются в периодическом омоложении путем их рубки и заготовки древесины. Согласно имеющимся оценкам, лесами России ежегодно депонируется от 3 (Швиденко, Щепащенко, 2014) до 8 млрд т углерода (Писаренко, Страхов, 2006), из них 83 % возвращается в атмосферу в ходе разложения и отпада. Как бы фантастично это сегодня не звучало, но проблема будущего (возможно, отдаленного) заключается в разработке методов и технологий, позволяющих подключаться к расходной части углеродного цикла, минимизировать количество углерода, возвращаемого лесом в атмосферу, и получать «зелёную» энергию. При этом технология будущего должна обеспечивать сохранение стабильности лесных экосистем. Тем самым решатся сразу две проблемы – экологическая (сокращение атмосферных загрязнений и выбросов парниковых газов) и энергетическая (выработка альтернативной «зеленой» энергии).

Сегодня в Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт» разрабатывается научное направление «биоэнергетика», в рамках которого исследуются механизмы и закономерности преобразования энергии в живых системах. Его главные задачи — воспроизводство природоподобных систем, разработка технологий, стирающих грань между живым и неживым на основе синтеза научных дисциплин, исследование молекулярных механизмов, обеспечивающих биоэнергетические процессы в живых системах. На базе технологической платформы «биоэнергетика» разрабатываются

технологические решения, позволяющие максимально эффективно использовать имеющиеся природные ресурсы и при этом не наносить вреда окружающей среде (Василов, 2014). Именно этот Центр располагает сегодня реальными возможностями для разработки технологий «подключения» к расходной части углеродного цикла наших лесных экосистем.

Поскольку депонирование углерода мировыми лесами в 8 раз превышает нынешнюю потребность в энергии (Parresol, 2002), то по мере переключения расходной части углеродного цикла в русло «зеленой» энергетики будет гарантированно обеспечена не только экологическая, но и энергетическая безопасность как России, так и всей нашей цивилизации. Первыми на пути прогресса окажутся те, кто раньше переведет свою экономику на путь естественного процесса, в котором доминирующую роль будут играть не орудия и способы производства, а способы максимизации живого вещества и энергии, обеспечивающие, по выражению В.И. Вернадского, автотрофность человеческого общества (Межжерин, 1994). По существу, это составляет основу стратегии устойчивого развития страны и общества (Усольцев, 2016 б). Для России прежде всего является актуальным энергосбережение как один из путей достижения конкурентоспособности экономики страны (Данилов, 2006).

Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛОТНОСТИ И СВЯЗАННЫХ С НЕЙ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ РАСТУЩИХ ДЕРЕВЬЕВ

Термины «качество древесины» или «качество волокон» характеризуют отличительные признаки или свойства древесины с точки зрения формирования конечного продукта. Атрибуты качества волокон являются ключевыми переменными при разработке рыночных инструментов оптимизации конечной стоимости в лесном секторе (Li, 2009; Watson, Bradley, 2009). Учет прогнозируемых характеристик волокон при планировании лесопользования может стать катализатором новой парадигмы лесопользования, основанной на рынке и стоимости. Знание взаимосвязей между лесорастительными условиями и качеством древесины может способствовать эффективному планированию процесса лесовыращивания, и показатель добротности местопроизрастания может быть использован в качестве моделируемой переменной качества древесины в системе инвентаризации лесов (Briggs, 2010; Li, 2009; Pokharel et al., 2014).

4.1. Квалиметрия древесины в естественных насаждениях и культурах

Известно, что естественные лесные насаждения выполняют многие экологические и социальные функции лучше, чем одновозрастные монокультуры (Johansson, 2003; Rametsteiner, Mayer, 2004; Agestam et al., 2006; Hector, Bagchi, 2007; Gamfeldt et al., 2013). По мнению многих исследователей, в условиях бореальной зоны культуры не обоснованы ни с экологических, ни с генетических, ни с энергоэкономических позиций (Thomasius, 1981; Lundkvist, 1982; Стадницкий, 1985; Leibundgut, 1987; Санников и др., 2004).

Сравнительный анализ биологической продуктивности естественных сосняков и культур в степной зоне показал, что на статистически достоверном уровне средний диаметр больше, а число стволов на 1 га меньше в культурах. Однако средняя высота, сумма площадей сечений, запас стволовой древесины, а также надземная, подземная и общая фитомасса в культурах и естественных сосняках II-III классов бонитета в возрастном диапазоне от 20 до 50 лет достоверно не различались (Усольцев и др., 1994). Главными факторами, влияющими на различия в строении и росте насаждений искусственного и естественного происхождения, являются равномерное размещение деревьев по площади, а также более низкая первоначальная густота искусственных древостоев, в связи с чем процессы естественного изреживания искусственных и естественных древостоев носят различный характер (Залесов и др., 2002). В условиях лесостепной зоны сравнительный анализ роста естественных березняков и культур березы показал, что площадь проекций крон в первые годы в культурах березы увеличивается значительно быстрее, чем в естественных березняках. К возрасту 10 лет коэффициент перекрытия крон (отношение суммы площадей проекций крон деревьев к площади проекций всего полога) в культурах достигал 1,5, тогда как в естественных насаждениях он не превышал 0,9, и, соответственно, освещенность под пологом в культурах была на 20 % ниже, чем в естественных березняках (Данченко и др., 1991).

По мере роста и естественного изреживания особенности структуры естественного и искусственного древостоев становятся все более трудноразличимыми, характер горизонтального распределения деревьев к возрасту спелости в обоих случаях становится случайным. Культуры по морфологическим признакам «натурализуются», а появление подроста и следующих поколений завершает этот процесс.

Например, культуры ели европейской на Ижорском плато (Ленинградская область) на бывших землях сельскохозяйственного пользования в возрасте 77 лет имеют запасы до 800 м³/га, что вдвое выше запасов естественных ельников того же возраста. Они сформировали под пологом специфичную лесную среду с типично лесным напочвенным покровом и четко дифференцировались по четырем типам леса, по В.Н. Сукачеву (Алятин, 2007). Абсолютно безлесные в течение всего голоцена острова Лисьи в средней части Алеутской гряды, засаженные русскими первопроходцами в первой половине XIX в. (Фишер, 1841), уже к концу XX в. имели высоту до 17 м и диаметр стволов до 55 см, фактически натурализовались, и их площади существенно увеличились путем естественного возобновления на прилегающих безлесных пространствах (Alden, Bruce, 1989).

В последние годы в европейских странах, в значительной степени лишившихся своих естественных лесов, разрабатываются программы «натурализации» искусственных фитоценозов ели европейской и сосны обыкновенной, т. е. последовательного переформирования их в сложные разновозрастные экосистемы (Fürst et al., 2004; Schmidt, Denner, 2005). Соответственно, лесовладельцам и деревообрабатывающим компаниям сегодня требуется больше информации о том, как происходящий перевод одновозрастных монокультур в более сложные смешанные насаждения изменяет структуру древостоев и качество их древесины. Однако сравнительные исследования качества древесины в смешанных и чистых древостоях, как и в культурах, довольно редки (Pretzsch, Rais, 2016), и подобные исследования были в основном сосредоточены на чистых насаждениях (Puettmann et al., 2009).

Компоненты качества древесины являются результатом фенотипа дерева, который определяется как генотипом, так и условиями окружающей среды, т. е. видоспецифичной морфологической пластичностью и пространственной структурой древостоя (Assmann, 1970). Условия произрастания отдельных деревьев (ресурсное обеспечение, факторы окружающей среды) в значительной степени зависят от структуры древостоя (Pretzsch, 2014; Rio et al., 2016). Увеличение расстояния между деревьями и высвобождение кроны при сильном разреживании могут увеличить подачу света и способствовать увеличению ширины и длины кроны (Curtis, Reukema, 1970; Maguire et al., 1999). Подавленные деревья в нижней части полога, напротив, могут реагировать на ограничение света боковым, а не вертикальным расширением кроны (Pretzsch, Rais, 2016). Промежуточные деревья

могут подвергаться механическому повреждению крон более высокими соседями (Putz et al., 1984).

Морфологически пластичные и теневыносливые виды, такие как бук европейский, могут использовать свет в большей мере по сравнению с такими светолюбивыми видами, как сосна обыкновенная (Purves et al., 2007). Ветви простираются настолько далеко, насколько им позволяют свет и физическое пространство (ресурсное обеспечение) с учетом теневыносливости вида (в зависимости, например, от точки компенсации света), характера ветвления (генетический аспект) и аллометрии (морфологические взаимосвязи). То же самое относится к развитию корней в связи с наличием воды и минеральных питательных веществ, засухоустойчивостью и глубиной укоренения (Körner, 2005).

Эксперименты по прореживанию чистых древостоев показывают сильное влияние пространственной структуры древостоя на рост и морфологию деревьев и в конечном счете на структуру и качество древесины (Reukema, Smith, 1987; Spellmann, Nagel, 1992; Глушкова, 2011). Опытные прореживания (Baldwin et al., 2000; Kantola, Mäkelä, 2004) показывают сильное снижение относительной высоты (отношения высоты к диаметру ствола) при уменьшении густоты древостоя. Отношение длины кроны к высоте дерева и отношение ширины кроны к диаметру ствола во всех проведенных исследованиях возрастает при снижении густоты древостоя (Hynynen, 1995; Metzger, 1998; Longuetaud et al., 2008; Pretzsch, 2014). Согласно рассмотренным работам, видовое число ствола, которое обычно используется в лесной таксации для расчета объема ствола в дополнение к высоте и диаметвысоте груди, при прореживаниях всегда снижается (Wiedemann, 1951; Van Miegroet, 1956; Valinger, 1992; Pinkard, Neilsen, 2001). Для морфологически пластичных пород, особенно таких, как бук и дуб, конкурентное высвобождение может «округлить» поперечное сечение кроны и уменьшить ее эксцентриситет (Bleile, 2006; Longuetaud et al., 2008). Увеличенное расстояние посадки и интенсивное прореживание всегда значительно увеличивают число живых первичных ветвей на дереве, их длину и диаметр (Maguire et al., 1991; Spellmann, Nagel, 1992; Deleuze et al., 1996; Schumacher et al., 1997; Seeling, 2001; Pinkard, Neilsen, 2001; Kantola, Mäkelä, 2004).

Увеличенное расстояние между деревьями при посадке и прореживание часто снижают плотность древесины хвойных пород (Bues, 1985; Hapla, 1985; Grammel, 1990), чего не наблюдается у лиственных (Metzger, 1998). Неоднородность древесины, вызванная

кренью (Seeling, 2001), изменчивостью ширины древесного кольца (von Pechmann, 1954; von Pechmann, Courtois, 1970) и смоляными карманами (Schumacher et al., 1997; Bücking et al., 2007) часто повышается при интенсификации прореживаний и увеличении расстояний между деревьями.

В принципе эта зависимость формы дерева от пространственной структуры применима как к чистым, так и к смешанным древостоям. Основное различие заключается в том, что многие одновозрастные чистые древостои имеют более однородную структуру, в то время как смешанные древостои обладают более широким пространственным разнообразием и более выраженным случайным характером горизонтальной структуры (Pretzsch, Rais, 2016).

В Северной Америке и Европе примерно 15 % заготовленной древесины используется для производства энергии. По данным ФАО ООН, примерно 60 % заготовленной древесины идет на изготовление пиломатериалов и фанеры. Различные конечные продукты требуют специфичного древесного сырья, и предпочтения покупателя в зависимости от этого существенно варьируют (Pretzsch, Rais, 2016). Высокая плотность древесины повышает общую теплотворную способность и является единственной важной энергетической характеристикой. Напротив, в производстве целлюлозы, бумаги и древесных плит требования к качеству древесины возрастают, причем до такой степени, что если свойства древесины подходят для конкретного конечного использования, то любое другое использование уже исключается (Pretzsch, Rais, 2016). Для использования в конструкциях качество древесины имеет решающее значение и обычно четко определяется с помощью такого показателя, как прочность, которая в основном зависит от свилеватости, плотности и динамического модуля упругости, которые определяют прочность и жесткость лесоматериала (Bacher, Krzosek, 2014). Хотя площади сложных смешанных древостоев имеют тенденцию к росту, неизвестно, какое качество древесины они обеспечат по сравнению с чистыми древостоями и как способы формирования древостоев, интервалов и интенсивности прореживания могут изменить качество древесины в будущем.

В результате проведенного сравнительного анализа квалиметрии сложных и одновозрастных древостоев установлено (Pretzsch, Rais, 2016), что свилеватость более выражена в сложных насаждениях, а на плотность структура древостоя не влияет. Показатели эксцентриситета кроны, кривизны стволов и неравномерности ширины древесного кольца, как правило, выше в сложных древостоях.

Полученные результаты находятся в зависимости от видоспецифичной морфологической пластичности деревьев и пространственных условий роста. Выращивание одновозрастных чистых или смешанных древостоев в загущенном состоянии приводит к получению высококачественной древесины, особенно у древесных видов с низкой пластичностью. Рост чистых и смешанных древостоев в условиях низкой густоты приводит к формированию сбежистого ствола, сучьев большого размера и низкой плотности древесины, особенно в случае хвойных пород. В действительности не смешение видов в первую очередь изменяет морфологию, структуру и качество древесины деревьев, а видоспецифичная морфологическая пластичность и структурная неоднородность древостоя. Последняя часто выше в смешанных, чем в чистых древостоях, и скорее в разновозрастных, чем в одновозрастных. Чем более изменчива структура древостоя, тем шире диапазон свойств древесины (Pretzsch, Rais, 2016).

4.2. Прогнозирование качества древесных волокон в зависимости от лесорастительных условий (на примере ели приморской в Канаде)

Большинство исследований по прогнозированию и объяснению изменчивости свойств древесных волокон в пределах дерева или в совокупностях деревьев сосредоточено на нескольких распространенных коммерческих видах, таких как сосна обыкновенная (Tomczak et al., 2016), сосна замечательная (Cown et al., 1999; Lasserre et al., 2009), сосна ладанная (Daniels et al., 2002; Clark et al., 2006) и ель европейская (Jaakkola et al., 2005; Gerendiain et al., 2008). Связь между свойствами волокон (или толщиной клеточных стенок) и скоростью роста отдельных деревьев в литературе хорошо известна (Mäkinen et al., 2002; Saranpää, 2003; Gardiner et al., 2011) и часто отражает типичное возрастное снижение прироста, наблюдаемое у деревьев, занимающих основной полог. Возраст является информативной прогностической переменной при моделировании роста насаждений, однако его применение может быть ограничено из-за низкой доступности и надежности оценок возраста по всему лесному ландшафту, особенно в лесах, состоящих из разновозрастных и смешанных древостоев. Кроме того, форма возрастной кривой роста изменяется в зависимости от лесорастительных условий, и они оказывают влияние на свойства древесины независимо от возраста. Несмотря на установленное (Jozsa, Middleton, 1994) наличие взаимосвязи между лесорастительными условиями и свойствами древесных волокон, остается неясным, можно ли описать изменение анатомических свойств древесины в зависимости от добротности местопроизрастания в рамках прогностического подхода к моделированию (Pokharel et al., 2014).

С целью устранения подобной неопределенности в Канаде в древостоях ели приморской было проведено специальное исследование (Pokharel et al., 2014). Была поставлена задача: дать количественную оценку связи между квалиметрическими характеристиками и лесорастительными условиями в эдафическом градиенте от сухих до мокрых местообитаний и разработать классификационную модель, которая может быть применена для прогнозирования и картографирования показателей качества древесных волокон в пределах полигонов инвентаризации лесных ресурсов на конкретных объектах лесного хозяйства (Pokharel et al., 2014).

Была выявлена общая закономерность изменения квалиметрических показателей древесины в направлении от сердцевины к коре у всех деревьев ели приморской. Эта типичная картина радиального изменения свойств древесины хвойных пород хорошо известна (Lachenbruch et al., 2011) как реакция деревьев на стресс, вызванный внешней средой, в виде снижения скорости формирования сухого вещества и изменения анатомических особенностей трахеид (Grime, 1977; Begum et al., 2012). В древостоях ели приморской было обнаружено, что закономерности изменения плотности и доли поздней древесины в направлении от сердцевины к коре тесно связаны как с влагообеспечением экотопа, так и с размером крон деревьев. Это важный вывод с точки зрения моделирования, поскольку информация о добротности экотопа обычно включается в кадастры лесных ресурсов, а информация о размерах крон может быть получена из данных дистанционного зондирования (van Leeuwen et al., 2011).

В предшествующих исследованиях попытки предсказать свойства древесных волокон у растущих деревьев на основе информации об эдафической добротности экотопа дали неоднозначные результаты. Были выявлены взаимосвязи между плотностью древесины и поступлением азота у сосны замечательной (Beets et al., 2001), а также между различными свойствами волокон и классом бонитета у ели европейской (Mäkinen et al., 2007; Watson, Bradley, 2009). В то же время соотношения между основанными на лесоинвентаризации сведениями о добротности местообитаний и свойствами волокон были слабыми, непоследовательными и неопределенными (Wilhelmsson et al., 2002; Acuna, Murphy, 2006; Nuutinen et al., 2009).

Авторами (Pokharel et al., 2014) сделано предположение, что установленное увеличение плотности древесины и процентного содержания поздней древесины объясняется отрицательным влиянием влажных и бедных питательными веществами условий в болотных экотопах, и метод моделирования, который дает прогнозы квалиметрических свойств на основе классификации экотопов, может быть применим во всех бореальных лесах. Хотя конкретные характеристики различных экотопов могут различаться, имеется фундаментальная связь характеристик древесины с дефицитом влаги и питательных веществ. Эта общая применимость предложенной модели вытекает из логической согласованности свойств экотопа с экофизиологическим пониманием процесса образования древесины (Pokharel et al., 2014).

Хотя было показано, что изменчивость плотности древесины на уровне отдельных деревьев может быть в значительной степени объяснена свойствами экотопа, некоторая дополнительная изменчивость может быть объяснена размером крон деревьев. С точки зрения лесоводства, дерево испытывает влияние свойств экотопа на протяжении всей своей жизни, но текущий размер кроны или ранговое положение дерева могут резко измениться, например, вследствие хозяйственного вмешательства. Разработанная модель объяснила более 32 % общего варьирования, при этом наиболее важной прогностической переменной была добротность экотопа. Знание взаимосвязей между экотопами и качеством древесины может способствовать эффективному планированию ведения лесного хозяйства в ельниках Канады (Pokharel et al., 2014).

4.3. Контроль качества древесины ствола и ветвей в процессе лесовыращивания

Камбиальный рост дерева включает многочисленные явления из областей биофизики, биохимии и клеточной биологии, и лишь немногие из них до сих пор хорошо изучены (Savidge, 2001). Ни в лесном хозяйстве, ни в биологии никогда не было особой решимости развивать глубокое понимание того, как деревья производят древесину, и существующий прогресс был результатом частичных усилий нескольких отдельных лиц и небольших групп. Под давлением растущих потребностей в древесине и древесном волокне, связанных с ростом численности населения и сокращением площади лесов, потребность в более глубоком знании биологических факторов, контролирующих формирование древесины, как в количественном, так и в

качественном отношении, представляется очевидной (Savidge, 2001, 2003).

Повышенное внимание в мире к устойчивому ведению лесного хозяйства требует учета как экологических, так и социально-экономических условий (van Leeuwen et al., 2011). В результате растущего объема поступающей на рынок древесины крайне важно развивать надлежащее эффективное ее использование по всей цепочке поставок (Gil et al., 2010). Различные типы древесных продуктов требуют различных сведений о свойствах сырья (Nuutinen et al., 2009). Соответствие качества древесины требованиям рынка позволяет максимизировать ценность конечных запасов древесины и повысить рентабельность производства. Информация о плотности древесины является обязательным требованием на многих рынках древесной продукции (Acuna, Murphy, 2007; Deng et al., 2014).

Более эффективное производство древесины необходимо для удовлетворения растущего спроса на древесную биомассу в развивающейся лесной биоэкономике и при переходе к низкоуглеродному и ресурсоэффективному производству, в котором ископаемые ресурсы заменяются возобновляемыми источниками энергии (The Finnish Bioeconomy Strategy, 2014; Scarlat et al., 2015). С одной стороны, растет спрос на длительное использование лесов (например для рекреации и охраны природы), и экосистемные услуги должны быть безопасными и поддерживаться в надлежащем состоянии. В целом растущий спрос на древесную биомассу увеличивает воздействие на окружающую среду из-за необходимости увеличения объемов заготавливаемой древесины. С другой стороны, существуют различные способы повышения ресурсоэффективности и продуктивности древесины на единице площади, такие как использование улучшенного семенного материала при лесовосстановлении, оптимизация густоты посадки и режимов прореживаний, ирригация, внесение удобрений и изменение продолжительности оборота рубки (Howe, 1968, 1970; Moehring et al., 1975; Hsu, Walters, 1975; Вярбила, Шлейнис, 1981; Гелес и др., 1987; Kellomäki et al., 2005; Корчагов, Мелехов, 2009; Козлов и др., 2009а,б; Love-Myers et al., 2010; Данилов и др., 2011; Burkhart, Tomé, 2012; Routa et al., 2013; Kilpeläinen et al., 2016; Соколов и др., 2016).

Поскольку базисная плотность коррелирует с прочностью и физическими свойствами, она используется в качестве определителя качества древесины и критерия при выборе способа ее использования (Zobel, van Buijtenen, 1989; Lindström, 1996c; Savidge, 2003; Heräjärvi,

2004). Плотность древесины варьирует между деревьями и в пределах дерева (Downes et al., 1997) и в последнем случае влияет на технологические свойства каждого сортимента (Raymond, Joe, 2007). Более высокая плотность требуется для производства древесных плит с улучшенными механическими свойствами (Hsu, 1997), в то время как более низкую плотность предпочитают производители целлюлозы и бумаги (Downes et al., 1997). Углубленное изучение базисной плотности ствола дает возможность максимизировать потребительную стоимость заготовляемой древесины (Deng et al., 2014).

Особенности формирования древесины под влиянием лесоводственных мероприятий широко изучались на протяжении полутора столетий. Однако этот интерес не ограничивался влиянием структуры древесины на конечные потребительские свойства целлюлознобумажных и цельных изделий из древесины. Интерес был сосредоточен также на том, как деревья регулируют процесс формирования древесины, чтобы адаптироваться к экологическим требованиям. По мнению X. Линдстрёма (Lindström, 1996a), для того чтобы путем лесоводственных мероприятий изменять свойства древесины, недостаточно лишь констатировать наличие изменчивости этих свойств. Необходимо знать природу процессов, которые определяют структуру древесины. Другими словами, чтобы контролировать изменчивость квалиметрии древесины посредством лесоводственных мероприятий, необходимо иметь базовое представление о факторах, влияющих на камбиальную активность при дифференциации ксилемы (Lindström, 1996a).

В связи с тенденцией в лесном хозяйстве по постепенному сокращению оборота рубки качество древесины стало одной из главных проблем многих отраслей лесного сектора (Tsoumis, Bendtsen, 1978; Zobel, van Buijtenen, 1989; Zobel, Sprague, 1998). Стало ясно, что качество и количество древесины не могут рассматриваться как независимые факторы, что улучшение качества древесины должно стать неотъемлемой частью большинства селекционных программ (Zobel, Talbert, 1984; Vargas-Hernandez, Adams, 1991; Abdel-Gadir, Krahmer, 1993 a,b; Zhang, Morgenstern, 1995; Zobel, Jett, 1995; Rozenberg et al., 2001; Viherä-Aarnio, Velling, 2017) и что плотность древесины является идеальным объектом в селекционных программах (Zobel, van Buijtenen, 1989; Barnes et al., 1992, 1994; Woods et al., 1995; Zobel, Jett, 1995; Mörling, Valinger, 1999; Cown et al., 2004; Raiskila et al., 2006; Fukatsu et al., 2011; Turinawe et al., 2014; Lamara et al., 2016; Viherä-Aarnio, Velling, 2017; Zhou et al., 2019; Hayatgheibi et al., 2019).

С целью определения генетических корреляций между компонентами плотности сосны приморской был собран материал с 180 деревьев в возрасте 18 лет путем извлечения кернов на высоте груди (Louzada, 2003). В опыт были включены 15 семейств. Компоненты плотности древесины измерялись методом рентгеновской денситометрии. Средняя плотность годичного кольца больше зависела от структуры ранней древесины (главным образом от ее плотности), чем от структуры поздней. Среди всех проанализированных компонентов ранневесенние кольца выявили самый высокий и стабильный генетический контроль, не показав неблагоприятной генетической корреляции по отношению к другим компонентам. Поэтому плотность ранневесенних колец рекомендована как наиболее подходящий признак для включения в будущие селекционные программы (Louzada, 2003).

Знание свойств древесных волокон (СДВ) важно для повышения экономической ценности древесины и обеспечения долгосрочной устойчивости лесного сектора (МасКепzie, Bruemmer, 2009; Blanchette et al., 2015). Свойства древесных волокон представляют внутренние характеристики стволов деревьев и имеют практическое значение для качества вырабатываемого продукта. Плотность древесины является ключевым свойством, влияющим на прочностные свойства пиломатериалов, а также на выход целлюлозы и на энергозатраты в процессе производства бумаги. Угол микрофибрилл, длина волокон и модуль упругости являются другими промышленно важными свойствами, влияющими на прочность пиломатериалов и качество бумажных изделий (Josza, Middleton, 1994). Однако, несмотря на общепризнанную важность свойств древесных волокон для производственных процессов и потенциальной ценности продукции, в системах инвентаризации лесов информация о них обычно отсутствует.

Для обеспечения контроля качества древесины ствола и ветвей в процессе лесовыращивания необходимо конструирование реалистичной модели для прогноза влияния лесохозяйственных мероприятий на структуру древесины (Denne, Dodd, 1980). Для решения проблемы качества древесного сырья при лесовыращивании необходимо прежде всего найти способы управления этим процессом и усовершенствования как лесоводственно-древесиноведческих, так и лесотаксационных методов оценки качества древесины на корню (Полубояринов, 1976 б). Необходимо подвергнуть анализу и моделированию все взаимодействующие процессы, участвующие в камбиальном делении, с учетом

факторов среды обитания и лесохозяйственных мероприятий, влияющих на эти процессы (Denne, Dodd, 1980). Для количественного описания этого процесса была изучена динамика формирования древесины в стволе и ветвях 1-го порядка деревьев хвойного (ель ситхинская), лиственного рассеянно-порового (клён белый) и лиственного кольцепорового видов (ясень обыкновенный), а именно сезонной динамики камбиальной активности и структуры древесины в связи со степенью освещения и распределения массы ассимиляционного аппарата по профилю крон деревьев (Denne, Dodd, 1980).

Камбиальная активность определялась двумя методами: последовательным взятием модельных деревьев с интервалом в течение вегетационного периода либо прокалыванием камбия иглой с интервалом в 2—3 недели. Следы иглы в камбии выявляли при последующей валке дерева. Начало камбиальной активности и скорость образования трахеид определяли по регрессионной зависимости формирования древесины во времени. Поскольку этим методом нельзя точно определить время камбиальной «спячки» вследствие того, что прокалывание камбия вызывает торможение (regrowth) его роста, время спячки было определено последовательным выборочным учетом. Образцы взяты из каждой мутовки ствола у трех доминирующих ветвей. Место взятия образцов — посередине междоузлий как вдоль ствола, так и вдоль ветвей (Denne, Dodd, 1980).

Установлено, что у ели ширина годичного кольца увеличивается вниз по стволу до максимума в середине кроны и затем снижается до минимума у основания кроны, иногда вновь слегка увеличиваясь у основания ствола. Максимум ширины кольца соответствует междоузлию с максимальной массой хвои первого года, что на одно междоузлие выше максимума общей массы хвои.

В качестве более детальной количественной характеристики ширины кольца авторы (Denne, Dodd, 1980) рассматривают его компоненты – число трахеид и их диаметр. Наибольшее число трахеид в точке максимальной массы хвои первого года свидетельствует о том, что в этой точке образование трахеид начинается в первую очередь, а затем уже идет вверх и вниз по стволу. К этой же точке приурочена максимальная скорость образования трахеид. Аналогичная закономерность увеличения базисной плотности древесины в направлении вниз по стволу до его середины с последующим снижением в направлении к основанию ствола была выявлена у эвкалипта в Уганде (Sseremba et al., 2020).

В ветвях наиболее раннее образование трахеид обнаруживается в их вершинах в нижней части кроны, а наиболее позднее - в верхушечном побеге. Это соответствует последовательности раскрытия почек в этих частях кроны. По известной длине ветви авторы (Denne, Dodd, 1980) рассчитали скорость продвижения начала образования трахеид в каждой ветви по ее междоузлиям. В нижних ветвях камбиальная активность прогрессирует медленнее в сравнении с верхними ветвями. Для прогноза начала образования трахеид в стволе авторы зафиксировали, во-первых, время распускания почек, во-вторых, длину ветви, тесно связанную с интенсивностью освещения, и, в-третьих, скорость продвижения начала камбиальной активности в нижние части ветвей и ствола. Установлено, что в ветвях как ширина кольца, так и скорость образования волокон древесины тесно связаны с интенсивностью освещения их вершин. Скорость образования древесины возрастает с увеличением интенсивности освещения независимо от положения ветви в профиле кроны и снижается по мере увеличения числа мутовок на ветвях по направлению к нижней части ствола независимо от интенсивности освещения. Продолжительность камбиальной активности ветвей также тесно связана с интенсивностью освещения, и спячка камбия начинается раньше при низкой его интенсивности (Denne, 1974). Поздняя древесина образуется у основания ветвей раньше, чем у их вершин вследствие более быстрого сезонного увеличения толщины стенок трахеид в направлении от вершины к основанию ветви (Denne, Dodd, 1980).

У лиственных древесных видов клёна белого и ясеня обыкновенного связи ширины кольца с массой хвои по профилю кроны не было выявлено. У клена, как и у ели, образование волокон начинается раньше в вершинах нижних ветвей и в последнюю очередь — в главном побеге также в соответствии с последовательностью раскрытия почек. Однако в отличие от ели образование волокон начинается раньше вверху ствола и в последнюю очередь — у его основания. Скорость продвижения камбиальной активности вниз по стволу значительно выше, чем вниз по ветвям. У ясеня как кольцепорового вида камбиальная активность начинается почти одновременно по всему стволу с незначительным запаздыванием у его основания (Denne, Dodd, 1980).

У клёна и ясеня, как и у ели, изменение ширины кольца в направлении к основанию ствола связано с изменением времени реактивации (начала камбиальной активности), скорости образования волокон и их диаметра. У обоих лиственных видов, как и у ели,

образование волокон изменяется с интенсивностью освещения ветвей. Установлено, что при элиминировании эффекта освещения положение ветви в профиле кроны не оказывает или оказывает незначительное влияние на количество волокон, а освещенность при элиминировании высоты крепления мутовки оказывает существенное влияние на число волокон (P > 0,001). Скорость образования волокон возрастает по мере повышения интенсивности освещения. Различие в скорости образования волокон (у клёна 0,31 и у ясеня 0,09 клетки в день) в слабо освещенных ветвях показало, что ветви клёна более теневыносливы, чем ветви ясеня (Denne, Dodd, 1980).

Плотность древесины клёна снижается вниз по стволу. Установлено, что она повышается с увеличением камбиального возраста колец независимо от ширины кольца. При элиминировании влияния камбиального возраста корреляция между плотностью и шириной кольца оказывается незначимой. У ясеня плотность древесины существенно связана с шириной кольца, поскольку доля поздней древесины возрастает с увеличением ширины кольца, и наиболее узкие кольца почти полностью состоят из сосудов ранней древесины. Поскольку у клена размер волокон варьирует по ширине кольца незначительно, его структура аналитически легче описывается, чем у древесных видов, изменяющих размеры волокон в направлении от ранней древесины к поздней. Толщина стенки волокон у клёна несколько увеличивается с начала наращивания кольца до максимума в его середине и затем стабилизируется, однако проявляется значительное варьирование значений.

Средний диаметр волокна у клёна вниз по стволу увеличивается по мере удаления от вершины главного побега. Аналитически эта закономерность выражается прямой зависимостью квадрата диаметра волокна от расстояния образца от вершины ствола. Средняя толщина стенки волокна возрастает в этом же направлении, причем площадь поперечного сечения стенки волокна увеличивается линейно с изменением расстояния от вершины ствола. С использованием названных закономерностей была рассчитана площадь сечения стенки волокна, отнесенная к площади сечения волокна в целом, которая также увеличивается линейно с расстоянием от вершины как независимой переменной, хотя последняя объясняет всего 20 % общего варьирования названного относительного показателя. Было установлено, что доля сосудов на единице площади сечения снижается вниз по стволу, а доля волокон повышается. Сделан вывод, что у молодых деревьев клёна увеличение плотности вниз по стволу связано как с возрастанием

соотношения волокон и сосудов по мере наращивания кольца, так и с увеличением соотношения стенок и просветов внутри волокон (Denne, Dodd, 1980).

Таким образом, система выявленных закономерностей дает возможность конструирования реалистичной модели для прогноза эффекта лесохозяйственных мероприятий в отношении структуры древесины и контроля ее качества (Denne, Dodd, 1980).

4.4. Моделирование динамики «кажущейся» плотности и содержания сухого вещества в древесине растущих деревьев с учетом формы ствола (на примере сосновых, березовых и осиновых древостоев степной зоны)

В связи с возрастной динамикой конуса нарастания ствола соотношение древесины с различной физиологически обусловленной влажностью и плотностью изменяется в направлении от основания к вершине ствола и от сердцевины к коре. Если не учитывать эти продольные и радиальные изменения, это приведет к существенным смещениям при оценке биомассы ствола (Nylinder, 1961; Полубояринов, 1976а; Исаева, 1978; Singh, 1984; Heräjärvi, 2004; Chave et al., 2006; Repola, 2006; Jyske et al., 2008; Henry et al., 2010; Liepiņš, Liepiņš, 2017; De Mil et al., 2018). Поэтому во многих публикациях предлагаются алгоритмы расчета средней плотности древесины на основе известных локальных значений (Полубояринов, 1976 а, б; Исаева, 1978; Усольцев, 1983, 1988; Bergstedt, Olesen, 2000; Repola, 2006; Henry et al., 2010; Skovsgaard et al., 2011; Djomo et al., 2017; Kimberley et al., 2017).

Задача исследования квалиметрических характеристик деревьев и древостоев в ресурсоведческом плане состоит в разработке принципов многомерного подхода к объяснению возрастной и экологической изменчивости плотности и содержания абсолютно сухого вещества древесины и коры с реализацией этого подхода на конкретных примерах.

Некоторые исследователи (Klem, 1965; Hakkila, 1966; Полубояринов, Давидов, 1975; Исаева, 1978), изучая изменчивость свойств древесины на уровне дерева и древостоя, применяют многофакторный подход, доводя при этом число учтенных факторов до 12 (Klem, 1965), из которых статистически достоверными оказываются обычно не более двух (Полубояринов, 1976а; Исаева, 1978) при высокой остаточной дисперсии исследуемого показателя (до 57–84 %). Это объяс-

няется, по-видимому, не только известной трудностью учета некоторых существенных факторов (индивидуальная наследуемость признака, микроусловия эколого-ценотической среды отдельного дерева в их ретроспективной временной динамике и др.), но и недооценкой качественного анализа как исходного этапа математического моделирования, включающего, в частности, интерпретацию и отбор наиболее информативных факторов и введение их в форме, снижающей уровень вариабельности.

Существенное повышение точности опосредованного, или косвенного, определения плотности и влажности древесины растущих деревьев при столь значительной доле остаточного варьирования на начальном этапе исследования весьма трудно реализовать даже с использованием биологически обоснованных и сравнительно немногочисленных факторов воздействия, и еще труднее оправдать такую постановку вопроса в качестве самоцели «уточнения ради уточнения». В этой связи есть основание полагать, что на первом этапе моделирования важно выявить по возможности большее число статистически значимых факторов и объяснить характер или механизм их воздействия на динамику искомого показателя, т.е. дать определенные предпосылки для системного подхода к решению проблемы, следствием полной реализации которого станет не только повышение точности учета признака, но и возможность прогнозирования его динамики под воздействием эндо- и экзогенных факторов (Усольцев, 1988).

В опубликованных работах по квалиметрии лесной фитомассы (Усольцев, 1983, 1984а) подчеркивается, что в терминах ее биологической продуктивности нет необходимости исследовать в качестве исходного признака базисную плотность древесины ρ_{δ} – показатель, востребованный в прикладном отношении, но теряющий информативность при весовом методе учета фракций фитомассы. Это показатель интегральный, который можно выразить как произведение плотности в свежесрубленном состоянии древесины ρ_W на содержание абсолютно сухого вещества S, %, предполагая, что объемы древесины в свежесрубленном и влагонасыщенном состояниях практически одинаковы (Семечкина, 1978). Первый показатель из названных используется для пересчета объема ствола на его массу, а второй – для пересчета последней со свежесрубленного состояния на абсолютно сухое. С учетом различной реакции названных двух исходных показателей на факторы воздействия и различного практического назначения их анализ выполнен порознь (Усольцев, 1983, 1984а).

Исследования биологической продуктивности сосновых, березовых и осиновых древостоев были выполнены в островных борах степной зоны, а также в колочных березово-осиновых насаждениях лесостепной зоны (Усольцев, 1973, 1985б). Исходные данные получены в древостоях III класса бонитета: для сосны — по данным 140 модельных деревьев на 14 пробных площадях в возрасте от 25 до 106 лет, для березы — по 253 деревьям на 9 пробных площадях в возрасте от 5 до 50 лет и для осины — по 70 деревьям на 7 площадях в возрасте древостоев от 10 до 50 лет. Модельные деревья на пробных площадях взяты по группам рангов толщины (Усольцев, 1983), и у каждого по относительным высотам ствола взято по 10 дисков (выпилов).

В литературе имеется несколько методов взятия образцов для определения квалиметрических показателей древесины, в том числе ГОСТы (2006, 1984). Отличительная особенность метода дисков, основанного на стереометрическом определении объема, состоит в том, что при сравнительно меньшей точности стереометрического определения объема образцов ствола и ветвей он дает возможность исследовать плотность в свежесрубленном состоянии ρ_W и содержание абсолютно сухого вещества S, %, у деревьев на всех возрастных этапах, включая начальный, когда толщина ствола составляет доли сантиметра, причем не только древесины, но также коры, и не только ствола дерева, но его ветвей и скелетных корней.

С целью снижения ошибки измерения объема дисков последние брали в сечениях ствола с наименьшими локальными флюктуациями формы и в то же время вблизи фиксированных относительных высот ствола: 0; 0,1; 0,2; ...; 0,9. Диаметр диска в коре и без коры замеряли штангенциркулем с точностью 0,1 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях, отделяли кору, взвешивали с точностью 0,1 г, а затем сушили в термостате до постоянной массы и вновь взвешивали. Для предотвращения потери влаги в период между выпиливанием диска (тотчас после валки дерева) и его взвешиванием диски помещали в отдельные пластиковые пакеты известной массы.

Согласно О.И. Полубояринову (1976а), наиболее информативными факторами, определяющими плотность древесины, являются возраст и скорость роста дерева. У некоторых древесных видов их влияние на плотность древесины оказывается противоположным, а поскольку оба фактора проявляются в размерах ствола, в частности в его диаметре, то последний часто не оказывает на плотность статистически значимого влияния (Полубояринов, 1976а; Исаева, 1978). Легко замеряемые морфологические параметры дерева и древостоя

являются интегральными и одновременно отражают: текущая густота древостоя — влияние возраста, начальной густоты и эдафических условий; линейные размеры ствола — влияние названных факторов и ценотического положения дерева; полнота является функцией произведения среднего диаметра древостоя и текущей густоты, возрастная динамика которых имеет противоположные тенденции (Биомасса..., 2020).

Вследствие комплексного характера морфологических параметров дерева и древостоя был применен метод вычленения действующих факторов из их совокупности путем введения индексных величин, которые при практическом применении моделей преобразуются в исходные. Подобный метод был использован при моделировании динамики фитомассы деревьев сосны по их возрасту и индексным параметрам: относительной густоте древостоя как отношению фактического числа стволов в данном возрасте к табличному и рангу дерева по толщине ствола (Усольцев и др., 1979).

Динамика текущего прироста фитомассы, отражаемого в ширине годичного кольца, и динамика накопления фитомассы, выражаемого интегралом функции ее прироста, — процессы взаимосвязанные. Это дало основание предположить, что в исследованиях биологической продуктивности древостоев эти процессы определяются одним общим набором факторов. Предполагалось также, что влияние индивидуальной наследуемости, флюктуаций локальных эдафических условий и климата, сезонной и суточной динамики запаса влаги в стволе, обусловленной изменением физиологической активности дерева, и другие при исследовании биологической продуктивности древостоев играют второстепенную роль, и поэтому воздействием таких факторов в локальных условиях местопроизрастания на начальном этапе исследований можно пренебречь (Усольцев, 1983).

Тогда возрастная динамика ширины годичного кольца определяется как производная от сигмообразной функции роста, на которую накладывается влияние ценотических условий, в частности пространства роста дерева. Его можно охарактеризовать средним показателем, определяемым относительной густотой древостоя. Это среднее пространство роста в пределах древостоя дифференцировано в зависимости от ценотического положения дерева. Учитывая определенную обусловленность квалиметрических показателей древесины средней шириной древесных колец, предполагали, что общая тенденция динамики ρ_W и S в чистом одновозрастном древостое в данных эдафических условиях при отсутствии хозяйственного вмешательства должна

определяться возрастом, относительной густотой древостоя, представляющей вычлененную безразмерную характеристику плотности (полноты) древостоя, свободную от влияния изменения числа стволов в процессе естественного изреживания, и рангом дерева по толщине в отличие от диаметра ствола, свободного от влияния возраста и густоты древостоя и характеризующего только ценотическое положение дерева в древостое (Усольцев, 1983).

Вследствие возрастной динамики конуса нарастания ствола, определяющей изменение соотношений древесины с различной физиологически обусловленной влажностью и плотностью в направлении от основания ствола к его вершине, ρ_W и S изменяются вдоль по стволу (Исаева, 1978). С целью вычленения этой закономерности, т.е. элиминирования изменчивости высоты дерева как комплексного фактора, отражающего влияние возраста, ценотического положения дерева, эдафических условий и др., в расчет моделей динамики локальных ρ_W и S древесины и коры, наряду с названными тремя факторами (возраст, относительная густота, ранг дерева по толщине ствола), включено положение диска по высоте ствола в долях от общей высоты дерева. Модели в целом представлены зависимостями общего вида:

$$\rho_{w} = f(A, Z, R_{d}, h); S = f(A, Z, R_{d}, h).$$
 (34)

В зависимостях (34): P_w — локальная плотность древесины или коры ствола в свежесрубленном состоянии, кг/м³; S — локальное содержание сухого вещества древесины или коры ствола, %; A — возраст древостоя, лет; Z — относительная густота древостоя; R_d — ранг дерева по толщине ствола; h — относительная высота среза диска в долях от общей высоты дерева. Расчет моделей (34) показал, что включенные в них четыре независимых переменных и их сочетания объясняют 55—68 и 60—95 % общего варьирования ρ_w соответственно древесины и коры трех древесных видов и 53—83 и 57—93 % общего варьирования S соответственно древесины и коры тех же видов (Усольцев, 1984а).

Исследование биопродуктивности деревьев и древостоев предполагает знание соотношений локальных ρ и средних для всего ствола значений плотности ρ_{cp} и содержания сухого вещества S_{cp} . Л.Н. Исаевой (1978) ρ_{cp} найдена как среднеарифметическое значение локальных плотностей, распределенных вдоль по стволу. Однако с учетом изменения площади сечения по высоте ствола более корректным следует считать нахождение ρ_{cp} как величины, средневзвешенной по площади сечения ствола по формуле

$$\rho_{cp} = \sum_{h=0}^{1} \rho_{wi} d_i^2 / \sum_{h=0}^{1} d_i^2, \qquad (35)$$

где ρ_{wi} и d_i — соответственно плотность древесины в свежесрубленном состоянии в i-м сечении и диаметр ствола без коры там же. Выражение (35) приводится к интегральной форме записи:

- для древесины

$$\rho_{cp} = \frac{\int_{0}^{1} (\rho_{w} d^{2}) dh}{\int_{0}^{1} (d^{2}) dh}; \qquad S_{cp} = \frac{\int_{0}^{1} (Sd^{2}) dh}{\int_{0}^{1} (d^{2}) dh}; \qquad (36)$$

- и для коры

$$\rho_{cp} = \frac{\int_{0}^{1} \left\{ \rho_{w} \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] \right\} dh}{\int_{0}^{1} \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] dh}; \quad S_{cp} = \frac{\int_{0}^{1} \left\{ S \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] \right\} dh}{\int_{0}^{1} \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] dh}; \quad (37)$$

где t — толщина коры, изменяющаяся вдоль по образующей ствола, см, а также: $(\rho_w d^2) = f(h)$; $(S d^2) = f(h)$; $(d^2) = f(h)$; $\rho_w[(2t+d)^2-d^2]$; $S[(2t+d)^2-d^2]$; $[(2t+d)^2-d^2]$, т. е. подынтегральные выражения являются функцией только относительного местоположения вдоль по стволу, а d характеризует в данном случае лишь форму образующей ствола (Захаров, 1955, 1967; Gray, 1956; Preussner, 1974; Белов, 1974; Никитин, 1979; Kilkki, Varmola, 1981; Тябера, 1982; Артемьева, Кофман, 1984; Огтегоd, 1986; Tomusiak, Zarzyński, 2007; Sharma, Parton, 2009), но не линейный размер его как морфологический параметр. Поэтому при нахождении подынтегральных функций в (36) и (37) появилась необходимость исследования формы ствола, модель которой априорно определена теми же вышеназванными факторами

$$\eta_{\delta\kappa} = f(A, Z, R_d, h); \qquad \eta_{\kappa} = f(A, Z, R_d, h), \qquad (38)$$

где $\eta_{\delta\kappa} = d/d_{0,I}$ — числа сбега ствола без коры; $\eta_{\kappa} = (D_i - d_i)/(D_{0,I} - d_{0,I}) = = t_i/t_{0,I}$ — числа сбега коры; D_i — диаметр в i-м сечении ствола в коре; d_i — диаметр в i-м сечении ствола без коры; $D_{0,I}$ — диаметр ствола в коре на относительной высоте h, в десятых долях общей высоты ствола; $d_{0,I}$ —

то же, диаметр ствола без коры; t_i – толщина коры в i-м сечении ствола; $t_{0,1}$ – то же на относительной высоте h, в десятых долях общей высоты ствола. Расчет уравнений (38) показал, что включенные в них независимые переменные и их сочетания объясняют 98,8–99,4 % общего варьирования $\eta_{\delta\kappa}$ трех древесных видов и 92,2–95,1 % общего варьирования η_{κ} тех же видов (Усольцев, 1988).

Чтобы получить при заданных значениях A, Z и R_d , подставляемых в (34) и (38), соответствующие подынтегральные выражения в (36) и (37), было необходимо предварительно рассчитать значения d_i и t_i по данным сбега ствола без коры $\eta_{\delta\kappa}$ и сбега коры η_{κ} для деревьев задаваемого диаметра (ранга) в пределах древостоя данного возраста и густоты. Для получения значений d_i и t_i на различных относительных высотах h и для расчета соотношений морфометрических признаков деревьев применена вспомогательная трехэтапная процедура (Усольцев, 1984б; Усольцев, 1988). Названная процедура была включена в общие алгоритмы расчета средних значений плотности в свежесрубленном состоянии древесины и коры всего ствола и содержания сухого вещества в древесине и коре всего ствола дерева, представленных цепочками рекурсивных зависимостей:

- для средней плотности в свежесрубленном состоянии древесины ствола

I.
$$\rho_{eg} = \frac{\int_{0}^{1} (\rho_{w}d^{2}) dh}{\int_{0}^{1} (d^{2}) dh};$$
I. a)
$$(\rho_{wi}d_{i}^{2}) = f(h), \quad 6)d_{i}^{2} = f(h);$$

$$\begin{cases} a) \rho_{wi} = f(A, h, R_{d}, Z), \\ d_{i} = f(\eta_{\delta\kappa}, d_{0,1}), \\ \uparrow \\ 0) \end{cases}$$

$$\begin{cases} d_{i} = f(A, h, R_{d}, Z), \\ \uparrow \\ R_{d} = f(D); \\ R_{d} = f(D); \end{cases}$$

$$\begin{cases} a) \quad d_{0,1} = f(D, H), \\ \uparrow \\ 6) \quad H = f(A, D), \end{cases}$$

$$(39)$$

- для среднего содержания абсолютно сухого вещества в древесине ствола

I.
$$S_{cp} = \frac{0}{1} (Sd^2) dh$$

I. $S_{cp} = \frac{0}{1} (d^2) dh$
I. a) $(S_i d_i^2) = f(h)$, 6) $d_i^2 = f(h)$;
a) $S_i = f(A, h, R_d, Z)$,

$$\begin{cases} d_i = f(\eta_{\delta x}, d_{0,1}), \\ \uparrow \\ R_d = f(D); \end{cases}$$
(40)
I. I.
$$\begin{cases} a) d_{0,1} = f(D, H), \\ \uparrow \\ 6) H = f(A, D), \end{cases}$$

- для средней плотности в свежесрубленном состоянии коры ствола

I.
$$\rho_{cp} = \frac{\int_{0}^{1} \left\{ \rho_{w} \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] \right\} dh}{\int_{0}^{1} \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] dh};$$
II.
$$\begin{cases} a) \left\{ \rho_{wi} \left[(2t_{i} + d_{i})^{2} - d_{i}^{2} \right] \right\} = f(h), \\ 6) \left[(2t_{i} + d_{i})^{2} - d_{i}^{2} \right] = f(h); \\ 6) t_{i} = f(A, h, R_{d}, Z), \\ 6) t_{i} = f(\eta_{\kappa}, t_{0,1}), \quad d_{i} = f(\eta_{\kappa}, d_{0,1}), \\ \uparrow \qquad \qquad \uparrow \\ B) \eta_{\kappa} = f(A, h), \quad \eta_{\kappa} = f(A, h, R_{d}, Z); \\ a) t_{0,1} = f(d_{0,1}, D, H), \\ 6) d_{0,1} = f(D, H), \\ B) H = f(A, D), \end{cases}$$

$$(41)$$

- для среднего содержания абсолютно сухого вещества в коре ствола

I.
$$S_{cp} = \frac{\int_{0}^{1} \left\{ S\left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] \right\} dh}{\int_{0}^{1} \left[(2t+d)^{2} - d^{2} \right] dh};$$

II.
$$\begin{cases} a) \left\{ S_{i} \left[(2t_{i} + d_{i})^{2} - d_{i}^{2} \right] \right\} = f(h), \\ 6) \left[(2t_{i} + d_{i})^{2} - d_{i}^{2} \right] = f(h); \end{cases}$$

$$\begin{cases} a) S_{i} = f(A, h, R_{d}, Z), \\ 6) t_{i} = f(\eta_{\kappa}, t_{0,1}), \quad d_{i} = f(\eta_{\kappa}, d_{0,1}), \\ \uparrow \qquad \qquad \uparrow \\ B) \eta_{\kappa} = f(A, h), \quad \eta_{\kappa\kappa} = f(A, h, R_{d}, Z), \end{cases}$$

$$\begin{cases} a) t_{0,1} = f(d_{0,1}, D, H), \\ 6) d_{0,1} = f(D, H), \\ B) H = f(A, D). \end{cases}$$

$$(42)$$

Рекурсивные уравнения (39)–(42) рассчитаны по фактическим исходным данным в последовательности, обозначенной стрелками, и полученные средние значения ρ_{cp} и S_{cp} были включены в следующий этап регрессионного моделирования согласно зависимостям общего вида:

$$\rho_{cp} = f(A, Z, R_d); S_{cp} = f(A, Z, R_d),$$
(43)

объясняющим 99,6–99,8 % общего варьирования ρ_{cp} и S_{cp} .

Уравнения (43) табулированы для нормальных древостоев (при Z=1) по возрасту деревьев и рангам, а также соответствующим ступеням толщины. Показатели базисной плотности ρ_{σ} получены умножением соответствующих значений ρ_{cp} и S_{cp} (табл. 10).

Таким образом, в результате реализации предложенного метода расчета средних квалиметрических показателей стволов в нормальных сосновых, березовых и осиновых древостоях лесостепных и степных регионов по расчетным локальным показателям, распределенным вдоль по стволу, составлены нормативные таблицы для определения плотности и содержания сухого вещества древесины и коры по возрасту и ступеням толщины стволов (Усольцев, 1984а).

Таблица 10

Расчетные показатели плотности в свежесрубленном состоянии, содержания сухого вещества и базисной плотности древесины и коры стволов трех древесных видов для нормальных древостоев по классам возраста и ступеням толщины стволов деревьев (Усольцев, 1984а)

D	Сту-	Ранг дере-	Древесина ствола			Кора ствола						
Воз- раст, лет	пень толщи- ны, см	ва по диа- метру ствола	$ ho_{cp}, \ ext{K}\Gamma/ ext{M}^3$	S_{cp} , %	$ ho_{\delta,}$ кг/ $ ext{M}^3$	$ ho_{cp},$ кг/м 3	S_{cp} , %	$ ho_{\delta,}$ кг/ $ ext{M}^3$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Сосна												
20	4	13	767	56,4	432	589	84,4	497				
	6	40	790	52,2	412	551	82,5	454				
	8	85	828	45,1	373	488	79,3	387				
	10	98	840	43,1	362	470	78,4	368				
50	8	16	770	55,0	424	585	84,3	493				
	12	54	802	50,8	407	532	83,1	442				
	16	85	828	47,3	392	488	82,1	401				
	12	18	772	54,3	419	582	84,3	491				
70	20	74	819	49,7	407	504	84,0	423				
	28	98	840	47,7	401	470	83,9	394				
100	16	11	766	53,7	411	592	84,3	499				
	28	72	817	51,4	420	506	86,3	437				
	40	98	840	50,5	424	470	87,1	409				
Береза												
20	4	30	840	56,6	475	1013	58,0	588				
	6	62	851	57,4	488	892	58,8	524				
	8	82	858	57,8	496	817	59,3	484				
	10	93	862	58,1	501	775	59,6	462				
	8	21	851	57,6	490	932	62,2	580				
40	12	56	862	58,4	503	843	65,1	549				
	24	86	873	59,1	516	766	67,7	518				
60	8	5	858	58,5	502	839	64,2	539				
	16	54	875	59,6	522	774	71,3	552				
	24	92	888	60,5	537	723	76,8	555				
80	16	31	881	60,3	531	702	72,9	512				
	24	78	897	61,3	550	696	82,5	574				
	32	96	903	61,8	558	694	86,2	598				

Окончание табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Осина												
10	1	10	732	60,0	439	965	53,2	513				
	2	50	750	58,5	439	999	53,2	531				
	3	80	764	57,4	439	1024	53,2	545				
	4	96	771	56,8	438	1038	53,2	553				
20	4	16	713	59,5	424	930	51,4	478				
	6	50	728	58,2	424	959	51,4	493				
	8	85	744	56,9	423	989	51,4	508				
	10	98	750	56,4	423	999	51,4	513				
30	8	25	695	58,9	409	898	50,7	455				
	10	50	706	58,0	409	919	50,7	466				
	12	73	717	57,1	409	939	50,7	476				
	14	89	724	56,5	409	952	50,7	483				
40	10	9	666	59,3	395	845	50,2	424				
	16	50	685	57,8	396	879	50,2	441				
	22	90	703	56,3	396	913	50,2	458				
50	18	24	652	58,5	381	817	49,7	406				
	22	50	663	57,5	381	839	49,7	417				
	26	82	678	56,3	381	866	49,7	430				

Представленный довольно громоздкий алгоритм расчетов может быть упрощен путем разработки соответствующей компьютерной программы, которая при наличии базы экспериментальных данных даст возможность расчета средних для стволов квалиметрических показателей древесины и коры деревьев без участия оператора.

Глава 5. БАЗИСНАЯ ПЛОТНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ СУХОГО ВЕЩЕСТВА

5.1. Характеристика некоторых взаимосвязей

Влага и экстрактивные вещества, заполняя пустоты древесины и пропитывая клеточные стенки, нарушают фракционный состав компонентов древесины и изменяют ее плотность (Полубояринов, 1976а). Изменение плотности древесины в абсолютно сухом состоянии по мере увеличения влажности от нулевой до максимальной демонстрирует диаграмма Ф. Кольмана и В. Коута (Kollmann, Cote, 1968), с по-

мощью которой можно определить плотность древесины при любой влажности по известным значениям плотности в абсолютно сухом состоянии (рис. 4). На рис. 4 видно, что у «тяжелой» древесины с абсолютной плотностью выше 1,1 г/см³ влияние объемного разбухания на плотность и связанное с ним увеличение объема до точки насыщения волокон перекрывает влияние повышения массы, происходящего за счет поглощения влаги, т.е. плотность такой древесины с увеличением влажности вначале снижается, а после перехода через точку предельной гигроскопичности начинает увеличиваться. По мере заполнения влагой и экстрактивными веществами всех пор изменчивость плотности древесины при максимальном влагонасыщении (а также в свежесрубленном состоянии) существенно снижается по сравнению с таковой в абсолютно сухом состоянии (Kollmann, Cote, 1968; Полубояринов, 1976а).

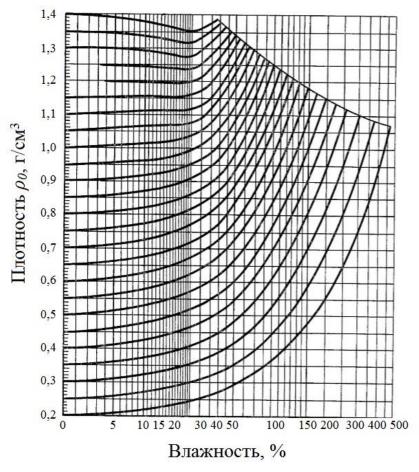


Рис. 4. Диаграмма для определения плотности древесины при разной влажности (Kollmann, Cote, 1968)

Тем не менее было установлено, что плотность свежесрубленной древесины увеличивается в направлении от основания к вершине ствола и в верхней его части превышает среднее значение на 20 и

30 % соответственно у сосны и ели, тогда как у березы и осины практически не изменяется по высоте (Закревский, 1972).

Исходя из положений физиологии древесных растений, касающихся их водного режима (Лир и др., 1974; Крамер, Козловский, 1983), О.И. Полубояринов с соавторами (1982) сделали предположение, что базисная плотность древесины растущего дерева является одним из «внутренних» факторов, определяющих ее влажность. Ими были предложены зависимости:

- для ели

$$\rho_{\delta} = 443,36 - 0,84 \ W_{a\delta c}; \ R^2 = 0,663; \tag{44}$$

- для сосны

$$\rho_{\delta} = 575,24 - 1,51 \ W_{a\delta c}; \ R^2 = 0,792;$$
 (45)

- для березы

$$\rho_{\delta} = 667,94 - 2,62 \ W_{a\delta c}; \ R^2 = 0,270. \tag{46}$$

Авторами сделан вывод, что полученная обратно пропорциональная связь базисной плотности с влажностью (рис. 5) расширяет наши представления о биологической роли плотности древесины в экологическом древесиноведении (Полубояринов и др., 1982). Аналогичные обратно пропорциональные зависимости были выявлены у Dipterocarpus indicus в Индии (Al-Sagheer, Prasad, 2010).

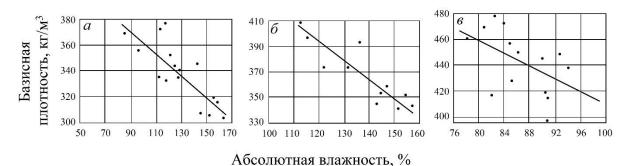


Рис. 5. Обратно пропорциональная связь базисной плотности ели (a), сосны (b) и березы (b) с абсолютной влажностью древесины ствола на фоне экспериментальных данных (Полубояринов и др., 1982)

Известно, что на плотность древесины влияет, кроме влажности, также содержание экстрактивных (смолистых) веществ, которое у сосны, например, повышает плотность в среднем на 6-8 %. Причем на плотность ядровой древесины оно влияет значительно сильнее (13,5 %), чем на плотность заболонной (5 %) (Keith, 1969). Благодаря наличию смол плотность древесины ветвей у хвойных, как было

показано выше, значительно выше плотности древесины ствола. Установлена также географическая изменчивость содержания смолистых веществ у хвойных видов: на севере и юге Финляндии, например, оно составляет соответственно 4,9 и 2,6 %, что влияет на плотность древесины (Полубояринов, 1976а).

Моделирование содержания сухого вещества в древесине деревьев дает возможность селекции генотипов с максимальным его содержанием и формирования древостоев с повышенным содержанием сухого вещества путем лесохозяйственных мероприятий (начальная густота посадки, интенсивность прореживаний, возраст ротации и т.п.). Корректная оценка содержания сухого вещества в свежесрубленной древесине дает возможность оптимизировать ее промышленное использование (Китаг et al., 2014). Это определяет необходимость трансформировать данные объема древесины в показатели содержания сухого вещества и плотности древесины (Bergstedt, Olesen, 2000).

Как уже упоминалось выше, в конце XIX – начале XX вв. исследователи не имели убедительных доказательств того, что ширина годревесины кольца является критерием добротности (Bauschinger, 1887; Hartig, 1895b; Janka, 1904; Богословский, 1915; Терлецкий, 1927). Убедительные доказательства появились, когда критерием добротности стали считать не всю ширину кольца, а лишь процент поздней древесины, обладающей наиболее толстыми клеточными стенками (Schwappach, 1897; Яхонтов, 1913; Киселева, Хван, Тем не менее, поскольку ширина годичного кольца легко определяется путем взятия кернов, в Дании было предложено базисную плотность выражать зависимостью от ширины годичного кольца (Olesen, 1976):

$$\rho_{\delta} = a + b/(\Delta r + c),\tag{47}$$

где Δr — ширина годичного кольца, мм; a, b и c — параметры модели. Параметр a интерпретируется как средняя базисная плотность ранней древесины, а c для насаждений Дании принят равным 2 (Bergstedt, Olesen, 2000). Параметры a и b зависят от класса бонитета и положения образца по высоте ствола. В одинаковых климатических условиях базисная плотность древесины выше на бедных почвах, чем на богатых (Madsen et al., 1985). Предполагается, что параметр a, как горизонтальная асимптота регрессии (50), при переходе от богатых почв (I класс бонитета) к бедным (V класс бонитета) увеличивается на 17 кг/м³ при уменьшении класса бонитета на один номер (например

с I до II или с II до III и т.д.). Соответственно, при одной и той же ширине годичного кольца базисная плотность древесины на бедных почвах в лесах Дании на 50 кг/m^3 выше, чем на богатых (Bergstedt, Olesen, 2000). В направлении от основания ствола к вершине параметр a уменьшается, а параметр b одновременно увеличивается. Влияние ширины годичного кольца на базисную плотность сильнее выражено в верхней части ствола (Thygesen, 1991). По-видимому, положение по высоте ствола влияет на параметр a только в сомкнутых древостоях, а в разреженных древостоях какое-либо ее влияние отсутствует (Olesen, 1982).

По сравнению с публикациями, посвященными плотности древесины, работ с результатами по содержанию сухого вещества сравнительно меньше, и приводятся эти данные или в связи с положением по высоте ствола (Исаева, 1963, 1966), либо с возрастом дерева и/или диаметром ствола (Данилов, 1948; Ефименко, 1974; Молчанов, 1974; Джабык-Карагайский бор, 2005; Bi et al., 2015), либо с процентом усушки древесины (Kelsey, 1956; Schulgasser, Witztum, 2015), либо как средние значения для того или иного компонента (фракции) фитомассы исследуемого объекта (Киртока, 1969; Лазу, 1969; Гейдеман, 1969; Щербаков, Зайцева, 1971; Поздняков, 1973; Усольцев, 1975а; Гусев, 1976). С целью прогноза содержания сухого вещества в стволах была исследована возможность комбинирования зависимости (47) с уравнениями сбега ствола. Установлено (Madsen, 1986, 1987), что варьирование параметра a, т.е. плотности ранней древесины, при расчете сухого вещества стволов существенно, тогда как варьирование параметра b несущественно.

5.2. Абсолютно сухая масса ствола и его объем

По материалам опытных рубок ухода в Дании, включающим замеры 1612 дисков на 235 модельных деревьях в возрасте от 15 до 102 лет, были разработаны модели для прогноза содержания сухого вещества в стволах деревьев ели европейской, где в качестве независимых переменных использованы полевые измерения их дендрометрических показателей (Bergstedt, Olesen, 2000). На относительных высотах ствола были взяты диски, у которых замерены объем методом вытеснения воды, диаметр и площадь сечения, количество годичных колец в сечении и расстояние сечения от основания ствола.

Поскольку параметры функции (47) зависят от положения диска по высоте ствола (Madsen, 1986, 1987), последнее было введено

в выражение (47) в качестве дополнительной независимой переменной, и получено уравнение

$$\rho_{\delta} = 220 + 3.91 \ h_d + (762 - 16.6 \ h_d) / (\Delta r_d + 2), \tag{48}$$

где h_d — расстояние диска от основания ствола, м; Δr_d — средняя ширина годичного кольца в сечении, мм; $R^2 = 0.30$; SE = 26.6 кг/м³.

Поскольку расстояние сечения от основания ствола и количество годичных колец в нем взаимосвязаны, уравнение (48) было модифицировано, в результате чего (49) оказалось более адекватным, чем (48), по отношению к исходным данным (Bergstedt, Olesen, 2000):

$$\rho_{\delta} = 255 + 119/n_d + 530/(\Delta r_d + 2), \tag{49}$$

где n_d — число годичных колец в сечении; $R^2 = 0.47$; SE = 25.0 кг/м³. Таким образом, модель (48), включающая в качестве независимых переменных среднюю ширину годичного кольца и расстояние от основания ствола, объясняет 30 % изменчивости базисной плотности древесины в данном сечении (диске), а модель, включающая среднюю ширину кольца и количество колец в сечении, объясняет 47 % изменчивости, что значительно больше, чем в первом случае.

По замерам дисков и обработке результатов рассчитана сухая масса древесины, приходящаяся на 1 м длины ствола. Построены эмпирические графики связи площади сечения ствола (рис. 6, а) и сухой массы древесины, приходящейся на 1 м длины ствола, (рис. 6, б), с расстоянием от основания ствола.



Рис. 6. Изменение площади сечения ствола в точке взятия диска (а) и сухой массы древесины, приходящейся на 1 пог. м ствола (б), с увеличением расстояния от основания ствола (Bergstedt, Olesen, 2000)

Площади, лежащие ниже эмпирических кривых на рис. 6, а и 6, б, представляют соответственно объем ствола без коры и сухую массу древесины всего ствола, которые могут быть получены интегрированием соответствующих кривых по оси ствола. Делением второго на первое получены эмпирические значения базисной плотности всего ствола. Эмпирическая зависимость базисной плотности древесины ствола от средней ширины годичного кольца отличалась большим разбросом данных относительно линии регрессии, вследствие, как считают авторы (Bergstedt, Olesen, 2000), сильного генетического варьирования (рис. 7). Это мнение, возможно, не лишено основания. Во Франции было сделано предположение, что большой разброс данных возникает по причине генетической изменчивости популяции, и проверили эту гипотезу на дугласии разных провениенций и клонов. После введения в модель, связывающую базисную плотность с шириной годичного кольца и камбиальным возрастом, дополнительного фактора, опосредующего генетический эффект, объясненная изменчивость модели повысилась с 20 до 54 % (Rozenberg et al., 2001). Большую роль в повышении точности модели, оценивающей базисную плотность древесины, играет также соблюдение корректности в процедуре получения и обработки кернов (Schimleck et al., 2019).

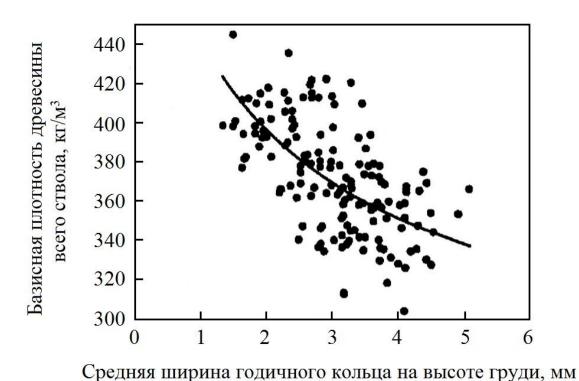


Рис. 7. Зависимость базисной плотности древесины всего ствола от средней ширины годичного кольца на высоте груди (Bergstedt, Olesen, 2000)

Было предложено уравнение зависимости массы сухого вещества древесины в ельниках от средней ширины годичного кольца и объема ствола дерева (Bergstedt, Olesen, 2000):

$$Ps = [257 + 556/(\Delta r_d + 2)]V, \tag{50}$$

где Ps — масса древесины ствола без коры в абсолютно сухом состоянии; V — объем ствола (Bergstedt, Olesen, 2000). Сопоставление расчетных данных, полученных по уравнению (50), и эмпирических данных выявило ошибку 10 % при отсутствии значимых смещений. Сделан вывод, что содержание сухого вещества в древесине не может быть определено с достаточной точностью недеструктивным способом, т.е. замером только морфологических показателей деревьев. Для этого необходимо взятие кернов в стволах исследуемых деревьев (Bergstedt, Olesen, 2000).

Содержание сухого вещества в растениях часто определяют на основе простой линейной связи с базисной плотностью (Liu, 1985; Bradbury, 1986; Woolfe, 1992; Teye et al., 2011), объясняющей 99 % общего варьирования искомого показателя, но подобные модели могут применяться только в случаях, когда известна базисная плотность растительной ткани.

Содержание сухого вещества является одним из важных свойств растений, изучаемых в экологии. Поскольку водный статус разных компонентов растений в разных экологических условиях может сильно различаться, предприняты попытки стандартизировать процедуры его определения (Garnier et al., 2001; Tackenberg, 2007). 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; Vile et al., 2005; Уткин и др., 2008; Konôpka et al., 2020), которая может быть определена по ее связи с содержанием сухого вещества. 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 содержание сухого вещества в качестве независимой переменной в уравнении связи с базисной плотностью объясняло 58 % изменчивости последней в совокупности данных 96 растений 17 видов. Поскольку в отношении различных компонентов растений (листва, ветви, ствол, корни) определение объема намного более трудоемко, чем определение содержания сухого вещества, эта

зависимость была предложена как наиболее перспективная (Shipley, Vu, 2002).

Для совокупности древесных и травянистых видов на 49 пробных площадях в Англии было проведено сравнительное исследование зависимости надземной чистой первичной продукции сообществ от содержания сухого вещества и от удельной поверхности листвы и установлено, что содержание сухого вещества объясняет наибольшую долю изменчивости первичной продукции (55 %) по сравнению с удельной поверхностью листвы, оценка которой к тому же намного трудозатратнее, чем определение содержания сухого вещества (Smart et al., 2017).

Глава 6. BIG DATA, ГИС-ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ КАРТИРОВАНИЯ КВАЛИМЕТРИИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

6.1. Эра Big Data и базы данных о количественных и качественных показателях фитомассы лесов

В последние годы мировая лесная экология переживает невиданный по масштабам информационный всплеск в оценке биологической продуктивности лесов в предположении антропогенного изменения климата и поиска возможностей его стабилизации. 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 ІТ-технологий открывают для этого широкие перспективы. Ещё в 1980 г. Дж. Мартин писал: «Историки будут рассматривать появление банков данных на ЭВМ и возможностей, связанных с ними, как шаг, изменивший природу эволюции общества и имеющий, возможно, большее значение, чем изобретение печатного станка» (цит. по: Борщев, 1982). Сегодня формирование подобных баз данных ведётся довольно интенсивно, в связи с чем научным сообществом констатируется наступление «эры больших массивов данных» (the Big Data Era: http://www.gfbinitiative.org/symposium2017), и на сформированных «больших массивах» выводятся глобальные закономерности по биологической продуктивности лесов и составляющих их деревьев (Crowther et al., 2015; Poorter et l., 2015; Liang et al., 2016; Jucker et al.,

2017). В нынешних условиях перехода к цифровой экономике — экономике, основанной на больших массивах цифровых данных, — термин Big Data становится одним из ключевых (https://www.osp.ru/iz/bigdata2018/).

Сегодня ключевые процессы жизнедеятельности человеческого общества перетекли в Интернет, и любое действие человека оставляет цифровой след, что влечет появление огромных массивов цифровой информации. В 2013 г. количество хранящейся в мире информации составило 1,2 трлн гигабайт, из которых на нецифровую информацию приходилось менее 2 % (Майер-Шенбергер, Кукьер, 2014). Согласно А.И. Савельеву (2015), общее количество информации удваивается каждые 2 года и составляет к 2020 г. порядка 40 зеттабайтов. В перспективе большая часть данных будет генерироваться не людьми, а различного рода устройствами в ходе их взаимодействий между собой и с сетями данных. Взаимодействие различного рода устройств в сети Интернет лежит в основе концепции «Интернета вещей» (Internet of Things) как следующего этапа развития «всемирной паутины», где машины будут не только производить, но и потреблять информацию (Савельев, 2015).

Big Data сегодня – это одно из стремительно развивающихся направлений IT-технологий. И.А. Самойлова (2017) пишет: «Если само понятие возникло сравнительно давно, то понимание, что это такое, оформилось недавно. Оказалось, что это не объёмы хранимых данных, точнее, не только объемы. Это не те данные, с которыми привык работать опытный аналитик. Они, скорее всего, не будут вписываться в строки и столбцы таблицы Excel или строки таблицы реляционной базы данных. И они, вероятно, не будут помещаться на жесткий диск обычного компьютера» (с. 26). Основным способом описания больших данных является аббревиатура «3V» – volume, velocity, variety, т.е. объём, скорость, разнообразие. Обычно считалось, что первые две составляющие триады – объём и скорость – ограничиваются ёмкостью и производительностью компьютера. Согласно «закону Мура», количество транзисторов в одной микросхеме удваивается каждый год и, соответственно, возрастает емкость компьютера, а при снятии некоторых существующих технических ограничений для создания квантового компьютера ёмкость и скорость обработки информации возрастает неограниченно (Пахомов, 2007). Более того, станет возможна квантовая связь – передача кубитов на расстояние, что приведет к возникновению своего рода квантового Интернета. Квантовая связь позволит обеспечить соединение всех желающих общаться, защищенное (законами квантовой механики) от подслушивания. Информация, хранимая в квантовых базах данных, будет защищена от копирования намного надежнее, чем сейчас (https://studfiles.net/preview/1511460/page:2/).

Как пишет И.А. Самойлова (2017), проблема возникает при реализации третьей «V» — разнообразия данных. Это не только строки и столбцы хорошо отформатированных данных, но и неструктурированные данные (книги, сообщения в блогах, фотографии, видео, аудио, комментарии к новостям и твитам), составляющие около 80 % объема современной информации. Исследование компании Forrester Research показало, что разнообразие является важнейшим и сложнейшим фактором при создании технологии Big Data. Термин «большой» означает не только объем, но и сложность, и многомерность. Разнообразие, являющееся одним из критериев в модели Гартнера (Laney, 2001), связано с сочетанием как источников, так и характера данных (Nymand-Andersen, 2016).

Большие данные (Big Data) тесно связаны с облачными технологиями. Они являются объектом интенсивных вычислительных операций и обеспечивают емкость хранилища облачной системы. 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. Система Big Data также ускоряет развитие облачных вычислений. Технология распределенного хранения информации, основанная на облачных вычислениях, даёт возможность эффективно управлять «большими данными» (Chen et al., 2014).

«Большие данные» десятилетней давности сегодня уже не кажутся «большими»: с каждым днем объемы информации расширяются, скорость её подачи увеличивается, а разнообразие источников и форматов данных растет (Nymand-Andersen, 2016). Технологии Big Data вместе с широким использованием облачных технологий создают новые возможности для интенсивной обработки данных в междисциплинарных областях знаний. При этом наибольшие проблемы в области Big Data связаны с охватом огромного разнообразия междисциплинарных данных и с обеспечением доверия между поставщиками данных и их пользователями (Lokers et al., 2016).

А.С. Дмитриев (2015) дает представление общей архитектуры решения Big Data. При работе с Big Data заранее неизвестно, какие зависимости будут обнаружены в многоформатном массиве данных,

постоянно нарастающем в реальном времени. Если в традиционных массивах данные для анализа непосредственно загружаются в аналитический инструментарий, то в Big Data аналитический инструментарий приближается к данным, встраивается в механизмы получения и обработки информации таким образом, чтобы обрабатывать их максимально быстро. Необходимыми технологическими элементами являются вычислительные ресурсы, «датчики» для сбора данных, каналы передачи информации, обрабатывающие программы, инструменты передачи обратной связи (порталы, целевая рассылка и пр.). Е. Карри (Curry, 2016) полагает, что для описания среды данных, поддерживаемой сообществом взаимодействующих организаций и отдельных лиц, в IT-терминах может быть полезна метафора «экосистемы». В естественных экосистемах разумные организмы контролируют свою энергию. В бизнес-экосистемах интеллектуальная компания управляет информацией и ее потоками. Экосистемы «больших данных» могут формироваться в отношении организаций, технологических платформ, внутри их секторов или между ними. Они имеются во многих промышленных секторах, где огромное количество данных перемещается между субъектами в рамках сложных цепочек поставок информации. Секторы с установленными или формирующимися экосистемами данных включают здравоохранение, финансы, логистику, медиа, производство и фармацевтику. Помимо самих данных, экосистемы «больших данных» могут также поддерживаться платформами управления данными, инфраструктурой и службами данных (Curry, 2016).

Несмотря на то, что модель «3V» приобрела большую популярность, предлагаются варианты её дополнения четвертой «V». В частности, М. Чен с соавторами (Chen et al., 2014) концепцию «больших данных» дополняют четвертой «V» – Value. Определение «4V» получило широкое признание, поскольку оно подчеркивает значение и необходимость изучения огромных скрытых сведений и обозначает чрезвычайную проблему в Big Data: как обнаруживать информацию из чрезвычайно варьирующих источников, как выявлять её ценность, как её использовать и как преобразовывать «кучу» данных в «большие данные» (Chen et al., 2014).

Иную четвертую «V» – Veracity, или неопределенность данных, добавляет к изначальной триаде П. Ниманд-Андерсен (Nymand-Andersen, 2016). Поскольку в центре внимания всегда находится оценка точности и неопределённости окружающей нас информации, то в преддверии любого анализа должен быть обеспечен статистиче-

ский принцип оценки имеющихся данных. На «большие данные» должны распространяться те же стандарты качества и доверительные интервалы, которые применяются к любым другим источникам, подвергаемым статистической обработке. Это особенно важно с учетом разной доступности и методологического разнообразия информации, используемой в различных регионах и странах (Nymand-Andersen, 2016).

«Таким образом, – констатирует А.И. Савельев (2015), – «большие данные» можно определить, как совокупность инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных огромных объёмов из различных источников, подверженных постоянным обновлениям, в целях повышения качества принятия управленческих решений, создания новых продуктов и повышения конкурентоспособности. ... «Большие данные» объединяют технику и технологии, которые извлекают смысл из данных на экстремальном пределе практичности» (с. 47).

Базы данных о фитомассе и чистой первичной продукции (ЧПП) лесов дают уникальные возможности для анализа продуктивности лесных экосистем в контексте биогеографии (Luo et al., 2014). После завершения работ по Международной биологической программе (МБП) было опубликовано несколько сводок по биологической продуктивности лесных насаждений, из них две были выполнены на глобальном уровне. Они являются наиболее полными и включают в себя около 1200 определений (DeAngelis et al., 1981; Cannell, 1982). В 1994 г. в рамках Международной геосферно-биосферной программы (IGBP) была инициирована кампания по сбору данных о глобальной первичной продукции – The Global Primary Production Data Initiative (GPPDI), курируемая четырьмя организациями: Национальной лабораторией Оак Ридж и Университетом шт. Мэриленд (США), Биосферным центром в Тулузе (Франция) и Институтом по исследованию климатических изменений в Потсдаме (Германия). Основная цель «Инициативы GPPDI» – заполнить огромные «белые пятна» в имеющихся базах данных о ЧПП наземных экосистем и получить корректные значения ЧПП хотя бы по ключевым участкам основных типов растительного покрова (Scurlock et al., 1999). Основу создаваемой базы данных о ЧПП составили имеющиеся материалы по травянистым растениям, а также 117 определений ЧПП древесных растений, полученных в ходе МБП. В 1997 г. база была дополнена материалами по тропическим и бореальным лесам, а также данными 762 пробных площадей, использованными при разработке биосферной модели «Оснабрюк» (Esser et al., 1997). Все сводные данные хранятся в Архивном центре Национальной лаборатории Оак Ридж, США (www-eosdis.ornl.gov/npp/npp_home.html). Дополнительно были созданы базы данных о фитомассе корней (Cairns et al., 1997) и их ЧПП (Gill, Jackson, 2000), о детритах (Vogt et al., 1986) и о глубине занимаемого корнями почвенного профиля (Schenk, Jackson, 2003).

Во всех перечисленных сводках и базах данных представлена лишь незначительная часть опубликованных на русском языке материалов по фитомассе и ЧПП лесных экосистем России и бывшего СССР. База данных Н.И. Базилевич (1993) включает в себя 2500 определений, выполненных в наземных экосистемах (не только лесных), но не сопровождается необходимой таксационной характеристикой древостоев. Компьютерная база данных о фитомассе и ЧПП лесных экосистем России и бывшего СССР (535 пробных площадей) сформирована в Институте лесоведения РАН (Замолодчиков и др., 2003), но находится лишь в личном пользовании их составителей.

В 2001-2003 гг. была опубликована трилогия под общим названием «Фитомасса лесов Северной Евразии», включающая базу данных из 5085 определений фракционного состава фитомассы насаждений (т/га) на территории от Великобритании до Японии (50 экорегионов), а также некоторые приложения, разработанные на ее основе (Усольцев, 2001, 2002, 2003). Позднее она была дополнена (Усольцев, 2007, 2010) и в окончательном виде опубликована в электронном варианте на английском языке (Usoltsev, 2013, 2020 b). В нее вошли данные как о фитомассе (более 8 тыс. пробных площадей), так и о ЧПП и фитомассе (около 2600 пробных площадей). Ранее (Усольцев, 2007; Usoltsev, 2007) были проанализированы методические неопределенности, связанные с формированием базы данных о биопродуктивности насаждений, которые снижают надежность результатов при ее использовании. В базу данных включены показатели фитомассы не только собственно древостоя, но и нижнего яруса как совокупности подлеска, подроста и напочвенного покрова. Наличие или отсутствие каждой из перечисленных составляющих нижнего яруса определяется многими факторами, которые в базе данных учесть не представлялось возможным. Кроме того, не все исследователи ставили целью учесть все составляющие нижнего яруса, тем более с разделением их фитомассы на надземную и подземную. Последняя часто игнорировалась или включалась в фитомассу корней древостоя. Поэтому в базу данных введен один показатель, объединяющий фитомассу подлеска, подроста и напочвенного покрова.

В настоящее время сформировано несколько глобальных баз данных не только по количественным показателям фитомассы и первичной продукции деревьев и древостоев (Cannell, 1982; Vogt et al., 1986; Gill, Jackson, 2000; Wright et al., 2004; Kühn et al., 2004; Усольцев, 2007, 2010, 2016a, 2018; Falster et al., 2015; Schepaschenko et al., 2017; Kattge et al., 2020; Usoltsev, 2020a), но и по квалиметрическим показателям, в частности по плотности древесины различных древесных видов мира, охватывающих различные регионы и имеющих различный объем, качество и доступность (Reyes et al., 1992; Chave et al., 2006; Donegan et al., 2014). Крупнейшая из них (Zanne et al., 2009) содержит данные о плотности более 8412 таксонов (1638 родов, 191 семейство) деревьев, что тем не менее составляет лишь 10 % от имеющихся 100 тыс. древесных видов. Большая часть существующих данных остается рассеянной по научной и «серой» литературе. Гармонизированные глобальные базы данных о плотности древесины позволяют сопоставлять полученные результаты, облегчают доступ к необходимой информации и дают возможность корректной структуризации данных. Они также способствуют выявлению пробелов в имеющихся данных, а обнаруженные в них тенденции определяют перспективы будущих исследований, сводя к минимуму дублирование усилий и тем самым экономя время и затраты на получение дополнительных фактических данных (Donegan et al., 2014).

В 2013 г. совместными усилиями ФАО, Департамента лесного хозяйства Университета Таскии и Французского центра сельскохозяйственного развития (CIRAD) была запущена веб-платформа GlobAllomeTree (Henry et al., 2013), которая содержит более 13 000 аллометрических уравнений. GlobAllomeTree — это мощный инструмент для архивирования, согласования и обмена данными, связанными с обмерами деревьев, способствующий более точным оценкам лесных ресурсов. В нынешней второй версии веб-платформы имеется доступ к данным не только плотности древесины, но фактическим данным таксации деревьев (таким как их диаметр и высота), которые дают важную информацию для точной оценки лесной фитомассы, в том числе ее древесных запасов. Данные были собраны с использованием стандартизированных полевых и лабораторных процедур при высоком уровне точности (Donegan et al., 2014).

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 содержания сухого вещества в компонентах биомассы (Мелехов и др., 2003).

Как отмечалось выше, при отсутствии данных о сбеге ствола невозможно корректно смоделировать средние квалиметрические значения ствола на основе известных локальных значений, полученных на различных относительных высотах дерева. Разработаны многие теории и функции сбега и формы ствола, как прикладные, так и теоретические (Jaccard, 1915; Huber, 1925; Yamaoka, 1952; Захаров, 1955; Gray, 1956; Shinozaki et al., 1964; McMahon, 1973; Белов, 1974; Meylan, 1978; Никитин, 1979; Cailliez, 1980; Killki, Varmola, 1981; Артемьева, Кофман, 1984; Bruce, Max, 1990; Gal, Bella, 1994; Tarp-Johansen et al., 1997; Taneda, Tateno, 2004; Dieguez-Aranda et al., 2006; Tomusiak, Zarzyński, 2007; Li, Weiskittel, 2010, 2011; Li et al., 2012; Burkhart, Tomé, 2012; Krisnawati, 2016; Doyog et al., 2017; Jelonek et al., 2019; Pukkala et al., 2019).

До сих пор не существовало баз данных о сбеге ствола, а также о содержании сухого вещества в компонентах фитомассы. Опубликованная недавно (Usoltsev, 2020 с) база квалиметрических данных фитомассы для лесообразующих древесных видов Центральной Евразии в какой-то степени снимает эту проблему. База данных состоит из двух разделов. В первом разделе (Base 1) представлены эмпирические данные о сбеге 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. Показаны также авторы данных, страна, местоположение и географические координаты пробных площадей.

Во втором разделе базы данных (Base 2) приводятся средние квалиметрические показатели деревьев в сочетании с теми же сопутствующими данными, что и в первом разделе (Base 1). В обоих разделах приводятся данные о содержании сухого вещества в листве (хвое) и ветвях деревьев. Оба раздела не содержат данных о плотности фитомассы корней, но есть немногочисленные данные о содержании сухого вещества в корнях и отмерших ветвях, сохранившихся на стволе дерева.

Поскольку получение данных о фитомассе ассимиляционного аппарата деревьев на пробных площадях является весьма трудоемким процессом, в некоторых опубликованных методиках принята двухэтапная процедура: сначала секатором срезают со всей кроны побеги,

несущие листву (хвою), а затем из полученной массы облиственных побегов отбирают ее часть (пробу), от которой отделяют листву, с последующим пересчетом результата на всю крону. Варьирование массы листвы (хвои) в облиственных побегах мало отличается по древесным видам и составляет 2–5 % (Усольцев, 1985а). В обоих упомянутых разделах приведены фактические данные о процентном содержании листвы в облиственных побегах, что дает возможность снижения трудоемкости обработки модельных деревьев на пробных площадях.

Этот материал может быть использован для разработки методов расчета средних квалиметрических показателей стволовой древесины и коры на основе локальных значений, приведенных в базе данных, для моделирования весовой доли коры в стволах (Nygård, Elfving, 2000), для реконструкции погребенных древних деревьев и оценки их фитомассы (Williams et al., 2003), для моделирования распределения квалиметрических показателей вдоль по стволу (Deng et al., 2014; Лавров, 2015; Kiaei et al., 2015; Liepiņš J., Liepiņš K., 2017; De Mil et al., 2018), для моделирования зависимостей между плотностью и содержанием сухого вещества (Полубояринов и др., 1982), при совмещении моделей квалиметрических показателей с моделями роста и прироста древостоев (Burkhart, Tomé, 2012), при моделировании зависимости квалиметрических показателей древесины ствола от его сбега (Tomczak et al., 2016), а также для валидации различных теоретических моделей формы и сбега ствола (Оценка формы..., 2018; Jelonek et al., 2019; Pukkala et al., 2019).

6.2. ГИС-технологии и определение квалиметрических показателей деревьев по данным дистанционного зондирования

В разделе 2.6 было показано, что изменчивость базисной плотности древесины объясняется характеристиками годичных колец, индексом увлажнения и географической широтой в лучшем случае на 51 %. Покрытие 49 % необъясненной изменчивости возможно путем учета генетической составляющей, формового разнообразия, набором лесоводственных мероприятий, оценкой биопотенциала дерева как характеристики его физиологического состояния, условий роста и развития деревьев и древостоев. Но чтобы таким путем реально повысить объясненную изменчивость базисной плотности, получение этих дополнительных переменных должно быть экономически оправданным. В конце раздела 2.6 Х. Линдстрём (Lindström, 2000) задает

вопрос: возможен ли здесь компромисс, и оставляет этот вопрос открытым.

Частичный ответ на этот вопрос дают современные технологии инвентаризации лесов, основанные на использовании технологий и дистанционного зондирования с применением калибровочных наземных пробных площадей (Pitt, Pineau, 2009). Растет интерес к прогнозированию качества древесины по морфологическим признакам деревьев, которые могут быть измерены с помощью методов лазерного дистанционного зондирования для улучшения инвентаризации лесов в целях оперативного планирования (Lenz et al., 2012; Wylie et al., 2019). Высокая трудозатратность традиционной закладки и камеральной обработки материалов пробных площадей исключает возможность учета базисной плотности древесины и других характеристик древесных волокон при наземной инвентаризации лесов на больших площадях, но это возможно при их дистанционном зондировании (van Leeuween et al., 2011).

Применение передовой ГИС-технологии для компьютерного сбора полевых данных Field-Map (https://www.fieldmap.cz/?page=fmsa) значительно расширяет и углубляет возможности упомянутых сравнительных исследований не только сбега, формы и объема ствола, но и различных показателей морфоструктуры кроны дерева и полога в целом (И. Букша, М. Букша, 2013). Специальные функции Field-Map позволяют измерять не только диаметры стволов деревьев на любой высоте и автоматически вычислять объемы стволов деревьев, но и определять высоту деревьев, картировать проекции и измерять форму крон деревьев, вычислять площадь поверхности и объем кроны, автоматически вычислять длины линии, периметры и площади полигонов. Система позволяет проверять достоверность собранной информации и контролировать полноту баз данных во время полевых работ, визуализировать деревья в трехмерном графическом пространстве, создавать цифровые модели местности, а также решать в полевых условиях множество других задач, связанных с обработкой баз данных и ГИС (Инвентаризация..., 2006; И. Букша, М. Букша, 2013). Подобная техника регистрации сбега и формы ствола дает возможность оценивать его квалиметрические показатели непосредственно у растущих деревьев (Constant et al., 2003).

В разделе 2.6 были проанализированы основные факторы, влияющие на базисную плотность ствола в связи с развитием кроны. Регистрация размеров крон деревьев посредством дистанционного зондирования высокого разрешения даёт возможность оценки квалиметрических показателей, поскольку, как было показано выше, характеристики крон деревьев оказывают влияние на формирование древесины, а имеющиеся автоматизированные технологии дистанционного зондирования позволяют с высокой точностью в автоматическом режиме определять основные характеристики крон (Leckie et al., 2003; Coops et al., 2004; Wulder et al., 2004, 2008; Groot et al., 2015).

Качество древесных волокон формируется в процессе роста древесного кольца. Каждый год образуется одно ростовое кольцо, состоящее из зоны ранней древесины, за которой следует зона поздней, которая характеризуется более плотными клетками с меньшим углом микрофибрилл (Donaldson, 2008). Местные условия роста прямо или косвенно влияют на развитие кроны, а следовательно, на ширину ростовых колец и на соотношение ранней и поздней древесины внутри кольца. Связь между характеристиками дерева и свойствами древесных волокон часто недостаточно четкая, но на уровне дерева существенная.

В частности, была установлена слабая взаимосвязь между плотностью древесины и диаметром ствола на высоте груди, общей высотой дерева и возрастом у ели черной и 27 других видов в Онтарио, Канада (Alemdag, 1984). Г. Жиру с соавторами (Giroud et al., 2017) наблюдали слабые корреляции между плотностью древесины, модулем упругости и таксационными характеристиками ствола для основных бореальных видов в Квебеке. Слабые корреляции были также обнаружены между плотностью древесины и характеристиками кроны для ели черной и пихты бальзамической в Ньюфаундленде (Groot, Luther, 2015). Было сделано предположение, что слабость взаимосвязи между характеристиками кроны и плотностью древесины может быть следствием измерений относительно тривиальных характеристик кроны дерева (ширина, длина и их соотношение) при традиционной лесоинвентаризации, и эта неопределенность устранима с помощью технологий дистанционного зондирования, которые дают более точные измерения крон деревьев (Groot et al., 2015).

Бортовое и наземное лазерное сканирование может обеспечить широкий спектр характеристик деревьев и древостоев для целей моделирования, в частности для предсказания квалиметрических показателей древесины пихты и ели на уровне пробной площади с использованием данных как бортового (Luther et al., 2014; Pokharel et al., 2016), так и наземного (Blanchette et al., 2015) лазерного зондирования. Наземное лазерное сканирование дает также надежные оценки

Электронный архив УГЛТУ

индекса конкуренции крон на уровне деревьев (Martin-Ducup et al., 2016).

Свойства древесных волокон были исследованы у деревьев ели, произрастающих в Ньюфаундленде (Канада), с постановкой следующих задач (Giroud et al., 2019):

- установить набор характеристик дерева, его кроны и непосредственного окружения с использованием данных наземного лазерного зондирования;
- разработать перечень предполагаемых моделей с включением данных наземного лазерного зондирования и без них для оценки базисной плотности, длины волокон, модуля упругости и угла микрофибрилл;
- сравнить полученные модели и определить вклад данных наземного лазерного зондирования в оценку свойств древесных волокон (Giroud et al., 2019).

Исследование было сосредоточено на ключевых свойствах древесных волокон, наиболее важных для промышленности. Наземное лазерное сканирование выполнялось с помощью устройства Z+F Imager® 5006i (Zoller + Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Germany), работающего с угловым разрешением 0,036°. Каждая пробная площадь размером 25×25 м сканировалась с четырех периферийных и одной центральной точек с целью включить как можно больше деревьев, у которых должны быть взяты керны. Применена процедура фильтрации для удаления всех «шумовых» точек с помощью Z+F LaserControl® версии 8.1.3 (Zoller + Fröhlich GmbH). Вследствие окклюзии (непроходимости сигнала) и ограничений сканирования в лесных условиях были видны не все деревья, предназначенные для взятия кернов. Окончательный набор данных состоял из 69 видимых («целевых») деревьев на 16 пробных площадях (Вlanchette et al., 2015; Giroud et al., 2019).

Если в ходе традиционной лесоинвентаризации не учитываются конкурентные отношения между деревьями и особенности рельефа на уровне деревьев, а измерения крон сильно упрощены (Groot et al., 2015), то при наземном лазерном зондировании характеристики деревьев извлекаются из облаков точек сканирования (импульсов) таким образом, чтобы как можно точнее описать дерево, его крону и ближайшее окружение с точки зрения конкуренции и локальной топографии. Контуры деревьев (цилиндры) извлекали из облака точек сканирования с помощью полуавтоматической процедуры на платформе Сотритее версии 3.0 (Othmani et al., 2011). Диаметр цилиндра

 (\emptyset) оценивался в виде функции самой высокой точки полога (Сапору_МАХ) внутри перевернутого конуса, вставленного в основание ствола дерева с углом раскрытия 30° . Это значение угла выбрано методом проб и ошибок, чтобы получить репрезентативную площадь для вычисленных характеристик в соответствии с высотой полога. Самая высокая точка кроны и координаты (X, Y, Z) каждого основания дерева были измерены вручную с помощью FARO®SCENE версии 5.0.1 (Faro Technologies Inc., Лейк-Мэри, Флорида, США). Таким образом, диаметр i-го цилиндра рассчитан по формуле (Giroud et al., 2019)

$$\emptyset i = 2 \tan (15^{\circ}) \operatorname{Canopy_MAX} i,$$
 (51)

где $\emptyset i$ — диаметр i-го цилиндра; Canopy_MAXi — самая высокая точка кроны i-го цилиндра.

Для каждой пробной площади с использованием сетки с разрешением 25×25 см с TIFFS версии 8.0 beta (Globalidar, Гонолулу, Гавайи, США) рассчитаны цифровая модель рельефа (DEM), цифровая модель поверхности (DSM) и модель высоты полога (CHM). Это разрешение было выбрано, чтобы уменьшить объем данных, сохраняя при этом как можно больше деталей. Средние и стандартные отклонения модели полога были извлечены для описания его высоты и уровня дисперсии. Плотность насаждения оценивалась по индексу отношения его объема к площади.

Затем был рассчитан набор показателей, характеризующих конкуренцию деревьев. На каждой пробной площади были взяты срезы толщиной в один метр, центрированные на высоте 1,5 м от земли (Huang et al., 2009). Каждый срез был вручную отфильтрован, чтобы сохранить только точки из круглых сечений стволов деревьев. Местоположение каждого дерева было записано вручную с помощью PointStream[©] версии 3.0 в качестве средства просмотра облака точек (Arius Technology Inc., Ванкувер, Британская Колумбия, Канада). С использованием координат стволов было рассчитано среднее расстояние между соседними деревьями (Blanchette et al., 2015). Затем вычислялся индекс агрегации как соотношение наблюдаемого и ожидаемого расстояния между соседними деревьями (Clark, Evans, 1954). Этот показатель обеспечивал прямую меру «дисперсии» или «кластеризации» стволов, окружающих каждое «целевое» дерево. Чем меньше это соотношение, тем выше конкуренция соседних деревьев (Giroud et al., 2019).

Далее, данные целевых деревьев были извлечены с помощью полуавтоматической процедуры на платформе Computree версии 3.0 (Othmani et al., 2011). Высота дерева, основание живой кроны и длина кроны были измерены вручную с помощью FARO®SCENE версии 5.0.1 (Faro Technologies Inc.). Точки, принадлежащие кроне каждого целевого дерева, были экспортированы из Computree. Затем облака точек были вокселизированы с использованием VoxR library (Lecigne et al., 2015) и R statistical and programming language version 3.0.2 (R Development Core Team 2018). Вокселы являются аналогами двумерных пикселей для трехмерного пространства. Размер воксела 10 см был выбран для более детального отображения геометрии кроны. Реконструкция 3D-альфа-формы была применена для измерения поверхности и объема каждой кроны с использованием пакета alphashape3d в R (Lafarge, Pateiro-Lopez, 2017). Плотность кроны оценивалась путем деления объема непустых вокселов на объем кроны (Giroud et al., 2019).

Для характеристики конкурентных отношений были рассчитаны три индекса (Martin-Ducup et al., 2016): индекс давления полога (*CPI*), индекс гетерогенности полога (*CHI*) и индекс плотности полога (*CDI*). Облака точек были вокселизированы с использованием того же размера воксела 10 см, который использован в кронах целевых деревьев (VoxR library, Lecigne et al., 2015). Индекс давления полога был рассчитан по формуле (Giroud et al., 2019)

$$CPI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{H_i V_i}{d_i},\tag{52}$$

где n — количество ячеек в растре; V_i — количество непустых ячеек в направлении Z над ячейкой i-го растра; d_i — расстояние между i-й ячейкой и проецируемым центром кроны; H_i — средняя высота вокселов i-й ячейки.

Пространственное рассеяние соседних деревьев оценивалось с помощью индекса *СНІ*, вычисленного как индекс агрегации на основе координат X и Y каждой ячейки растра (Clark, Evans, 1954). Индекс *СDІ* рассчитывался как отношение объема, занимаемого непустыми вокселами, к общему объему конуса (Giroud et al., 2019).

Для анализа свойств древесных волокон у целевых деревьев на высоте груди были извлечены керны диаметром 12 мм. Плотность древесины от сердцевины ствола до его периферии, модуль упругости и угол наклона волокон были измерены с использованием технологии SilviScanTM (Evans, 1994, 2006). Плотность древесины при влажности

8 % была преобразована в базисную плотность ρ_{δ} , которая определялась как отношение абсолютно сухой массы образца древесины к ее объему в свежем состоянии и рассчитывалась по формуле (Siau, 1995)

$$\rho_{\delta} = \frac{1000D_s}{1080 + 0.22D_s};\tag{56}$$

где D_8 – плотность при влажности 8 %.

Предполагалось, что точка насыщения волокон составляет 30 %, а плотность воды — 1000 кг/м³. Основные измерения, такие как средняя ширина кольца и количество колец, определялись по радиальным профилям плотности. Угол микрофибрилл определяли с помощью рентгеновского дифрактометра SilviScanTM. Модуль упругости оценивали по плотности и коэффициенту вариации интенсивности рентгеновского дифракционного профиля. Длина волокна была измерена у мацерированных (вымоченных) кернов с помощью анализатора качества волокна высокого разрешения (HiRes FQA, OpTest Equipment Inc., Хоксбери, Онтарио, Канада). В зависимости от возраста кернов длина волокон была получена в классах возраста, соответствующих ювенильной (возраст 1–30 лет), переходной (возраст 31–60 лет) и спелой древесине (возраст 61+). Характеристики древесного волокна представлены средними оценками по поперечному сечению ствола на высоте груди (Giroud et al., 2019).

Затем полученный материал был подвергнут корреляционному анализу с целью выявления связей между свойствами древесных волокон и наиболее влиятельными независимыми переменными. С учетом того, что коэффициенты от 0,5 до 0,8 обычно означают умеренную, а выше 0,8 — тесную корреляцию, были обнаружены весьма значимые корреляции между характеристиками древесных волокон и измерениями кернов. Получены умеренные линейные зависимости свойств волокон с числом колец и логарифмом числа колец с коэффициентами корреляции от 0,47 до 0,63. Свойства волокон повышались с возрастом, а затем стабилизировались в возрасте спелости, за исключением угла наклона волокон, который с возрастом снижался. Умеренные линейные зависимости наблюдались также со средней шириной кольца при коэффициенте корреляции от 0,56 до 0,70. Чем уже кольцо, тем меньше угол наклона волокон и тем выше другие их свойства (Giroud et al., 2019).

Между характеристиками древесных волокон и измерениями деревьев получены слабые и умеренные линейные зависимости с ко-

эффициентами корреляции от 0,26 до 0,58. Диаметр на высоте груди был отрицательно связан с базисной плотностью. Высота дерева была положительно связана с длиной волокна и отрицательно – с углом наклона волокон. Чем больше относительная высота дерева, тем ниже угол наклона волокон и тем выше их другие показатели свойств. Площадь сечения более крупных деревьев была положительно связана с плотностью древесины. Высота крепления живой кроны достоверно коррелировала со всеми характеристиками древесных волокон. Чем выше основание живой кроны, тем ниже угол наклона волокон и тем выше другие их показатели свойств. Длина кроны была отрицательно связана с плотностью древесины (Giroud et al., 2019).

Было также обнаружено много весьма значимых корреляций между свойствами древесных волокон и данными наземного лазерного сканирования. Получены слабые и умеренные линейные зависимости с коэффициентами корреляции от 0,24 до 0,65. Свойства древесных волокон слабее коррелированы с высотой основания живой кроны, полученной посредством наземного лазерного сканирования, чем с тем же показателем, измеренным в полевых условиях. Плотность кроны отрицательно коррелировала с длиной волокон, а ее объем отрицательно связан с плотностью древесины. Все индексы конкуренции полога, полученные путем наземного лазерного сканирования, положительно коррелировали с плотностью древесины (Giroud et al., 2019).

Значительные корреляции были также обнаружены с гетерогенностью и изменчивостью вертикального профиля полога. Чем более нерегулярна вертикальная структура насаждения, тем меньше угол наклона волокон и тем выше их другие характеристики. Свойства древесных волокон тесно коррелировали с топографией местности. Чем более нерегулярна топография вблизи «целевого» дерева, тем больше угол наклона волокон и ниже их остальные показатели свойств. Высоко значимые корреляции были также обнаружены с индексами конкуренции деревьев, полученными по данным наземного лазерного сканирования. Чем слабее конкуренция за пространство между соседними деревьями, тем больше угол наклона волокон и тем ниже их другие показатели свойств. Соответственно, чем больше среднее расстояние между деревьями, тем выше угол наклона волокон и тем ниже другие их показатели свойств (Giroud et al., 2019).

С целью выявления перспективных моделей для оценки свойств древесных волокон все они были ранжированы в соответствии с их оценками по индексу Акайке (Akaike, 1974). На высоту крепления

живой кроны приходилось 33, 65 и 51 % объясненной изменчивости соответственно базисной плотности древесины, угла наклона волокон и модуля упругости (Giroud et al., 2019).

Для оценки квалиметрических показателей древесины были разработаны прогностические модели с использованием только данных наземного лазерного сканирования. Вклад объема кроны в объяснение изменчивости базисной плотности составил 48 %. Структурные характеристики модели высоты полога объяснили 67, 25 и 30 % изменчивости соответственно длины волокон, их угла наклона и модуля упругости, а среднее расстояние между деревьями обеспечило вклад 55 и 48 % в объяснение изменчивости соответственно угла наклона волокон и модуля упругости. Вклад данных наземного лазерного зондирования в объяснение изменчивости длины волокон, угла их наклона и модуля упругости составил соответственно 68, 42 и 61 % их общего варьирования (Giroud et al., 2019).

Вклад одних лишь данных наземного лазерного зондирования в оценку квалиметрических показателей на уровне дерева у ели черной составил 47, 51, 44 и 52 % общей дисперсии соответственно плотности древесины, длины волокон, угла их наклона и модуля упругости. Вклад данных наземного лазерного зондирования был менее очевиден для оценки плотности древесины, когда в модели включали измерения кернов. Однако в полевых условиях можно измерить только крону и собрать радиальные приросты по кернам нескольких деревьев в пределах пробной площади. Поэтому инвентаризация, использующая только данные наземного лазерного зондирования, была бы предпочтительнее обычных инвентаризаций для прогнозирования свойств волокон на уровне дерева, но при условии, если бы эти данные могли быть доступны для всех деревьев на пробе (Giroud et al., 2019).

Поскольку «топовые» модели включали измерения кернов, то неудивительно, что данные наземного лазерного зондирования добавили мало дополнительной информации, особенно для оценки плотности древесины. Измерения кернов учитывают прошлый рост дерева и уровень зрелости камбия. Первые ростовые кольца в сердцевине формируют молодую древесину, которая имеет более низкие физикомеханические свойства, чем те, которые встречаются в спелой древесине того же дерева (Panshin, de Zeeuw, 1980). Зрелость камбия на данной высоте, таким образом, связана с числом колец, которое оказалось одним из важнейших регрессоров в данном исследовании. Эти данные согласуются с ранее опубликованными результатами

для свойств древесины ели черной (Alteyrac et al., 2006; Pokharel et al., 2014; Giroud et al., 2016, 2019).

Была подтверждена также отрицательная связь величины радиального прироста с квалиметрическими показателями древесины, особенно с ее плотностью на высоте груди ствола, установленная ранее для ели черной (Groot, Luther, 2015; Giroud et al., 2016). Ширина кольца в действительности отрицательно связана с долей поздней древесины у мелколиственных видов (Panshin, de Zeeuw, 1980). Большая часть варьирования признаков у деревьев также может быть обусловлена реакцией камбия на различные стрессы в течение роста дерева, такие как засуха или ветер, которые непосредственно влияют на угол наклона волокон и другие свойства древесины (Donaldson, 2008; Giroud et al., 2019).

Вопреки ожиданиям авторов (Giroud et al., 2019), детальные измерения крон, полученные из облаков данных наземного лазерного зондирования, не оказались более тесно связанными со свойствами древесных волокон, чем данные полевых измерений крон. Влияние индексов конкуренции крон также оказалось ограниченным. Тем не менее сделаны некоторые биологические интерпретации. Например, на основе трехмерной реконструкции кроны было подтверждено, что деревья с большими кронами производят менее плотную древесину, как это было показано ранее П. Ларсоном (Larson, 1969).

На свойства древесных волокон также положительно влияла высота крепления живой кроны. По мере того как крона дерева поднимается со временем вверх по стволу, камбий на данной высоте становится менее подвержен прямому воздействию кроны и формируется спелая древесина (Panshin, de Zeeuw, 1980). Однако ручное извлечение этой характеристики из облака данных наземного лазерного зондирования имело ограничения. Высота крепления живых крон, измеренная в полевых условиях, оказалась более точным предиктором, о чем свидетельствуют более высокие корреляции со свойствами древесных волокон. Автоматическая процедура извлечения этой характеристики может повысить точность и общий вклад данных наземного лазерного зондирования (Giroud et al., 2019).

Выборочный метод частично объясняет ограниченное влияние измеряемых параметров крон. Действительно, свойства древесных волокон измерялись в направлении от сердцевины к коре ствола на высоте груди, но они также изменяются в продольном направлении вдоль по стволу дерева (Panshin, de Zeeuw, 1980). Для лучшей харак-

теристики взаимосвязей с измерениями кроны или других данных на уровне дерева, а также для потенциального повышения прогностической способности моделей могут быть использованы размеры всего дерева (Giroud et al., 2019). Измерения ствола на высоте груди тем не менее считались умеренными или хорошими предикторами для всего дерева (Evans et al., 2000).

Показатели конкуренции деревьев, полученные по данным наземного лазерного зондирования, оказались перспективными предикторами свойств древесных волокон. Деревья, подавленные своими ближними соседями, обладали лучшими физическими и механическими свойствами (Johansson, 1993; Yang, Hazenberg, 1994). Несмотря на ограниченность данных о влиянии рельефа местности на свойства древесины из-за сложности точного измерения особенностей рельефа, было установлено, что деревья, растущие на склонах, формируют древесину с более низкими показателями физико-механических свойств, что противоречило известным данным о большей плотности креневой древесины, формирующейся на склонах (Giroud et al., 2019).

Таким образом, исследование вклада данных наземного лазерного зондирования в оценку свойств древесных волокон на уровне деревьев ели черной в Канаде показало (Giroud et al., 2019), что более точная оценка параметров дерева, его кроны и непосредственного окружения с использованием средств наземного лазерного зондирования улучшила прогностическую способность полученных моделей для оценки основных свойств древесных волокон ели по сравнению с возможностями традиционных полевых измерений.

Инвентаризация, использующая только данные наземного лазерного зондирования, была бы предпочтительнее традиционных полевых инвентаризаций при прогнозировании свойств древесных волокон на уровне дерева, но при условии, что эти данные будут доступны для всех деревьев на пробной площади. Наземное лазерное сканирование предоставляет информацию, выходящую за пределы того, что дает традиционная инвентаризация. Однако остаются вопросы, требующие оперативного решения, а именно уменьшение последствий окклюзии и автоматизация процессов извлечения данных из облака точек на уровне дерева (Giroud et al., 2019). Тем не менее сбор и обработка данных наземного лазерного зондирования становятся все более эффективными и потенциал их применения в лесном хозяйстве неуклонно растет (Giroud et al., 2019).

6.3. ГИС-технологии и определение квалиметрических показателей древостоев по данным дистанционного зондирования

Если допустить приемлемой для некоторых целей непосредственную оценку квалиметрических показателей древесины лишь по ширине годичного кольца, то квалиметрия древесины на больших площадях может быть оценена косвенно по данным космического зондирования. Установлена статистически достоверная корреляция между вегетационным индексом NDVI и шириной годичных колец. Вегетационные индексы NDVI и VFC (Shobairi et al., 2018) могут быть использованы для оценки изменения прироста древесины, позволяя генерализовать данные на больших площадях (Лопатин, 2010). Построение карт вегетационных индексов NDVI и VFC может быть использовано для картографирования участков с динамикой прироста по диаметру с целью как планирования ведения лесного хозяйства, так и ориентировочной оценки квалиметрических показателей древесины.

В связи с новыми разработками технологий дистанционного зондирования существует несколько вариантов улучшенного картографирования структуры местности, помимо тех, которые в настоящее время имеются в материалах лесоинвентаризации (Blanchette et al., 2015). Спутниковые снимки высокого пространственного разрешения успешно используются для классификации древесных видов и количественной оценки структуры древостоев и их полога (Gougeon, 2000; Rodriguez-Veiga et al., 2014). Технологии бортового и наземного лазерного сканирования предлагают альтернативы, которые постепенно внедряются в оперативные процедуры лесоинвентаризации (Reutebuch et al., 2005). Исследования показали тесную корреляцию между структурными характеристиками, полученными на основе данных бортового лазерного сканирования и путем измерений деревьев *in situ*. Были использованы данные бортового лазерного сканирования для оценки размеров крон деревьев, таких как ширина кроны $(R^2 = 0.80)$, основание живой кроны $(R^2 = 0.92)$ и высота дерева $(R^2 = 0.95)$ (Hyyppä et al., 2004; Kato et al., 2009). Данные бортового лазерного сканирования использовались для получения таких характеристик древостоя, как средний диаметр стволов, средняя высота древостоя, густота и запас (Woods et al., 2008, 2011). Системы наземного лазерного сканирования способны в гораздо более мелком масштабе обеспечивать локальные характеристики структуры древостоев (Watt, Donoghue, 2005; Côté et al., 2011; Lindberg et al., 2012).

Наземное лазерное сканирование было использовано также для оценки доли просветов в пологе лесных массивов. Сопоставление результатов со значениями, полученными с полусферической фотографии, показало наличие коэффициента детерминации $R^2=0.92$ (Hopkinson, Chasmer, 2007). В действительности наземное лазерное сканирование может обеспечить широкий спектр характеристик структуры дерева и древостоя с высокой точностью, которые могут быть связаны с квалиметрическими показателями древесины (van Leeuwen et al., 2011).

Поэтому общей целью исследования, проведённого в Канаде (Blanchette et al., 2015), было определение потенциального использования данных наземного лазерного сканирования для оценки мелкомасштабных структурных характеристик, связанных со свойствами древесных волокон. Более конкретные задачи состояли в том, чтобы 1) установить ряд локальных структурных показателей, репрезентативных для мелкомасштабной структуры древостоя по данным наземного лазерного сканирования, и 2) разработать прогностические модели, использующие эти показатели для оценки четырех практически значимых свойств древесных волокон, а именно: плотности древесины, длины волокон, угла микрофибрилл и шероховатости древесины ели черной и пихты бальзамической в Ньюфаундленде.

Исследование было основано на двух основных предпосылках. Во-первых, известна значительная связь между структурными характеристиками насаждений и свойствами древесных волокон (Lindström,1996a, b; van Leeuwen et al., 2011), показанная также на уровне дерева (Zhang et al., 1993; Molteberg, Hoibo, 2006; Swenson, Enquist, 2008; Lenz et al., 2014). Поэтому идея о том, что структурные характеристики могут быть связаны со свойствами древесных волокон на уровне пробной площади, была логическим продолжением предшествующих исследований.

Вторая предпосылка заключалась в том, что информация о локальной структуре древостоя могла быть извлечена из данных наземного лазерного сканирования и использована для прогнозирования свойств древесных волокон. Эта предпосылка была проверена на основе множественной линейной регрессии (Lindström, 1996 b; Jacobs, Drew, 2002). Установление статистических связей между структурными характеристиками, полученными по данным наземного лазерного сканирования, и измеренными свойствами древесных волокон явилось важным шагом в определении структурных показателей, которые нацелены на создаваемые системы бортового лазерного сканирования для поддержки картографирования свойств древесных волокон на крупных ландшафтах (Blanchette et al., 2015).

Для реализации целей моделирования (Blanchette et al., 2015) имелась обширная база данных о свойствах древесных волокон, полученных по кернам, взятым с деревьев непосредственно за пределами постоянных пробных площадей. В течение лета 2007–2010 гг. на острове Ньюфаундленд было отобрано 28 участков с преобладанием ели и 24 участка с преобладанием пихты. Один дополнительный участок рассматривался как смешанный вариант, внесший свой вклад в анализ обоих древесных видов. Выбор пробной площади осуществлялся на основе стратифицированной выборки обоих древесных видов с учетом класса высоты, плотности кроны и индекса качества участка в пределах лесного массива. Керны были извлечены на высоте груди у 10 деревьев, отобранных примерно в 10 м от угла пробы, где условия были наиболее репрезентативными для всей пробной площади (Blanchette et al., 2015). Керны 10 деревьев на пробе проанализированы на современном оборудовании в лаборатории FP-Innovations в Ванкувере (Goodison et al., 2007). Плотность древесины, грубость волокон и угол микрофибрилл измерялись с помощью SilviScan-системы приборов, использующих комбинацию оптической микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и денситометрии, а также анализировались изображения для измерения свойств древесины (Downes et al., 2002; Schimleck et al., 2002; Sherson et al., 2007; Blanchette et al., 2015).

Оценки свойств древесных волокон для каждого модельного дерева были рассчитаны как средние значения всех колец, взвешенные по их площади. Затем оценки тех же свойств для пробной площади были рассчитаны как средние значения оценок деревьев, взвешенные по площади сечения модельных деревьев:

$$C \mathcal{A} B_j = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$
 (54)

где $C \mathcal{A} B_j$ — расчетное значение свойства древесных волокон для j-й пробной площади; W_i — площадь сечения i-го дерева; X_i — значение свойства древесных волокон i-го дерева.

На 53 пробных площадях было отсканировано наземным лазером Zoller + Fröhlich Imager 5006і большинство модельных деревьев с прилегающей к ним территории. В системе использована технология фазового сдвига для измерения расстояния каждого лазерного луча,

направленного на диапазон потенциальных объектов, обнаруженных на расстоянии до 80 м. Таким образом были получены миллионы точек на полусферическом поле зрения. Лазерное устройство было установлено в нескольких положениях, чтобы обеспечить сканирование группы деревьев и их окружения с разных точек зрения для уменьшения окклюзии (непроходимости) сигнала (Hopkinson et al., 2004). Изображения получены с помощью четырех сканирований с позиций на внешнем пределе группы деревьев и одного сканирования в центре (рис. 8).

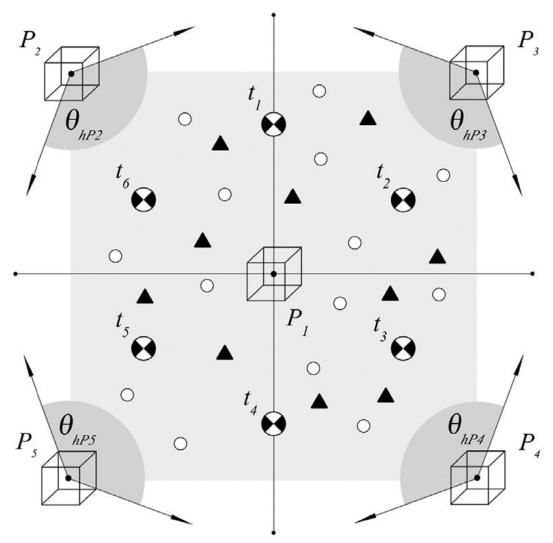


Рис. 8. Общая схема наземного лазерного сканирования (Blanchette et al., 2015). Обозначения:

 $\theta_{_{hPx}}$ – сканер азимутального поля зрения;

 $P_{_{x}}$ — положение сканера; \blacktriangle — модельные деревья;

 Конечное число и положение сканов зависели от наличия просветов в пологе, и его прозрачность обеспечивала просмотр с наименьшим количеством окклюзий. Установка высокого разрешения (разрешение 0,036° обеспечивало одну точку через каждые 6,3 мм на сфере радиусом 10 м) позволила системе получить от 30 до 100 млн точек на изображении в зависимости от сложности структуры полога. Из-за проблемы окклюзии и ограничений лазерного зондирования в лесных условиях были просканированы не все модельные деревья пробных площадей. Тем не менее были идентифицированы все деревья с видимыми кронами.

Предварительная обработка данных наземного лазера включала настройку сканирования, удаление шума, разграничение изображений и нормализацию облаков точек. Для восстановления трехмерных изображений требовалась настройка сканирования, которая облегчалась использованием мишеней на всех пробных площадях. Процесс настройки требует наличия хорошей линии визирования между датчиком и целями и достаточно высокой плотности точек для правильной идентификации образа. В естественной лесной среде система Zoller + Fröhlich Imager 5006i, работающая с угловым разрешением 0,036°, обычно обеспечивает максимальное расстояние 12–13 м между датчиком и целью. В итоге получали 3D-изображение деревьев лесного полога на всех пробных площадях (Blanchette et al., 2015).

Перед включением в множественные линейные регрессии каждая объясняющая переменная оценивалась отдельно и в сочетании с другими переменными (Tabachnick, Fidell, 1996). Список перспективных моделей был составлен в соответствии с рабочими гипотезами, где каждая предложенная модель представляла потенциальную связь между переменными отклика. Объясняющие переменные включали четыре структурных переменных насаждения (т. е. структуру полога, конкуренцию, плотность деревьев и местную топографию), гарантирующие их способность предсказывать свойства древесных волокон. Построение полного набора перспективных моделей выполнено по трехэтапной процедуре (Blanchette et al., 2015). Во-первых, в рамках каждой структурной переменной рассматривалась модель с одной или двумя переменными. Во-вторых, рассматривались дополнительные модели с использованием комбинаций различных структурных переменных. В-третьих, строилась обобщенная модель, включающая все объясняющие переменные, для сравнения с более простыми моделями (Mazerolle, 2006).

В результате выполненного корреляционного анализа составлен список потенциальных объясняющих переменных, которые далее использованы при разработке перспективных моделей. Вследствие вза-имной корреляции были отобраны только шесть из первоначально предложенного набора данных наземного лазерного зондирования (Blanchette et al., 2015).

Для описания структуры полога из его характеристик были извлечены четыре показателя, относящиеся к размеру и форме ветвей крон деревьев и распределению листвы. В. Кейном с соавторами (Капе et al., 2010) был применен индекс Рампля как отношение 3D-изображения к 2D-проекции, который представляет собой безразмерный показатель, характеризующий структурную сложность древостоя на данной площади. Этот показатель характеризовал шероховатость поверхности кроны. Еще одной характеристикой, вычисленной на основе модели поверхности, был индекс отношения объема полога к площади его проекции. Дополнительными характеристиками были средняя высота полога и ее стандартное отклонение (Blanchette et al., 2015).

Среднее значение высоты древостоя и индекс Рампля были выбраны для наилучшего представления структуры кроны, в то время как отношение ближайших соседей и густота деревьев были сохранены для наилучшего представления о их конкуренции. Из других переменных были выбраны только стандартное отклонение плотности надземной части и разница в высоте полога, так как другие показатели были сильно коррелированы. Поскольку корреляции между структурными переменными были одинаковыми для обоих видов, для моделирования свойств древесных волокон рассматривалась одна и та же структура модели (Blanchette et al., 2015).

Результаты сравнительного анализа по индексу Акайке (Akaike, 1974) позволили оценить степень адекватности каждой предложенной модели по отношению к остальным. Для каждого свойства древесных волокон по каждому древесному виду модель с самым низким индексом представляла собой «лучшую» из оцениваемых моделей. Эти модели представляли комбинированные структурные характеристики древостоя, включая структуру полога, конкуренцию и местную топографию (Blanchette et al., 2015).

Выбор модели с использованием индекса Акайке отличается от классических процедур исключения переменных. Во-первых, этот подход минимизирует количество параметров (компромисс между точностью и сложностью модели). Во-вторых, выбор модели

не основывается на критериях значимости, а скорее, сравнивает несколько рабочих гипотез, которые трудно проверить с помощью традиционного статистического подхода с использованием пошаговой регрессии. В действительности выводы, использующие процедуры исключения переменных, могут отличаться в зависимости от порядка, в котором рассчитываются модели (Mazerolle, 2006). В-третьих, можно использовать всю информацию из набора перспективных моделей вместо того, чтобы полагаться на одну модель. Хотя не было достигнуто одинакового уровня точности в прогнозировании свойств древесных волокон для обоих древесных видов, полученные результаты подтверждают взаимосвязь между свойствами древесных волокон каждого вида и локальными структурными характеристиками древостоев (Blanchette et al., 2015).

Полученные результаты показали также, что существует согласованность перспективных моделей в пределах древесного вида. Минимальное значение коэффициента корреляции (0,55) наблюдалось между длиной волокна у ели и плотностью древесины, но для других признаков большинство значений было выше, достигая 0,84 между плотностью древесины и шероховатостью. Угол микрофибрилл у ели имел тенденцию повышения с увеличением значений соотношения ближайших соседей, представляющего собой отношение наблюдаемого расстояния между деревьями к ожидаемому расстоянию для данной пробной площади. Меньшие коэффициенты означали более высокую конкуренцию за пространство между соседними деревьями в предположении, что меньшая конкуренция между деревьями определяет больший угол микрофибрилл и, следовательно, менее плотную древесину. Таким образом, участки, характеризующиеся высокой изменчивостью плотности надземной фитомассы, положительно коррелировали с более высокой длиной волокон (Blanchette et al., 2015).

Перспективные модели, выбранные для прогнозирования свойств древесных волокон у пихты, имели меньшие показатели адекватности, чем те, которые были выбраны для ели. Все выбранные модели имели от одной до трех структурных независимых переменных. Полученные результаты свидетельствуют о том, что локальные структурные переменные древостоя позволяют прогнозировать свойства древесных волокон (Blanchette et al., 2015).

Ранее проведенные исследования устанавливали связь между свойствами древесных волокон, с одной стороны, и диаметром ствола, высотой кроны и густотой древостоя – с другой (Liu et al., 2007; Watt et al., 2008a, 2008b; van Leeuwen et al., 2011; Morrow et al., 2013),

но полученные результаты были фрагментарны и сосредоточены либо на разных свойствах древесных волокон, либо на разных древесных видах и обычно на локальном уровне, нетипичном для градиентов пространственно распределенных экосистем.

Выполненное исследование (Blanchette et al., 2015) основывалось на идентификации структурных переменных извлеченных из облаков точек наземного лазерного зондирования, которые могут служить объясняющими переменными для прогнозирования свойств древесных волокон у ели и пихты. Объяснительная способность моделей достигала 72 % при оценке угла микроволокон и 65 и 62 % соответственно при определении длины волокна и плотности древесины. Их объяснительная способность для пихты была ниже, чем для ели: при оценке угла микроволокон – 63 %, при определении длины волокна и плотности древесины – 36 и 45 %. Полученные результаты показали, что у обоих древесных видов высокая прогностическая способность при оценке свойств древесных волокон может быть достигнута с использованием локальных структурных переменных древостоя, таких как показатели конкуренции деревьев, структура полога и местная топография. Разработка картографических продуктов с переменными регионального масштаба (например климат и география) в сочетании с возможностями дистанционного зондирования локальных структурных переменных древостоев обеспечивает поддержку мелкомасштабного картографирования (Blanchette et al., 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Роль древесины в мире становится все более значимой, особенно в контексте формирующейся биоэкономики, поскольку мы вступаем в новую эру, характеризующуюся глобальным стремлением к достижению экономической, социальной и экологической устойчивости. Квалиметрия надземной и подземной фитомассы является составной частью исследований биологической продуктивности и углероддепонирующей способности лесного покрова, необходимых для корректной оценки углеродного цикла в земной биосфере в связи с изменением климата.
- 2. Плотность древесины представляет ее свойство, востребованное в производстве множества конечных продуктов: строительных материалов, древесных плит, фанеры и т. п., а также является основным целевым показателем в селекционных и некоторых лесовод-

ственных программах. Связанные с плотностью свойства древесных волокон представляют больший интерес в целлюлозно-бумажной промышленности.

- 3. Анализ прогностических моделей плотности показал широкий спектр независимых переменных, перечень которых в разных условиях может существенно меняться, но ширина годичного кольца является обычно одной из наиболее информативных переменных.
- 4. Базисная плотность связана с содержанием сухого вещества, но последнее имеет также самостоятельное значение, например при оценке калорийности древесины, в изучении водного статуса растений и оценке биологической продуктивности насаждений.
- 5. В условиях непрерывно возрастающей глобальной роли лесного покрова планеты картирование квалиметрических показателей деревьев и древостоев становится одним из приоритетных направлений в исследовании их биологической продуктивности и ее изменения в связи с климатическими сдвигами. Развитие неразрушающих методов контроля квалиметрических показателей фитомассы насаждений и технологий наземного и дистанционного лазерного зондирования создает условия для прогресса в этом приоритетном научном направлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. – М.: Изд-во стандартов, 1973.-172 с.

Алятин М.В. Особенности происхождения, формирования и воспроизводства сложных ельников Ижорского (Силурийского) плато : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03 / Алятин М.В. – СПб. : С.-Пб гос. лесотехн. акад., 2007. – 21 с.

Андрущенко А.П. Надземная фитомасса древостоев разного возраста в свежей субори // Тр. Харьковского с.-х. ин-та. – Харьков, 1977. – Т. 240. – С. 53–56.

Артемьева Н.В., Кофман Г.Б. Пределы применимости гипотезы единства средней формы стволов // Лесоведение. — 1984. — № 4. — С. 73-81.

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.

Белов С.В. Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов и их устойчивость // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. – 1974. – Вып. 3. – С. 3–24.

Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования / В.А. Усольцев, В.Ф. Ковязин, И.С. Цепордей, В.П. Часовских, В.А. Азаренок // Изв. СПб лесотехн. акад., 2020. - Вып. 232. - № 3. (в печати).

Богословский С.А. Исследование технических свойств древесины дуба. – Пг: Типолит. М.П. Фроловой, 1915. – 151 с.

Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. - 294 с.

Борщев В.Б. Банки и базы данных // Природа. – 1982. – № 3. – C. 64–75.

Букша И.Ф., Букша М.И. Применение мобильной ГИС-технологии Field-Map в лесном и садово-парковом хозяйстве // Науковий вісник НЛТУ України. — 2013. — Вып. 23.5. — С. 28—34.

Бюсген М. Строение и жизнь наших лесных деревьев. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1961. – 423 с.

Василов Р.Г. Живая сила. Ресурсы приумножит биоэнергетика // Поиск. – 2014. – № 29-30. – 25 июня.

Воробьева М.В. Сбег и объем сучьев сосны района Восточного Саяна // ИВУЗ. Лесн. жур. – 1968. – № 2. – С. 37–40.

Воронин И.В. Организация комплексных хозяйств в лесах первой и второй групп. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 83 с.

Вярбила В.В., Шлейнис Р.И. Влияние удобрения сосновых насаждений на качество древесины // Лесн. хоз-во. — 1981. — № 12. — С. 8—11.

Гейдеман Т.С. Буковая дубрава Молдавской ССР. – Кишинев: Ботанический сад АН Молд. ССР, 1969. – 133 с.

Гелес И.С., Шубин В.И., Коржицкая З.А. Влияние удобрений на рост и некоторые свойства древесины сосны // Лесоведение. — 1987. — $N_2 = 4$. — С. 72—77.

Голиков В.В. Объем и сбег сучьев пихты сибирской // Темно-хвойные леса. – Вып. 35. – Красноярск: СибТИ, 1963. – С. 79–84.

Голиков В.В. Плотность коры ветвей светлохвойных пород Сибири // Лиственница и ее использование в народном хозяйстве. – Красноярск: СибТИ, 1982. – С. 23–25.

ГОСТ 16483.1-84 (СТ СЭВ 388-76) Древесина. Метод определения плотности : утв. и введ. в действие Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 13 апреля 1984 г. – № 1277. – URL.: http://docs.chtd.ru/document/1200008349.

ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности; введ. 1973-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 4 с.

Громов В.С. (ред.). Фундаментальные исследования в области комплексного использования древесины. – Рига: Зинатне, 1982. – 212 с.

Гусев И.И. Фракционный состав елового древостоя по элементам фитомассы // Учет лесного фонда и организация лесного хозяйства. — Вып. 5. — Красноярск: СибТИ, 1976. — С. 25—30.

Данилин М.А. Таблицы объемов сучьев осины // Материалы конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964 год. Секция лесохозяйственная. – Красноярск: СибТИ, 1965. – С. 7–10.

Данилов Д.А., Беляева Н.В., Мельников Е.А. Результаты воздействия комплексного ухода на структуру и качество показателей древесины сосново-елового древостоя // Вестник Сарат. гос. аграрн. унита им. Н.И. Вавилова. — 2011. — $N \ge 8.$ — C. 3-8.

Данилов М.Д. Изменение веса и влажности хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в связи с собственным возрастом дерева // Докл. Академии наук СССР. — 1948. — Т. 59. — № 8. — С. 1487—1490.

Данилов Н.И. Энергосбережение – религия XXI века. – Екатеринбург: НП ИЭЭТ, 2006. – 63 с.

Данченко А.М., Фриккель А.Я., Верзунов А.И. Формирование искусственных молодняков березы. – Томск: Томск. науч. центр СО АН СССР, 1991. – 199 с.

Джабык-Карагайский бор / Л.П. Абрамова, Л.И. Аткина, Е.А. Жучков, С.В. Залесов, Н.А. Луганский, З.Я. Нагимов, О.В. Суставова, Г.И. Соколов, Н.И. Стародубцева, А.С. Степанов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2005.-213 с.

Древесина. Показатели физико-механических свойств. Руководящие технические материалы / Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров Союза ССР. – М., 1962. – 50 с.

Дмитриев A.C. Big Data⁴ : Velocitd, Variety, Value// Мониторинг общественного мнения. -2015. -№ 2(126). - C. 156-159.

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

Ефименко В.М. Надземная фитомасса сосновых культур к возрасту первого лесохозяйственного ухода // Лесохоз. наука и практика. – Вып. 24. – Минск, 1974. – С. 28–31.

Закревский П.Б. Изменение объемного веса ствола и кроны растущих деревьев по высоте // Тр. ЦНИИМЭ. – Химки, 1972. – Т. 123. – С. 92–102.

Залесов С.В., Лобанов А.Н., Луганский Н.А. Рост и производительность сосняков искусственного и естественного происхождения. — Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. — 112 с.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Показатели конверсии запасов насаждений в первичную продукцию для основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. — $2003. - \mathbb{N} \ 1(32). - \mathbb{C}. \ 128-130.$

Захаров В.К. Новое в методике исследования формы древесных стволов и составление таблиц объема и сбега // Науч. тр. Ин-та леса АН БССР. – Вып. 6. – Минск, 1955. – С. 16–20.

Инвентаризация и картографирование зеленых насаждений с помощью полевой ГИС Field-Map / И.Ф. Букша, Р. Русс, Т.С. Мешкова, В.П. Пастернак, М. Черны // Ландшафт плюс. — № 1. — Киев: Ландскейп, 2006. - C. 48-51.

Ионайтис С. Некоторые физико-механические свойства древесины неликвидных сучьев // ИВУЗ. Лесн. жур. – 1963. – № 1. – С. 110–113.

Исаева Л.Н. Особенности распределения влаги в различных частях древесины стволов кедра сибирского // Тр. Ин-та леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 77–82.

Исаева Л.Н. Распределение влажности в стволах растущих деревьев основных пород Восточной Сибири // Свойства древесины, ее защита и новые древесные материалы. – М.: Наука, 1966. – С. 3–10.

Исаева Л.Н. Физические свойства древесины растущих деревьев на различных стадиях гниения // Древесина и древесные материалы / Б.С. Чудинов (ред.). – Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1974. – С. 28–39.

Исаева Л.Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. -1978. - N = 4. - C.90-94.

Калинин М.И. Моделирование лесных насаждений: биометрия и стереометрия. – Львов: Вища школа, 1978. – 207 с.

Киртока В.А. Листовая масса древесных пород в свежей липовоясеневой дубраве из дуба скального // Биологическая продуктивность и экология молдавских дубрав. – Кишинев: АН Молд. ССР, 1969. – С. 20–31.

Киселева А.В., Хван Ю.Г. Связь между процентом поздней древесины и плотностью ее в зоне южной тайги европейской части России // Лесотехн. жур. -2014. - N 1. - C. 21-26.

Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. - 248 с.

Козицын П.Д. Теоретическая проверка удельных массовых таблиц для березы // Тр. Моск. лесн. общ-ва. – М., 1909. – Вып. 3. – С. 32–47.

Козлов В.А., Кистерная М.В., Неронова Я.А. Влияние лесохозяйственных мероприятий на плотность и химический состав древесины сосны обыкновенной // ИВУЗ. Лесн. жур. -2009а. - № 6. - С. 7–13.

Козлов В.А., Кистерная М.В., Аксененкова Я.А. Влияние лесохозяйственных мероприятий на качество древесины сосны обыкновенной: долговременные аспекты // ИВУЗ. Лесн. жур. — 20096. — № 6. — C. 86–100.

Конаш Г.И. Використання тонкомірної деревини у виробництвї деревностружкових плит // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість. — 1971. — № 5. — С. 5—11.

Корчагов С.А., Мелехов В.И. Влияние удобрений и комплексных уходов на формирование древесины сосны в лесных культурах // Изв. ТСХА. – 2009. – Вып. 2. – С. 64–68.

Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. – Новосибирск: Наука, 1986. – 211 с.

Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 464 с.

Лавров М.Ф. Составление карт распределения плотности в поперечных и продольных сечениях ствола дерева // Наука и образование. -2015. - № 2. - С. 78-84.

Лазу С.Н. Листовая масса древесных пород в свежей грабовой дубраве из дуба черешчатого // Биологическая продуктивность и экология молдавских дубрав. – Кишинев: АН Молд. ССР, 1969. – С. 32–41.

Левченко В.П. Физико-механические свойства древесины сучков сосны // ИВУЗ. Лесн. жур. -1969. -№ 1. - C. 93–96.

Лир X., Польстер Γ ., Фидлер Γ .-И. Физиология древесных растений. – М.: Лесн. пром-сть, 1974. – 424 с.

Лопатин Е.В. Анализ динамики радиального прироста основных лесообразующих пород Республики Коми : автореф. дис... канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Лопатин Е.В. – СПб: СПб гос. лесотехн. акад., 2010. – 20 с.

Лопатко В.А. О физико-механических свойствах древесины ветвей и сучьев // Тр. ЛЛТА им. С.М. Кирова. -1939. -№ 54. - C. 43-46.

Майер-Шенбергер В., Кукьер К. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. - 240 с.

Маргулов Г.Д. Богатые бедняки // Труд. -2003. -15 апр.

Медведев Я.С. Опыт исследования гущины леса // Лесн. жур. – 1910. – Вып. 4–5. – С. 432–438.

Межжерин В.А. Закон минимума Либиха: возможности его верного прочтения и практического применения // Экология. — 1994. — $N_2 = 1.00$ 2. — С. 3—8.

Межреспубликанские технические условия 13-02-3-66. Щепа технологическая. – М.: ЦНИИМОД, 1966. – 13 с.

Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – 110 с.

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

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

Нагимов З.Я. Обоснование индикаторов первоначальной густоты древостоев // Леса Урала и хоз-во в них. – Екатеринбург, 1999. – Вып. 19. – С. 72–81.

Нахабцев И.А. Таксация древесной коры. Методические указания и таблицы процентов коры к самостоятельной работе студентов. — Л.: ЛЛТА, 1990.-36 с.

Никитин К.Е. Теория определения объемов древесных стволов. – Киев: УкрСХА, 1979. – 51 с.

Осипенко Ю.Ф. К характеристике качества мелкомерной древесины от рубок ухода в лиственных молодняках // XV науч. конф. Львовского ЛТИ. – Львов, 1963. – С. 43–48.

Оценка формы ствола и кроны сосны обыкновенной по комплексу морфологических признаков / С.А. Шавнин, И.С. Овчинников, А.А. Монтиле, Д.Ю. Голиков // Лесоведение. – 2018. – № 6. – С. 1–11.

Пахомов С. Квантовый компьютер // КомпьютерПресс. – 2007. – № 5. – URL:http://www.compress.ru/article.aspx?id=17653&iid=817

Перелыгин А.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. – М.: Лесн. пром-сть, 1971.-318 с.

Петри В.Н. (ред.). Плитные материалы и изделия из древесины и других одревесневших растительных остатков без добавления связующих. — М.: Лесн. пром-сть, 1976. - 360 с.

Писаренко А.И., Страхов В.В. О некоторых современных задачах лесного сектора России // Лесн. хоз-во. -2006. -№. 4. - C. 5-7.

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

Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. — Красноярск: Кн. изд-во, 1969. — 120 с.

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

Полубояринов О.И. Плотность древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1976a.-160 с.

Полубояринов О.И. Квалиметрия древесного сырья в процессе лесовыращивания: автореф. дис. ...д-ра с.-х. наук: 06.03.03 / Полубояринов О.И. – Л.: ЛЛТА, 19766. – 46 с.

Полубояринов О.И., Давидов Г.М. Плотность древесины и весовая продуктивность березовых насаждений Ленинградской области // ИВУЗ. Лесн. жур. -1975. - № 5. - С. 14–18.

Полубояринов О.И., Некрасова Г.Н., Фёдоров Р.Б. О взаимосвязи влажности и плотности древесины растущих деревьев // ИВУЗ. Лесн. жур. -1982. - № 2. - C. 7-11.

Республиканские технические условия РТУ-5003-62. Щепа для производства древесноволокнистых плит. – М.: ЦНИИМЭ, 1962. – 4 с.

Розен А. Сравнение плотности и предела прочности при сжатии и статическом изгибе древесины ветвей и ствола березы // Тр. Латв. с.-х. акад. – Рига, 1969. – Вып. 26. – С. 145–149.

Савельев А.И. Проблемы применения законодательства о персональных данных в эпоху «Больших данных» (Big Data) // Право. — 2015. - N = 1. - C. 43-66.

Самойлова И.А. Технологии обработки больших данных // Молодой ученый. -2017. -№ 49. - С. 26-28. - URL: https://moluch.ru/archive/183/46957/ (дата обращения: 24.03.2019).

Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. Естественное лесовозобновление в Западной Сибири: эколого-географический очерк. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 198 с.

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

Симонов М.Н. Некоторые физические и механические свойства коры основных древесных пород // ИВУЗ. Лесн. жур. — 1962. - № 5. -С. 133-139.

Смоляк Л.П., Петров Е.Г., Русаленко А.И. Объемный вес древесины и коры сосны в различных экологических условиях // Лесн. хоз-во. – 1978. – № 4. – С. 70–71.

Соколов А.И., Пеккоев А.Н., Харитонов В.А. Влияние периодического внесения азотных удобрений на качество древесины сосны обыкновенной в культурах // Успехи соврем. естествознания. Сельскохозяйственные науки. — $2016. - N_2 11. - C. 75-79.$

Стадницкий Г.В. Энергетика биогеоценоза и проблемы лесовосстановления // Стабильность и продуктивность лесных экосистем: тез. докл. Всесоюз. совещ., Тарту, 29-31 окт. 1985 г. – Тарту: Тартуский гос. ун-т, 1985. – С. 128–131.

Столяров Д.П., Полубояринов О.И., Декартов Н.Н. Использование кернов древесины в лесоводственных исследованиях: метод. рекомендации. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1988.-43 с.

Тамаркин М.Л. О весовом методе учета древесного сырья // Лесн. пром-сть. — 1968. - No 7. - C. 15.

Технеряднов А.В., Шоманов Ж.Ш. Определение весового запаса стволов с помощью условной плотности древесины в культурах сосны Чалдайского лесхоза // Науч. тр. КазСХИ. – Алма-ата, 1976. – Т. 19. – № 3. – С. 93–100.

Тябера А.П. Влияние площади роста деревьев на таксационные показатели и качество древесины сосняков Литовской ССР // Лесоведение. − 1982. – № 2. – С. 78–84.

Усольцев В.А. Березовые сучья – сырье для производства древесностружечных плит // Информатор ЛатНИИЛХП (обзоры текущих исследований института). – Рига, 1971. – С. 78–83.

Усольцев В.А. Элементы биологической продуктивности березово-осиновых лесов Северного Казахстана: автореф. дис... канд. с.-х.

наук:06.03.03 / Усольцев Владимир Андреевич. – Свердловск: УЛТИ, 1973. – 26 с.

Усольцев В.А. Тонкомерные сортименты березы и осины для производства древесно-стружечных плит // Плиты и фанера: реф. информ. -1975a. -№ 10. - C. 6-7.

Усольцев В.А. К методике определения содержания коры в кронах деревьев // Вестник с.-х. науки Казахстана. — 1975б. — № 12. — С. 103–106.

Усольцев В.А. Динамика плотности и содержание сухого вещества древесины в осиновых древостоях // Лесоведение. — 1983. — № 6. — С. 42–49.

Усольцев В.А. Модели динамики плотности и содержания сухого вещества древесины и коры деревьев // Вестник с.-х. науки Казахста-на. -1984а. - № 10. - С. 76-82.

Усольцев В.А. Оценка формы и полнодревесности стволов с использованием множественных связей // Вестник с.-х. науки Казахстана. – 19846. - N 2. - C. 75-79.

Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985а. – 191 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353

Усольцев В.А. Продуктивность и структура фитомассы древостоев (на примере лесов Казахстана и юга Западной Сибири): автореф. дис. ...д-ра с.-х. наук: 06.03.02 / Усольцев Владимир Андреевич. – Киев: УкрСХА, 1985б. – 46 с.

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. — Новосибирск: Наука, 1988. — 253 с. — URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 708 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 762 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 406 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3303

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. – Екатеринбург:

УрО РАН, 2007. – 636 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 570 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. — Екатеринбург: УГЛТУ, 2016а. — 336 с. — URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696

Усольцев В.А. Русский лес как гарант энергетической и экологической безопасности России // Арабески российских реалий: между прошлым и будущим. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2016б. – С. 205–214.

Усольцев В.А. В подвалах биосферы: Что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? // Эко-потенциал. — 2018. — № 4 (24). — С. 24-77. — URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/8024/1/eko4-18-04.pdf

Усольцев В.А., Макаренко А.А., Аткин А.С. Закономерности формирования надземной фитомассы сосны в Северном Казахстане в связи с густотой // Лесоведение. -1979. - № 5. - C. 3-12.

Усольцев В.А., Передерий О.Н., Прохоров Ю.А. Квалиметрия ветвей в сосняках Аман-Карагайского бора // Вестник с.-х. науки Казахстана. -1985. - N 2. - C. 74-78.

Усольцев В.А., Крепкий И.С., Вэнклей Д.К. Рост и структура фитомассы сосны естественного и искусственного происхождения // Леса Урала и хоз-во в них. – Вып. 17. – Екатеринбург: УГЛТА, 1994. – С. 39–58.

Успенский В.В. Изменчивость плотности древесины сосны и ее использование в весовой таксации // ИВУЗ. Лесн. жур. -1980. -№ 6. - C. 9-12.

Уткин А.И. Исследования по первичной биологической продуктивности лесов в СССР // Лесоведение. — 1970. — № 3. — С. 58–89.

Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. — М.: Наука, 2008. — 292 с.

Фишер Ф.Б. О посеве и посадке деревьев на острове Уналашке // Лесн. жур. -1841. -№ 8. - C. 149-158.

Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. жур. -2014. -№ 1. - C. 69-92.

Шкиря Т.М. Физико-механические свойства древесины сучьев и вершин карпатского бука // ИВУЗ. Лесн. жур. — 1960. — № 1. — С. 111—115.

Штибе У.Л. Количественные показатели элементов крон ели в спелых ельниках-кисличниках Латвийской ССР: автореф. дис. ...канд. с.-х. наук: 562 / Штибе У.Л. – Елгава: ЛатСХА, 1967. – 23 с.

Щербаков Н.М., Зайцева Н.Л. Биометрическая характеристика спелых ельников юга Карелии // Лесные растительные ресурсы южной Карелии. – Петрозаводск: Карелия, 1971. – С. 22–40.

Яхонтов И.А. Технические свойства сосновой древесины из лесов Люблинской, Варшавской и Петроковской губерний // Тр. по лесному опытному делу в России. – СПб, 1913. – Вып. 49. – С. 1–110.

Abdel-Gadir A.Y., Krahmer R.L. Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir // Wood Fiber Science. – 1993a. – Vol. 25. – P. 242–249.

Abdel-Gadir A.Y., Krahmer R.L. Genetic variation in the age of demarcation between juvenile and mature wood in Douglas-fir // Wood Fiber Science. – 1993b. – Vol. 25. – P. 384–394.

Abetz P. Bestandesdichte und Astdurchmesser bei der Rheintalkiefer // Allgemeine Forst-und Jagdzeitung, 1970. – Vol. 141. – № 12. – P. 233–238.

Acuna M.A., Murphy G. Geospatial and within tree variation of wood density and spiral grain in Douglas-fir // Forest Products Journal. -2006. - Vol. 56. - N 24. - P. 81-85.

Acuna M.A., Murphy G. Estimating relative log prices of Douglas fir through a financial analysis of the effects of wood density on lumber recovery and pulp yield // Forest Products Journal. – 2007. – Vol. 57. – P. 60–65.

Agestam E., Karlsson M., Nilsson U. Mixed forests as a part of sustainable forestry in Southern Sweden // Journal of Sustainable Forestry. $-2006. - \text{Vol.} 21. - \text{N}_{\text{2}} 2-3. - \text{P.} 101-117.$

Akaike H. A new look at statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – AU-19. – P. 716–722.

Alden J., Bruce D. Growth and historical Sitka spruce plantations at Unalaska Bay, Alaska // USDA Forest Service. Pacific Northwest Research Station. – General Technical Report PNW-GTR-236, 1989. – 18 p.

Alemdag I.S. Wood density variation of 28 tree species from Ontario. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Petawawa, ON. – Information Report PI-X-45F, 1984. – 12 p.

Al-Sagheer N.A., Prasad A.G.D. Variation in wood specific gravity, density and moisture content of *Dipterocarpus indicus* (Bedd) among differ-

ent populations in Western Ghats of Karnataka, India // International Journal of Applied Agricultural Research. – 2010. – Vol. 5. – № 5. – P. 583–599.

Alteyrac J., Cloutier A., Zhang S.Y. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights // Wood Science and Technology. -2006. - Vol. 40. - No 2. - P. 124-138.

Amarasekara H., Denne M.P. Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed wood and core wood // Forestry. -2002. - Vol. 75. - N_{2} 1. - P. 51–61.

Ando T., Hirozami K. Bulk density of branches of *Cryptomeria* // Journal of the Japanese Forest Society. – 1961. – Vol. 43. – P. 280–283.

Antonova G.F., Stasova V.V. Effects of environmental factors on wood formation in larch (*Larix sibirica* Ldb.) stems // Trees. – 1997. – Vol. 11. – P. 462–468.

Assmann E. Waldertragskunde: Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. – München-Bonn-Wien: BLV Verlagsgesellschaft, 1961. – 490 p.

Assmann E. The principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands. – New York, Toronto, Sydney, Braunschweig: Pergamon Press, Oxford, 1970. – 506 p.

ASTM. Standard test methods for specific gravity of wood and woodbased materials. West Conshohocken, PA. – USA: ASTM International, Designation, 2007. – D 2395-07a.

Bacher M., Krzosek S. Bending and tension strength classes in European standards // Annals of Warsaw University of Life Sciences: Forestry and Wood Technology. – 2014. – Vol. 88. – P. 14–22.

Baillères H., Chanson B., Fournier M., Tollier M.T., Monties B. Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'Eucalyptus // Annales des Sciences Forestières. -1995. - Vol. 52. - No 2. - P.157–172.

Baker F.S. Principles of silviculture. – New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1950. – 414 p.

Baldwin V.C. Jr., Peterson K.D., Clark A.III, Ferguson R.B., Strub M.R., Bower D.R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine // Forest Ecology and Management. – 2000. – Vol. 137. – P. 91–102.

Baliuckienė A., Baliuckas V. Genetic variability of silver birch (*Betula pendula* L.) wood hardness in progeny testing at juvenile age // Baltic Forestry. – 2006. – Vol. 12. – P. 134–140.

Barnes R.D., Birks J.S., Battle G., Mullin L.J. The genetic control of ring width, wood density and tracheid length in the juvenile core of *Pinus patula*, Suid-Afrikaanse Bosboutydskrif // South African Forestry Journal. – 1994. – Vol. 169. – P. 15–20.

Barnes R.D., Mullin L.J., Battle G. Genetic control of eighth year traits in *Pinus patula* Schiede and Deppe // Silvae Genetica. – 1992. – Vol. 41. – P. 318–326.

Barnett J.R., Bonham V.A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres // Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society. -2004. -Vol.79. $-\text{N}_{2}$ 2. -P. 461–72.

Bartelink H.H. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir // Forest Ecology and Management. — 1996. — Vol. 86. — P. 193–302.

Bastin J.-F., Fayolle A., Tarelkin Y., Van den Bulcke J., de Haulleville T., Mortier F., Beeckman H., Van Acker J., Serckx A., Bogaert J., De Cannière C. Wood specific gravity variations and biomass of Central African tree species: The simple choice of the outer wood // PLoS ONE. – $2015. - \text{Vol. } 10. - \text{N}\underline{0} 11.\text{e}0142146.$

Bauschinger J. Untersuchungen über die Elasticität und Festigkeit verschiedener Nadelhölzer // Mitteilungen aus dem mechanischtechnischen Laboratorium der Königliche Technische Hochschule in München. − 1887. − Vol. 14. − № 16. − 292 p.

Beaulieu J., Zhang S.Y., Yu Q., Rainville A. Comparison between genetic and environmental influences on lumber bending properties in young white spruce // Wood Fiber Science. – 2006. – Vol. 38. – P. 553–564.

Beets P.N., Gilchrist K., Jeffreys M.P. Wood density of radiata pine: effect of nitrogen supply // Forest Ecology and Management. -2001. - Vol. 145. - No 2. - P. 173–180.

Begum S., Nakaba S., Yamagishi Y., Yamane K., Islam M.A., Oribe Y., Ko J.-H., Jin H.-O., Funada R. A rapid decrease in temperature induces latewood formation in artificially reactivated cambium of conifer stems // Annals of Botany. -2012. - Vol. 110. - No. 4. - P. 875-885.

Bendtsen B.A. Properties of wood from improved and intensively managed trees // Forest Products Journal. – 1978. – Vol. 28. – P. 61–72.

Berdugo M., Delgado-Baquerizo M., Soliveres S., Hernández-Clemente R., Zhao Y., Gaitán J.J., Gross N., Saiz H., Maire V., Lehman A.,

Rillig M.C., Solé R.V., Maestre F.T. Global ecosystem thresholds driven by aridity // Science. – 2020. – Vol. 367. – P. 787–790.

Bergstedt A., Olesen P.O. Models for predicting dry matter content of Norway spruce // Scandinavian Journal of Forest Research. -2000. - Vol. 15. - No 6. - P. 633-644.

Bertog H. Untersuchungen über den Wuchs und das Holz der Wei tanne und Fichte // Forstliche-naturwissenschaftliche Zeitschrift. – 1895. – Vol. 4. – P. 97–113; 177–216.

Bhat K.M. Variation in structure and selected properties of Finnish birch wood. I. Interrelationships of some structural features, basic density and shrinkage // Silva Fennica. – 1980. – Vol. 14. – P. 384–396.

Bjurhager I., Berglund L.A., Bardage S.L., Sundberg B. Mechanical characterization of juvenile European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (*Populus tremula* × *Populus tremuloides*) using full-field strain measurements // Journal of Wood Science. − 2008. − Vol. 54. − № 5. − P. 349–355.

Bi H., Murphy S., Volkova L., Weston Ch., Fairman T., Li Y., Law R., Norris J., Lei X., Caccamo G. Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia // Forest Ecology and Management. – 2015. – Vol. 349. – P. 106–121.

Blanchette D., Fournier R.A., Luther J.E., Côté J.-F. Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial LiDAR data: A case study of Newfoundland conifer species // Forest Ecology and Management. – 2015. – Vol. 347. – P. 116–129.

Bleile K. Vorkommen und Analyse von Zugholz bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) als Ursache von Spannungen im Rundholz und Verwertungen des Schnittholzes. – Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2006. – 150 p.

Blossfeld O., Haaseman W., Wonka R. Rindendicken und Rindenanteile von dünnen Fichten- und Kiefernholz // Holztechnologie. – 1963. – Vol. $4. - N_2 2. - P. 163-169$.

Blomberg S.P., Garland T. jr., Ives A.R. Testing for phylogenetic signal in comparative data: behavioral traits are more labile // Evolution. – 2003. – Vol. 57. – P. 717–745.

Booker R.E., Harrington J.J., Shiokura T. Variation in Young's modulus with microfibril angle, density and spiral grain // Butterfield B.G. (Ed.) Microfibril Angle in Wood, Proceedings of IAWA/IUFRO International

Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality, Westport, New Zealand, 1997. – P. 296–311.

Bouriaud O., Leban J.-M., Bert D., Deleuze C. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce // Tree Physiology. – 2003. – Vol. 25. – P. 651–660.

Bouriaud O., Breda N., Le Moguedec G., Nepveu G. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate // Trees. -2004. - Vol. 18. - P. 264–276.

Bradbury J.H. Determination of energy from moisture content in foods containing small amount of fat and dietary fibre // Journal of Agricultural and Food Chemistry. -1986. - Vol. 34. - No 2. - P. 358-361.

Brännstöm M. Establishing a model for the dry density of heartwood of Norway spruce by parameters industrially measurable on green logs. Master's Thesis. – Luleå University of Technology, Division of Wood Technology, 2005. – 45 p.

Brazier J.D. The effect of forest practices on quality of the harvested crop // Forestry. $-1977. - \text{Vol.} 50. - \text{N}_{\text{2}} 1. - \text{P.} 49-66.$

Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere. Part 1. Local and regional climate signals // The Holocene. – 2002. – Vol. 12. – P. 737–757.

Briggs D. Enhancing forest value productivity through fiber quality // Journal of Forestry. $-2010. - \text{Vol. } 108. - \text{N}_{2} 4. - \text{P. } 174-182.$

Bruce D., Max T.A. Use of profile equations in tree volume estimation // LaBau J., Cunia T. (eds.). – USDA Forest Service, Portland, 1990. – P. 213–220.

Bücking M., Moshammer R., Roeder A. Wertholzproduktion bei der Fichte mittels kronenspannungsarm gewachsener Z-Bäume // Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz. − 2007. − № 62/07. − 295 p.

Budgen B. Shrinkage and density of some Australian and South-East Asian timbers. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia. Division of Building Research. – Technical Paper (Second Series). $-N_{2}$ 38, 1981. – 33 p.

Budniak F. Problemy techniczno-ekonomiczne pozyskania, dostawy, i przerobu drobnicy tyczkowej na plyty pilsniowe na przykladzie ZPP w Czarnkowie // Drobnica Tyczkowa, Poznan, 1964. – P. 115–134.

- Bues C.T. Der Einfluß von Bestockungsgrad und Durchforstung auf die Rohdichte von südafrikanischer *Pinus radiata* // Holz als Roh- und Werkstoff. 1985. Vol. 43. P. 69–73.
- Burger H. Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbestanden // Mitteilungen Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. 1939. Vol. 21. P. 147–176.
- Burger H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. XIII. Mitteilung: Fichten in gleichaltrigen Hochwald // Mitteilungen Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. 1953. Vol. 29. P. 38–130.
- Burkhart H., Tomé M. Modeling forest trees and stands. Dordrecht: Springer, 2012. 457 p.
- Buschbeck L., Kehr E., Scherfke R. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und Sortimente zur Herstellung von Spannplatten // Holztechnologie. −1961. − Vol. 2. − № 3. − P. 195.
- Büsgen M., Münch E. The structure and life of forest trees. 3rd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1929. 436 p.
- Cailliez F. Forest volume estimation and yield prediction. Vol. 1. Volume estimation. FAO Forestry Paper 22/1. Rome, 1980. 98 p.
- Cairns M.A., Brown S., Helmer E.H., Baumgardner G.A. Root biomass allocation in the world's upland forests // Oecologia (Berlin). 1997. Vol. 111. P. 1-11.
- Cannell M.G.R. World forest biomass and primary production data. London: Academic Press, 1982. 391 p.
- Cannell M.G.R. Woody biomass of forest stands // Forest Ecology and Management. -1984. Vol. 8. \cancel{N} $_2$ 4. P. 299-312.
- Carlson T.C. Specific gravity and site index as related to soil series (Sanders County, Montana). B.S. Montana State University, Graduate Student Theses. Dissertations, Professional Papers, 3634. 1964. 98 p.
- Cave I.D. The anisotropic elasticity of the plant cell wall // Wood Science and Technology. -1968. Vol. 2. No. 4. P. 268-278.
- Cave I.D., Walker J.C.F. Stiffness of wood in fast-grown softwoods: the influence of microfibril angle // Forest Products Journal. -1994. Vol. 44. No. 5. P. 43-48.
- Chafe S.C. Towards defining a wood quality index for the Eucalypts: The R-ratio // Wood Science and Technology. 1987. Vol. 21. P. 131–138.
- Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.-P., Nelson B., Ogawa H., Puig H., Riéra B., Yamakura T. Tree allometry and improved

estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // Oecologia. – 2005. – Vol. 145. – P. 87-99.

Chave J., Muller-Landau H.C., Baker T.R., Easedale T.A., Ter Steege H., Webb C.O. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species // Ecological Applications. -2006. - Vol. 16. - No 6. - P. 2356-2367.

Chave J., Coomes D., Jansen S., Lewis S.L., Swenson N.G., Zanne A.E. Towards a worldwide wood economics spectrum // Ecology Letters. – 2009. – Vol. 12. – P. 351–366.

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

Clark A.III, Daniels R.F., Jordan L. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle // Wood Fiber Science. -2006. - Vol. 38. - No 2. - P. 292–299.

Clark P.J., Evans F.C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations // Ecology. -1954. - Vol. 35. - No 4. - P. 445–453.

Colgan M.S., Swemmer T., Asner G.P. Structural relationships between form factor, wood density, and biomass in African savanna woodlands // Trees. -2014. - Vol. 28. - P. 91–102.

Constant T., Mothe F., Badia M.A., Saint-Andre L. How to relate the standing tree shape to internal wood characteristics: Proposal of an experimental method applied to poplar trees // Annals of Forest Science. -2003. - Vol. 60. - P. 371-378.

Coops N.C., Wulder M.A., Culvenor D., St-Onge B. Comparison of forest attributes automatically extracted from high resolution and optical and LiDAR data // Canadian Journal of Remote Sensing. -2004. - Vol. 30. - No 6. - P. 855-866.

Cordero L.D.P., Kanninen M. Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica // Forest Ecology and Management. – 2002. – Vol. 165. – P. 1–9.

Corriveau A., Beaulieu J., Mothe F. Wood density of natural white spruce populations in Quebec // Canadian Journal of Forest Research. -1987. - Vol. 17. - No. 7. - P. 675-682.

Corriveau A., Beaulieu J., Daoust G. Heritability and genetic correlations of wood characters of Upper Ottawa Valley white spruce populations grown in Quebec // The Forestry Chronicle. – 1991. – Vol. 67. – P. 698–705.

Cortini F., Groot A., Tong Q., Duchesne I. Ring-level models for predicting wood and fibre properties of *Abies balsamea* // Wood Science and Technology. – 2014. – Vol. 48. – P. 1181–1196.

Cortini F., MacIsaac D.A., Comeau P.G. White spruce growth and wood properties over multiple time periods in relation to current tree and stand attributes // Forests. -2016. - Vol. 7. - P. 49.

Côté, J.-F., Fournier R.A., Egli R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR // Environmental Modelling and Software. – 2011. – Vol. 26. – P. 761–777.

Cown D.J., Hebert J., Ball R. Modelling *Pinus radiata* lumber characteristics. Part 1: Mechanical properties of small clears // New Zealand Journal of Forestry Science. -1999. - Vol. 29. - No. 20. - P. 203–213.

Cown D.J., Ball R.D., Riddell M.J.C. Wood density and microfibril angle in 10 *Pinus radiata* clones: distribution and influence on product performance // New Zealand Journal of Forestry Science. -2004. - Vol. 34. - No 3. - P. 293–315.

Crowther T.W., Glick H.B., Covey K.R., Bettigole C., Maynard D.S., Thomas S.M., Smith J.R., Hintler G., Duguid M.C., Amatulli G., Tuanmu M.-N., Jetz W., Salas C., Stam C., Piotto D., Tavani R., Green S., Bruce G., Williams S.J., Wiser S.K., Huber M.O., Hengeveld G.M., Nabuurs G.-J., Tikhonova E., Borchardt P., Li C.-F., Powrie L.W., Fischer M., Hemp A., Homeier J., Cho P., Vibrans A.C., Umunay P.M., Piao S.L., Rowe C.W., Ashton M.S., Crane P.R., Bradford M.A. Mapping tree density at a global scale // Nature. – 2015. – Vol. 525. – P. 201–205.

Curry E. The Big Data value chain: Definitions, concepts, and theoretical approaches // New Horizons for a Data-Driven Economy: A Roadmap for Usage and Exploitation of Big Data in Europe / J.M. Cavanillas et al. (eds.). – Berlin – Heidelberg: Springer, 2016. – P. 29-37.

Curtis R.O., Reukema D.L. Crown development and site estimates in a Douglas-fir plantation spacing test // Forest Science. — 1970. — Vol. 16. — P. 287—301.

Daniels R.F., Rechun H.E., Clark A.III, Souter R.A. Modeling wood properties of planted loblolly pine from pith to bark and stump to tip // Proceedings of the 4th IUFRO Workshop — Connection between Forest Resources and Wood Quality: Modelling Approaches and Simulation Software, September 8–15, 2002, Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada, 2002. – P. 1–4.

Davies P.J. The plant hormones: From original concept to a molecular flowering // Macháčková I., Romanov G.A. (eds.). – Phytohormones in Plant Biotechnology and Agriculture. – Dordrecht: Springer, 2003. – P. 9-30.

DeAngelis D.L., Gardner R.H., Shugart H.H. Productivity of forest ecosystems studied during the IBP: The woodlands data set // Reichle D. E. (ed.). – Dynamic properties of forest ecosystems. IBP-23. – Cambridge: Univ. Press, 1981. – P. 567-672.

Defo M., Duchesne I., Stewart J. A review of the current state of wood quality modelling and decision support systems in Canada. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service – Canadian Wood Fibre Centre. – Laurentian Forestry Centre, Québec, QC. Information Report FI-X-012. 2015. – 118 p.

Deleuze C., Hervè J.C., Colin F., Ribeyrolles L. Modelling crown shape of *Picea abies*: spacing effects // Canadian Journal of Forest Research. – 1996. – Vol. 26. – P. 1957–1966.

De Mil T., Tarelkin Y., Hahn S., Hubau W., Deklerck V., Debeir O., Van Acker J., de Cannière C., Beeckman H., Van den Bulcke J. Wood density profiles and their corresponding tissue fractions in tropical angiosperm trees // Forests. – 2018. – Vol. 9. – P. 1-14.

Deng X., Zhang L., Lei P., Xiang W., Yan W. Variations of wood basic density with tree age and social classes in the axial direction within *Pinus massoniana* stems in Southern China // Annals of Forest Science. -2014. - Vol. 71. - No 4. - P. 505-516.

Denne M. Temperature and tracheid development in *Pinus sylvestris* seedlings // Journal of Experimental Botany. – 1971. – Vol. 22. – P. 362–370.

Denne M.P. Effects of light intensity on tracheid dimensions in *Picea sitchensis* // Annals of Botany. – 1974. – Vol. 38. – P. 337–345.

Denne M.P., Dodd R.S. Control of variation in wood quality within hardwood and softwood trees // Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. – 1980. – Vol. 131. – P. 7–30.

Deslauriers A., Morin H. Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables // Trees. -2005. - Vol. 19. - P. 402–408.

Détienne P., Chanson B. L'éventail de la densité du bois des feuillus: Comparaison entre différentes régions du monde // Bois et Forêt des Tropiques. – CIRAD-Forêt. – 1996. – P. 19–30. – Available: http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2472307

Dibdiakova J., Vadla K. Basic density and moisture content of coniferous branches and wood in Northern Norway // European Physical Journal Web of Conferences: 2nd European Energy Conference, 2012. – Vol. 33. – 02005.

Dieguez-Aranda U., Castedo-Dorado F., Ivarez-Gonzlez J.G., Rojo A. Compatible taper function for plantations in northwestern Spain // Canadian Journal of Forest Research. – 2006. – Vol. 36. – P. 1190–1205.

Djomo A.N., Ngoukwa G., Zapfack L., Chimi C.D. Variation of wood density in tropical rainforest trees // Journal of Forests. -2017. - Vol. 4. - No. 2. - P. 16-26.

Dobrowolska E., Wroniszewska P., Jankowska A. Density distribution in wood of European birch (*Betula pendula* Roth.) // Forests. – 2020. – Vol. 11. – P. 445.

Donaldson L. Microfibril angle: measurement, variation and relationships – a review // IAWA Journal. – 2008. – Vol. 29. – No.29. – P. 345-386.

Donegan E., Sola G., Cheng Z., Birigazzi L., Gamarra J. G.-P., Henry M., Vieilledent G., Chiti T. GlobAllomeTree's wood density database. – Rome, Italy, 2014. – P. 1–29.

Downes G. M., Hudson I. L., Raymond C. A., Dean G. H., Michell A. J., Schimleck L. S., Evans R., Muneri A. Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties. – Melbourne: CSIRO Publishing, 1997. – 144 p.

Downes G.M., Wimmer R., Evans R. Understanding wood formation: gains to commercial forestry through tree ring research // Dendrochronologia. $-2002. - \text{Vol.}\ 20. - \text{N}\text{o}\ 1-2. - \text{P.}\ 37-51.$

Doyog N.D., Lee Y.J., Lee S. Stem taper equation analysis for *Larix kaempferi* species in the Central Region of South Korea // Journal of Sustainable Forestry. -2017. - Vol. 36. - \cancel{N} $\cancel{2}$ $\cancel{2}$

Dumitrescu M. Der maximal zulässige Rindenanteil an Holzabfällen für die Spanplattenherstellung und der Einflü desselben auf die Qualität der Erzeugnisse // Industria Lemnului, Bukuresti. − 1964. − Vol. 15. − № 10. − P. 14−19.

Elliott G.K. Wood density in conifers. Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, England // Technical Communication. -1970. - N = 8. - 44 p.

Erickson H.D., Harrison A.T. Douglas-fir wood quality studies. Part I: Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy // Wood Science and Technology. -1974. - Vol. 8. - No. 9. - 207–226.

Ericson B. Effect of thinning on the basic density and content of latewood and heartwood in Scots pine and Norway spruce. Department of Forestry. – Yield Research. Research Note No 10. – 1966. – 116 p.

Eriksson B. The precipitation and humidity climate of Sweden during the vegetation period. – SMHI RMK 46. – Norrköping, Sweden, 1986. – 73 p.

Eriksson D., Lindberg H., Bergsten U. Influence of silvicultural regime on wood structure characteristics and mechanical properties of clear wood in *Pinus sylvestris* // Silva Fennica. –2006. – Vol. 40. – P. 743–762.

Esser G., Lieth H.F.H., Scurlock J.M.O., Olson R.J. Worldwide estimates of net primary productivity derived from pre-1982 publications. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. – ORNL Technical Memorandum TM-13485, 1997. – 132 p.

Evans R., Ilic J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density // Forest Products Journal. -2001. - Vol. 51. - No. 3. - P. 53-57.

Evans R. Rapid measurement of the transverse dimensions of tracheids in radial wood sections from *Pinus radiata* // Holzforschung. – 1994. – Vol. $48. - N_2 2. - P. 168-172.$

Evans R. Wood stiffness by X-ray diffractometry. Chapter 11 // Characterization of the cellulosic cell wall. D.D. Stokke and L.H. Groom (Eds.). Proceedings of a workshop cosponsored by the USDA Forest Service - Southern Research Station, the Society of Wood Science and Technology, and Iowa State University, Grand Lake, Colorado, USA, August 25–27 2003. – Blackwell Publishing, Hoboken. – NJ, 2006. – P. 138–146.

Evans R., Stringer S., Kibblewhite R.P. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees // Appita Journal. -2000. - Vol. 53. - No 5. - P. 450–457.

Falster D.S., Duursma R.A., Ishihara M.I., Barneche D.R., FitzJohn R.G., Vårhammar A., Aiba M., Ando M., Anten N., Aspinwall M.J., Baltzer J.L., Baraloto C., Battaglia M., Battles J.J., Bond-Lamberty B., van Breugel M., Camac J., Claveau Y., Coll L., Dannoura M., Delagrange S., Domec J.-C., Fatemi F., Feng W., Gargaglione V., Goto Y., Hagihara A., Hall J.S., Hamilton S., Harja D., Hiura T., Holdaway R., Hutley L.S., Ichie T., Jokela E.J., Kantola A., Kelly J.W. G., Kenzo T., King D., Kloeppel B.D., Kohyama T., Komiyama A., Laclau J.-P., Lusk C.H., Maguire D.A., le Maire G., Mäkelä A., Markesteijn L., Marshall J., McCulloh K., Miyata I., Mokany K., Mori S., Myster R.W., Nagano M., Naidu S.L., Nouvellon Y., O'Grady A.P., O'Hara K.L., Ohtsuka T., Osada N., Osunkoya O.O., Peri P. L., Petritan A.M., Poorter L., Portsmuth A., Potvin C., Ransijn J., Reid D., Ribeiro S.C., Roberts S.D., Rodríguez R., Saldaña-Acosta A., Santa-Regina I., Sasa K., Selaya N.G., Sillett S.C., Sterck F., Takagi K., Tange T., Tanouchi H., Tissue D., Umehara T., Utsugi H., Vadeboncoeur M.A., Valladares F.,

Vanninen P., Wang J.R., Wenk E., Williams R., Ximenes F. de Aquino, Yamaba A., Yamada T., Yamakura T., Yanai R.D., York R.A. BAAD: a biomass and allometry database for woody plants // Ecology. -2015. - Vol. 96. - No 25. - P. 25.

Fayolle A., Doucet J., Gillet J.-F., Bourland N., Lejeune P. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks // Forest Ecology and Management. – 2013. – Vol. 305. – P. 29-37.

Fearnside P.M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia // Forest Ecology and Management. -1997. - Vol. 90. - No. 1. - P. 59-87.

Ferm A. Birch production and utilization for energy // Biomass and Bioenergy. – 1993. – Vol. 4. – P. 391–404.

Fimbel R.A., Sjaastad E.O. Wood specific gravity variability in *Ceiba* pentandra // Woodand Fiber Science. -1994. - Vol. 26. - No 1. - P. 91–96.

Franceschini T., Longuetaud F., Bontemps J.-D., Bouriaud O., Caritey B.-D., Leban J.-M. Effect of ring width, cambial age, and climatic variables on the within-ring wood density profile of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. // Trees. – 2013. – Vol. 27. – P. 913–925.

Fukatsu E., Tamura A., Takahashi M., Fukuda Y., Nakada R., Kubota M., Kurinobu S. Efficiency of the indirect selection and the evaluation of the genotype by environment interaction using Pilodyn for the genetic improvement of wood density in *Cryptomeria japonica* // Journal of Forestry Research. – 2011. – Vol. 16. – P. 128–135.

Fundová 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.

Fürst Ch., Bitter A.W., Eisenhauer D.-R., Makeschin F., Röhle H., Roloff A., Wagner S. Sustainable methods and ecological processes of a conversion of pure Norway spruce and Scots pine stands into ecologically adapted mixed stands // Contribution to Forest Sciences Tharandt. -2004. - No. 20. - P. 244.

Gal J., Bella I.E. New stem taper functions for 12 Saskatchewan timber species. Canadian Forest Service, Northwest Region. – Information report \mathbb{N}_2 -X-338, 1994. – 33 p.

Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R., Jonsson M., Gustafsson L., Kjellander P., Ruiz-Jaen M.C., Fröberg M., Stendahl J., Philipson C.D., Mikusinski G., Andersson E., Westerlund B., Andren H., Moberg F., Moen J.,

Bengtsson J. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species // Nature Communications. – 2013. – Vol. 4. – P. 13–40.

Gardiner B., Leban J.-M., Auty D., Simpson H. Models for predicting wood density of British-grown Sitka spruce // Forestry. -2011. - Vol. 84. - N_{2} 2. - P. 119-132.

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

Gerendiain A.Z., Peltola H., Pulkkinen P., Ikonen V.-P., Jaatinen R. Differences in growth and wood properties between narrow and normal crowned types of Norway spruce grown at narrow spacing in Southern Finland // Silva Fennica. -2008. - Vol. 42. - No 2. - P. 423–437.

Gevorkiantz S.R. Measuring stand normality // Journal of Forestry. – 1944. – Vol. 42. – P. 503–508.

Gevorkiantz S.R., Hosley N.W. Form and development of white pine stands in relation to growing space // Harvard University Forestry Bulletin. – 1929. – Vol. 13. – P. 1–83.

Gjerdrum P., Eikenes B. A model for spatial wood density gradients in Norway spruce stems and stochastic between-stem dissimilarities for basic and dry density // Wood Science and Technology. – 2014. – Vol. 48. – P. 71–84.

Giagli K., Vavrčík H., Fajstavr M., Černý J., Novosadová K., Martiník A. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region // Wood Research. -2019. - Vol. 64. - No 6. - P. 1011-1022.

Gil L., Tadesse W., Tolosana E., López R. *Eucalyptus* species management, history, status and trends in Ethiopia // Proceedings from the Congress held in Addis Ababa, September, 15th–17th, 2010. – P. 335–350.

Gill R.A., Jackson R.B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems // The New Phytologist. – 2000. – Vol. 147. – P. 13–31.

Gillwald W. Der Ökonomische Nutzen des Dünnholzeinsatzen für die Forst- und Holzwirtschaft der DDR // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. – 1967. – Vol. 16. – № 2. – P. 505–507.

Gilmore A.R., Metcalf G.E., Boggess W.R. Specific gravity of shortleaf pine and loblolly pine in southern Illinois // Journal of Forestry. – 1961. – Vol. 59. – P. 894–896.

Giroud G., Bégin J., Defo M., Ung, C.H. Ecogeographic variation in black spruce wood properties across Quebec's boreal forest // Forest Ecology and Management. – 2016. – Vol. 378. – P. 131–143.

Giroud G., Bégin J., Defo M., Ung C.H. Regional variation in wood density and modulus of elasticity of Quebec's main boreal tree species // Forest Ecology and Management. – 2017. – Vol. 400. – P. 289–299.

Giroud G., Schneider R., Fournier R.A., Luther J.E., Martin-Ducup O. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning // Canadian Journal of Forest Research. $-2019. - \text{Vol.} 49. - \text{N}_{2} 6. - \text{P.} 661-669.$

Glass S.V., Zelinka S.L. Moisture relations and physical properties of wood // 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. 4.1-4.19.

Goodison A., Sherson G., Huntley S., Kerekes D. EvaluTree – a new resource for the pulp and paper industry in Canada // Pulp and Paper Canada. – 2007. – Vol. 108. – \cancel{N} 5. – P. 18–20.

Götze H. Untersuchungen über die Festigkeitseigenschaften von Grubenrundholz der Holzarten Fichte und Kiefer // Archiv für Forstwesen. – $1961. - \text{Vol. } 10. - \text{N}\underline{\circ} 4-6. - \text{P. } 557.$

Götze H. Über die Lagerung des Spannplattenholzes auf Freiplätzen im Hinblick auf eine gezielte Austrocknung // Holztechnologie. − 1965. − Vol. 6. − № 1. − P. 17–23.

Götze H. Über die Gesetzmä igkeit der Raumdichteverteilung bei Kiefern Jungbeständen // International Symposium Eberswalde, Rohdichte von Holz und Holzwerkstoffen, 1966. – P. 127-147.

Götze H. Untersuchungen zum physikalisch-technischen Eigenschaftsbild dünner Durchforstunghölzer der Baumarten Kiefer und Fichte // Archiv für Forstwesen. − 1969. − Vol. 18. − № 9−10. − P. 12−34.

Götze H., Zenker R. Ausführlicher Abschlu bericht der Forschungsarbeit: "Untersuchung der physikalisch-technischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Wuchsbedingungen und Standort". Institute Eberswalde, Bereich Rohholzforschung und Holzschutz, 1965. – Plan – Nr. 3680 0115-42 1/4.

Götze H., Günther B., Luthard H., Schulze-Dewitz G. Eigenschaften und Verwertung des Astholzen von Kiefer (*Pinus silvestris* L.) und Rotbuche (*Fagus silvatica*): 2. Mitteilung // Holztechnologie. – 1972. – Vol. 13. – No. 1. – P. 20–27.

Gougeon F.A. Towards semi-automated forest inventories using individual tree crown (ITC) recognition. Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC: Natural Resources Canada. − Technology Transfer Note № 22, 2000. − 6 p.

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

Gray H.R. The form and taper of forest-tree stems // University of Oxford, Imperial Forestry Institute. – Institute paper № 32, 1956. – P. 1-82.

Grime J.P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory // American Naturalist. – 1977. – Vol. 111. – P. 1169–1194.

Groenestijn J., Harmsen P., Bos H. Biomass for the circular economy. Everything you wanted to know about biomass but were afraid to ask. – Wageningen Food & Biobased Research, Commissioned by TKI-BBE, Netherlands, 2020. – 100 p.

Groot A., Cortini F., Wulder M.A. Crown-fibre attribute relationships for enhanced forest inventory: Progress and prospects // Forestry Chronicle. – 2015. – Vol. 91. – P. 266–279.

Groot A., Luther J.E. Hierarchical analysis of black spruce and balsam fir wood density in Newfoundland // Canadian Journal of Forest Research. $-2015. - \text{Vol.} 45. - \text{N}_{2} 7. - \text{P.} 805-816.$

Groot A., Cortini F. The effect of the interaction of tree slenderness and relative height with ring width on wood density in *Abies balsamea* and *Picea glauca* // Wood Science and Technology. – 2017. – Vol. 51. – P. 175–194.

Gryc V., Horáček P., Šezingerová J., Vavrcik H. Basic density of spruce wood, wood with bark, and bark of branches in locations in the Czech Republic // Wood Research. – 2011. – Vol. 56. – № 1. – P. 23–32.

Gurau L., Cionca M., Mansfield-Williams H., Sawyer G., Zeleniuc O. Comparison of the mechanical properties of branch and stem wood for three species // Wood and Fiber Science. -2008. - Vol. 40. - No 4. - P. 647–656.

Guttenberg A.R., Müller J. Holzme kunde // A. R. Guttenberg (ed.). Handbuch der Forstwissenschaft. 4th ed. – Vol. 3. – Tübingen, Gemany: Verlag der H. Laupp'schen Buchhandlung, 1927. – P. 75–230.

Hagberg N. Stamforms för andringar hos tall och gran under beståndsut-vecklingen och efter friställning // Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift. – 1942. – Vol. 40. – P. 1–46.

- Hakkila P. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood // Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. $-1966. \text{Vol.} 61. \text{N}_{2} 5. \text{P.} 1-98.$
- Hakkila P. Coniferous branches as a raw material source. A subproject of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues // Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. 1972. Vol. 75. P. 1–60.
- Hakkila P. Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland [*Pinus sylvestris, Picea abies, Betula pendula, Betula pubescens*] // Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. -1979. Vol. 96. No 3. 59 p.
- Hale J.D., Perem E., Clermont L.P. Importance of compression wood and tension wood in appraising wood quality. Forest Products Research Branch, Canadian Forestry Service, Ottawa, ON. Report 0–186, 1961. 23 p.
- Hapla F. Radiographisch-densitometrische Holzeigenschaftsuntersuchungen an Douglasien aus unterschiedlich durchforsteten Versuchsflächen // Holz als Roh- und Werkstoff. 1985. Vol. 43. P. 9–15.
- Harris J.M. Wood quality: forest management and utilization // Walker J.C.F., Butterfield B.G., Harris J.M., Langrish T.A.G., Uprichard J.M. (eds.). Primary wood processing: principles and practice. Springer, 1993. P. 560–583.
- Hartig R. Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Pflanzen. Berlin, Germany: J. Springer, 1891. 336 p.
- Hartig R. Über den Wuchs der Fichtenbestände des Forstenrieder und Ebersberger Parkes bei München // Forstliche-naturwissenschafliche Zeitschrift. 1892a. Vol. 1. P. 129–140.
- Hartig R. Über den Einfluss den Enwicklungsgang der Fichte im geschlossen Bestände nach Höhe, Form und Inhalt // Forstlichenaturwissenschafliche Zeitschrift. 1892b. Vol. 1. P. 169–185.
- Hartig R. Die Verschiedenheiten in der Qualität und im anatomischen Bau des Fichtenholzes // Forstliche-naturwissenschaftliche Zeitschrift. 1892c. Vol. 1. P. 209–233.
- Hartig R. Über den Drehwuchs der Kiefer // Forstlichenaturwissenschafliche Zeitschrift. 1895a. Vol. 4. P. 313–326.
- Hartig R. Untersuchungen des Baues und der technischen Eigenschaften des Eichenholzes // Forstlich-naturwissenschaftlichen Zeitschrift. − 1895b. № 4. P. 49–82.

Hartig R. Holzuntersuchungen. Altes und Neues. – Berlin, Germany: J. Springer, 1901. – 99 p.

Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber-dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*) // Canadian Journal of Forest Research. -2019. - Vol. 49. - No 200 5. - P. 200 509.

Hector A., Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality // Nature. – 2007. –Vol. 448. – P. 188–190.

Hein P.R.G., Clair B., Brancheriau L., Chaix G. Predicting microfibril angle in *Eucalyptus* wood from different wood faces and surface qualities using near infrared spectra // Journal of Near Infrared Spectroscopy. $-2010. - \text{Vol.} 18. - \text{N}_{2}6. - \text{P.} 455-464.$

Hein P.R.G., Lima J.T. Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in *Eucalyptus* wood // Maderas: Ciencia y tecnología. -2012. - Vol. 14. - No 200 3. - P. 267-274.

Henry M., Besnard A., Asante W. A., Eshun J., Adu-Bredu S., Valentini R., Bernoux M., Saint-André L. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa // Forest Ecology and Management. – 2010. – Vol. 260. – P. 1375–1388.

Henry M., Bombelli A., Trotta C., Alessandrini A., Birigazzi L., Sola G., Vieilledent G., Santenoise P., Longuetaud F., Valentini R., Picard N, Saint-André L. GlobAllomeTree: International platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment // iForest – Biogeosciences and Forestry. – 2013. – Vol. 6. – P. 326–330.

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.

Heräjärvi H., Junkkonen R. Wood density and growth rate of European and hybrid aspen in Southern Finland // Baltic Forestry. -2006. - Vol. 12. - No 1. - P. 2–8.

Hernandez R.E., Bustos C., Fortin Y., Beaulieu J. Wood machining properties of white spruce from plantation forests // Forest Products Journal. – 2001. – Vol. 51. – P. 82–88.

Hildebrandt G. Untersuchungen an Fichtenbeständen über Zuwachs und Ertrag reiner Holzsubstanz. Berlin, Germany: Deutsche Verlag Wissenschaften, 1954. – 133 p.

Hilf H.H. Die Verwertung schwachen Pappelholzes // Der Forst- und Holzwirt. – 1965. – Vol. 20. – № 1. – P. 1-8.

Hilker T., Frazer G.W., Coops N.C., Wulder M.A., Newnham G.J., Stewart J.D., van Leeuwen M., Culvenor D.S. Prediction of wood fiber attributes from LiDAR-derived forest canopy indicators // Forest Science. – 2013. – Vol. 59. – P. 231–242.

Hopkinson C., Chasmer L.E., Young-Pow C., Treitz P. Assessing forest metrics with a ground-based scanning LiDAR // Canadian Journal of Forest Research. – 2004. – Vol. 34. – P. 573–583.

Hopkinson C., Chasmer L.E. Modelling canopy gap fraction from Li-DAR intensity // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. -2007. - Vol. 36. - No 3. - P. 190–194.

Horáček, Fajstavr M., Stojanović M. The variability of wood density and compression strength of Norway spruce (*Picea abies /L./* Karst.) within the stem // Beskydy. -2017. - Vol. 10. - N 2 1-2. - P. 17-26.

Hori R., Müller M., Watanabe U., Lichtenegger H.C., Fratzl P., Sugiyama J. The importance of seasonal differences in the cellulose microfibril angle in softwoods in determining acoustic properties // Journal of Materials Science. – 2002. – Vol. 37. – P. 4279–4284.

Howe J.P. Influence of irrigation on ponderosa pine // Forest Products Journal. – 1968. – Vol. 18. – P. 84–93.

Howe J.P. Effect of irrigation on wood formed at various heights in ponderosa pine // Wood Science. – 1970. – Vol. 3. – P. 126–128.

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

Howell R.A., Leach G.N., Nutter D.E., Steltenkamp M.S. Some age associated trends of planted slash pine as related to kraft pulping // Proceedings of the Symposium on Utilization of the Changing Wood Source in the Southern United States, North Carolina, 1984. – P. 243-260.

Hsu E.W. Wood quality requirements for panel products // Zhang S. Y., Gosselin R., Chauret G. (eds.). Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value // Proceedings of the ATIA/IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec City, Part I, 1997. — P. 7–10.

Hsu C.Y. Radiata pine wood anatomy structure and biophysical properties. – PhD Thesis. – University of Canterbury, 2003. – 147 p.

Hsu J.K., Walters L.S. Effect of irrigation and fertilization on selected physical and mechanical properties of loblolly pine (*Pinus taeda*) // Wood Fiber. – 1975. – Vol. 7. – P. 192–206.

Huang T.C., Liu Y.J. The effect of growth and development on the timber quality of fast-grown *Pinus koraiensis* grown in Tsaohokow (Liaoning Prov., NE China) // Forest Science (Peking). – 1959. – Vol. 6. – P. 489–496.

Huang H., Gong P., Cheng X., Clinton N., Cao C., Ni W., Li Z., Wang L. Forest structural parameter extraction using terrestrial LiDAR // Proceedings of SilviLaser 2009: 9th international conference on LiDAR applications for assessing forest ecosystems, Texas A&M University, Austin, TX, October 14-16, 2009. – P. 1-10.

Huber B. Die physiologische Leistungsfähigkeit des Wasserleitungssystems der Pflanze // Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft. – 1925. – Vol. 43. – P. 410-418.

Hummel F.C., Palz W., Grassi G. Biomass forestry in Europe: main conclusions and proposals // Biomass forestry in Europe: A strategy for the future. – London, New York, Elsevier Applied Science, 1988. – P. 1–4.

Hynynen J. Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stands // Canadian Journal of Forest Research. — 1995. — Vol. 25. — P. 57—62.

Hyyppä J., Hyyppä H., Litkey P., Yu X., Haggrén H., Rönnholm P., Pyysalo U., Pitkänen J., Maltamo M. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2004. – Vol. 36. – P. 82–89.

Iida Y., Poorter L., Sterck F.J., Kassim A.R., Kubo T., Potts M.D., Kohyama T.S. Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species // Functional Ecology. – 2012. – Vol. 26. – P. 274–282.

Ilic J., Boland D., McDonald M., Downes G., Blakemore P. Wood density. Phase 1: State of knowledge, national carbon accounting system. − Australian Greenhouse Office, Commonwealth of Australia. Technical Report № 18, 2000. − 228 p.

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

- Ivkovich M., Namkoong G., Koshy M. Genetic variation in wood properties of interior spruce. II. Tracheid characteristics // Canadian Journal of Forest Research. 2002b. Vol. 32. № 12. P. 2128–2139.
- Jaakkola T., Mäkinen H., Saranpää P. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age // Canadian Journal of Forest Research. -2005. Vol. 35. No 20. P. 1767–1778.
- Jaccard P. Eine neue Auffa ung über die Ursachen des Dickenwachstums der Bäume // Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft. − 1913. − Vol. 11. − № 5−6. −P. 241−279.
- Jaccard P. Neue Untersuchungen über die Ursachen des Dickenwachstums der Bäume // Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft. − 1915. − Vol. 13. − № 8-9. − P. 321–360.
- Jacob W., Wallmüller H.P. Die Verarbeitung von Dünnholz in der Faserplattenindustrie // Holzindustrie. 1967. Vol. 20. № 1. P. 7–10.
- Jacobs, S.M., Drew, D.M. Using tree physiology to better understand the effect of environmental factors on wood fibre properties // TAPPSA International Convention Center, Durban, ZA, 2002. 100 p.
- Janka G. Untersuchungen über die Elasticität und Festigkeit der österreichischen Bauhölzer. II. Fichte von Nordtirol, vom Wienerwalde und Erzgebirge // Mitteilungen aus dem forstlichen Versuchswesen Österreichs. 1904. Vol. 28. 313 p.
- Jati S.R., Fearnside P.M., Barbosa R.I. Densidade da madeira de árvores em savanas do norte da Amazônia brasileira (Wood density of trees in savannas of the northern Brazilian Amazon) // Acta Amazonica. -2014. Vol. 44. No 1. P. 79 86.
- Jelonek T., Tomczak A., Karaszewski Z., Jakubowski M., Arasimowicz-Jelonek M., Grzywinski W., Kopaczyk J., Klimek K. The biomechanical formation of trees // Drewno. -2019. Vol. 62. No 204. P. 1-18.
- Jessome A.P. Strength and related properties of woods grown in Canada // Environment Canada, Eastern Forest Products Laboratory, Forestry Technical Report N_2 21, 1977. 37 p.
- Johansson D. Über Früh- und Spatholz in schwedischer Fichte und Kiefer und über ihren Einflu auf die Eigenschaften von Sulfit- und Sulfatzellstoff // Holz als Roh- und Werkstoff. 1940. Vol. 3. P. 73-78.
- Johansson K. Influence of initial spacing and tree class on the basic density of *Picea abies* // Scandinavian Journal of Forest Research. 1993. Vol. 8. P. 18–27.
- Johansson T. Mixed stands in Nordic countries—a challenge for the future // Biomass and Bioenergy. 2003. Vol. 24. No. 4–5. P. 365–372.

Johansson T. Biomass production of hybrid aspen growing on former farm land in Sweden // Journal of Forestry Research. -2013. - Vol. 24. - N_{2} 2. - P. 237–246.

Jonson T. Stamformsproblemet // Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt. – 1927. – Vol. 23. – P. 495–586.

Joranson P.N. Pulpwood properties: response of processing and of paper quality to their variation // TAPPI. – 1960. – Vol. 43. – P. 40–64.

Jozsa L.A., Middleton G.R. A discussion of wood quality attributes and their practical implications // Forintek Canada Corporation, Vancouver, B.C. Special Publication N SP-34, 1994. – 42 p.

Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F., Dalponte M., van Ewijk K.Y., Forrester D.I., Heani M., Higgins S.I., Holdaway R.J., Iida Y., Lorimer C., Marshall P.M., Momo S., Moncrieff G.R., Ploton P., Poorter L., Rahman K.A., Schlund M., Sonké B., Sterck F.J., Trugman A.T., Usoltsev V.A., Vanderwel M.C., Waldner P., Wedeux B., Wirth C., Wöll H., Woods M., Xiang W., Zimmermann N., Coomes D.A. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes // Global Change Biology. – 2017. – Vol. 23. – P. 177–190.

Jülich L., Morgenroth H., Blo ☐ feld O. Gewinnung, Transport und Aufbereitung von Dünnholz // Fortschrittsberichte für die Landwirtschaft, 1966. –Vol. 13. – P. 1–72.

Jyske T., Mäkinen H., Saranpää P. Wood density within Norway spruce stems // Silva Fennica. 2008. Vol. 42. No. 3. P. 439–455.

Kane V.R., McGaughey R.J., Bakker J.D., Gersonde R.F., Lutz J.A., Franklin J.F. Comparisons between field and LiDAR-based measures of stand structural complexity // Canadian Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 761–773.

Kantola A., Mäkelä A. Crown development in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] // Trees. – 2004. – Vol. 18. – P. 408–421.

Kato A., Moskal K., Schiess L.M., Swanson P., Calhoun M.E., Stuetzle W. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne LiDAR data // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113. – P. 1148–1162.

Kattge J., Bönisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P. et al. TRY plant trait database – Enhanced coverage and open access // Global Change Biology. – 2020. – Vol. 26. – P. 119–188.

Keduolhouvonuo, Kumar H. Variation in wood specific gravity of selected tree species of Kohima district of Nagaland North Eastern parts of

India // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. -2017. - Vol. 6. - N_{\odot} 6. - P. 70-74.

Keith C.T. Resin content of red pine wood and its effect on specific gravity determinations // The Forestry Chronicle. -1969. - Vol. 45. - No. 5. - P. 338-343.

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

Kellomäki S., Strandman H., Nuutinen T., Peltola H., Korhonen K.T., Väisänen H. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change // FINADAPT Working Paper 4. – Finnish environmental Institute Mimeographs 334. – Helsinki, 2005. – 44 p.

Kelsey K.E. The shrinkage intersection point – its significance and the methods of its determination // Forest Products Journal. – 1956. – Vol. 6. – N_2 10. – P. 411-417.

Kennedy E.I., Jessome A.P., Petro F.J. Specific gravity survey of eastern Canadian woods. – Canada, Department of Forestry and Rural Development. – Departmental publication N_2 1221, 1968. – 40 p.

Kiaei M., Bakhshi R., Saffari M., Golkari S. The within-tree variation in wood density and mechanical properties and their relationship in *Juniperus* polycarpos // Journal of Forest and Environmental Science. − 2015. − Vol. 31. − № 4. − P. 267–271.

Killki P., Varmola M. Taper curve models for Scots pine and their applications // Acta Forestalia Fennica. – 1981. – Vol. 174. – P. 1–60.

Kilpeläinen A., Alam A., Torssonen P., Ruusuvuori H., Kellomäki S., Peltola H. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilization from final felling of Norway spruce // Biomass and Bioenergy. – 2016. – Vol. 87. – P. 1–8.

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

Kirkkainen M. Effect of tree social status on basic density of Norway spruce // Silva Fennica. – 1984. – Vol. 18. – N_2 2. – P. 115–120.

Klem G. Undersökelser av granvirkets kvalitet // Meddelelser fra Det norske Skogforsøksvesen. – 1934. – Vol. 5. – № 2. – P. 197–348.

Klem G. Planteavstandens inflytelse på granvedens og sulfitcellulosens kvalitet // Meddelelser fra Det norske Skogforsøksvesen. – 1942. – Vol. 28. – P. 257–293.

- Klem G., Loschbrandat F., Bade O. Undersökelser av granvirke i forbindelse med slipe-og sulfit kokeforsøk // Meddelelser fra Det norske Skogforsøksvesen. 1945. Vol. 31. P. l–127.
- Klem G. Variations in the specific gravity of foreign softwood species and Norway spruce from South and West Norway Text // Meddelelser fra Det norske Skogforsøksvesen. 1965. Vol. 20. P. 137–169.
- Knapic S., Grahn T., Lundqvist S.-O., Pereira H. Juvenile wood characterization of *Eucalyptus botryoides* and *E. maculata* by using SilviScan // BioResources. -2018. Vol. 13. No. 2. -P. 2342-2355.
- Koga S., Tsutsumi J., Oda K., Fujimoto T. Effects of thinning on basic density and tracheid length of karamatsu (*Larix leptolepis*) // Mokuzai Gakkaishi. 1996. Vol. 42. P. 605–611.
- Kollmann F.F.P., Cote W.A. Principles of wood science and technology. Berlin, Heidelberg, New York. Springer-Verlag, 1968. 592 p.
- Konôpka B., Pajtík J., Šeben V., Surový P., Merganicová K. Biomass allocation into woody parts and foliage in young common aspen (*Populus tremula* L.) Trees and a stand-level study in the Western Carpathians // Forests. 2020. Vol. 11. P. 464.
- Körner C. An introduction to the functional diversity of temperate forest trees // Scherer-Lorenzen M., Körner C., Schulze E.D. (Eds.). Forest diversity and function. Ecological studies. Vol. 176. Springer, Heidelberg, 2005. P. 13–37.
- Kramer H. Kronenaufbau und Kronenentwicklung gleichalter Fichtenpflanzbestände // Allgemeine Forst-und Jagdzeitung. 1962. Vol. 11. –P. 249–256.
- Kramer H. Crown development in conifer stands in Scotland as influenced by initial spacing and subsequent thinning treatment // Forestry. $1966. \text{Vol.} 39. \text{N}_{2} 1. \text{P.} 40-58.$
- Kramer P.J., Kozlowski T.T. Physiology of woody plants. New York, San Francisco, London: Academic Press, 1979. 811 p.
- Krause C., Rossi S., Thibeault-Martel M., Plourde P.-Y. Relationships of climate and cell features in stems and roots of black spruce and balsam fir // Annals of Forest Science. 2010. –Vol. 67. P. 402.
- Kraxner F., Nordström E.-M., Havlik P., Gusti M. et al. Global bioenergy scenarios Future forest development, land-use implications, and trade-off // Biomass and Bioenergy. 2013. Vol. 57. N 10. P. 86–96.
- Krisnawati H. A compatible estimation model of stem volume and taper for *Acacia mangium* Willd. plantations // Indonesian Journal of Forestry Research. -2016. -Vol. 3. -No 1. -P. 49-64.

Kučera B. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce // Wood Fiber Science. — 1994. — Vol. 26. — No. 1. — P. 152—167.

Kühn I., Durka W., Klotz S. BiolFlor — a new plant-trait database as a tool for plant invasion ecology // Diversity and Distributions. -2004. – Vol. 10. – P. 363–365.

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

Kuprevicius A.P. Quantifying the influence of crown size on mechanical wood properties in white spruce (*Picea glauca*). – Master's Thesis. University of Toronto, Faculty of Forestry, 2011. – 65 p.

Kyrkjeeide P.A. A wood quality study of suppressed, intermediate and dominant trees of plantation grown *Picea abies*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1990. – 145 p.

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

Lachenbruch B., Johnson R., Downes G.M., Evans R. Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir // Canadian Journal of Forest Research. -2010. - Vol. 40. - N 2 1. - P. 55-64.

Lachenbruch B., Moore J., Evans R. Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence // Size- and age-related changes in tree structure and function. F.C. Meinzer, B. Lachenbruch, T.E. Dawson (eds.). – Springer, Netherlands, 2011. – P. 121–164.

Lafarge T., Pateiro-Lopez B. R package "Alphashape3d". Implementation of the 3D alpha-shape for the reconstruction of 3D sets from a point cloud, 2017. — Available from https://cran.r-project.org/web/packages/ alphashape3d/alphashape3d.pdf accessed 2018-08-07.

Lamara M., Raherison E., Lenz P., Beaulieu J., Bousquet J., MacKay J. Genetic architecture of wood properties based on association analysis and co expression networks in white spruce // New Phytologist. -2016. - Vol. 210. - No 210. - P. 240–255.

Laney D. 3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity, and Variety // Application Delivery Strategies. – META Group Inc., 2001. – P. 1–3

Электронный архив УГЛТУ

Langsaeter A. Om tynning i ensaldret gran- og furuskog // Meddelelser fra Det norske Skogforsøksvesen. – 1941. – Vol. 27. – P. 130–216.

Larocque G.R. Wood relative density development in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) stands // C.-H. Ung (ed.). Proc. Intern. Workshop "Forest growth models and their uses", November 18–19, 1993. – Québec City. Nat. Can. Res., Canadian Forest Service, 1993. – P. 287.

Larocque G.R., Marshall P.L. Wood relative density development in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) as affected by different initial spacings // Forest Science. – 1995. – Vol. 41. – P. 709–728.

Larson P.R. Auxin gradients and the regulation of cambial activity / T.T. Kozlowski (ed.) // Tree growth. – New York, NY: Ronald Press, 1962. – P. 97–117.

Larson P.R. Stem form development of forest trees // Forest Science Monograph. – 1963. – Vol. 5. – P. 1–42.

Larson P.R. Wood formation and the concept of wood quality. − Yale University, School of Forestry. − Bulletin № 74, 1969. − 54 p.

Lasserre J.-P., Mason E.G., Watt M.S., Moore J.R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood // Forest Ecology and Management. − 2009. − Vol. 258. − № 9. − P. 1924–1931.

Lawton R.O. Ecological constraints on wood density in a tropical montane rain forest // American Journal of Botany. -1984. - Vol. 71. - N_{2} 2. - P. 261–267.

Lecigne B., Delagrange S., Messier C. R package "VoxR". Metrics extraction of trees from T-LiDAR data, 2015. – Available from https://cran.r-project.org/web/packages/VoxR/VoxR.pdf accessed 2018-08-07.

Leckie D., Gougeon F., Hill D., Quinn R., Armstrong L., Shreenan R. Combined high-density LiDAR and multispectral imagery for individual tree crown analysis // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2003. – Vol. 29. – P. 633–649.

Leibundgut H. Vom Holzackerbau zum naturnähnen Waldbau // Österreichische Forstzeitung. − 1987. − № 4. − P. 10−11.

Lenz P., Cloutier A., MacKay J., Beaulieu J. Genetic control of wood properties in *Picea glauca*—an analysis of trends with cambial age // Canadian Journal of Forest Research. -2010. - Vol. 40. - No 20. - No 20. - No 20.

Lenz P., Bernier-Cardou M., MacKay J., Beaulieu J. Can wood properties be predicted from the morphological traits of a tree? A canonical cor-

- relation study of plantation-grown white spruce // Canadian Journal of Forest Research. $-2012. \text{Vol.} 42. \text{N}_{2} 8. \text{P.} 1518-1529.$
- Lenz P., Deslauriers M., Ung C.-H., MacKay J., Beaulieu J. What do ecological regions tell us about wood quality? A case study in eastern Canadian white spruce // Canadian Journal of Forest Research. 2014. Vol. 44. No. 11. P. 1383–1393.
- Lessard E., Fournier R.A., Luther J.E., Mazerolle M.J., van Lier O.R. Modeling wood fiber attributes using forest inventory and environmental data for Newfoundland's boreal forest // Forest Ecology and Management. 2014. Vol. 313. P. 307–318.
- Levkoev E., Kilpeläinen A., Luostarinen K., Pulkkinen P., Mehtätalo L., Ikonen V.-P., Jaatinen R., Zhigunov A., Kangas J., Peltola H. Differences in growth and wood density in clones and provenance hybrid clones of Norway spruce // Canadian Journal of Forest Research. -2017. Vol. 47. No 2. P. 389-399.
- Li R., Weiskittel A. Development and evaluation of regional taper and volume equations for the primary conifer species in the Acadian Region // Annals of Forest Science. 2010. Vol. 67. –P. 302.
- Li R., Weiskittel A. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling approach: Comparison of model forms and subsampling strategies // European Journal of Forest Research. -2011. Vol. 130. No. 2. P. 219-233.
- Li B., Li H., Zha Q., Bandekar R., Alsaggaf A., Ni Y. Review: effects of wood quality and refining process on TMP pulp and paper quality // BioResources. -2011. Vol. 6. N 2 3. P. 3569-3584.
- Li C. Toward full, multiple, and optimal wood fibre utilization: a modeling perspective // Forestry Chronicle. -2009. Vol. 85. № 3. P. 377–381.
- Li P., Beaulieu J., Bousquet J. Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (*Picea glauca*) // Canadian Journal of Forest Research. -1997. Vol. 27. N 2. P. 189-198.
- Li R., Weiskittel A., Dick A.R., Kershaw J.A.Jr., Seymour R.S. Regional stem taper equations for eleven conifer species in the Acadian region of North America: Development and assessment // Northern Journal of Applied Forestry. -2012. Vol. 29. No 1. P. 5-14.
- Liang J., Crowther T.W., Picard N., Wiser S., Zhou M., Alberti G., Schulze E.-D., McGuire A.D., Bozzato F., Pretzsch H., de-Miguel S., Paquette A., Hérault B., Scherer-Lorenzen M., Barrett C.B., Glick H.B.,

Hengeveld G.M., Nabuurs G.-J., Pfautsch S., Viana H., Vibrans A.C., Ammer C., Schall P., Verbyla D., Tchebakova N.M., Fischer M., Watson J.V., Chen H.Y.H., Lei X., Schelhaas M.-J., Lu H., Gianelle D., Parfenova E.I., Salas C., Lee E., Lee B., Kim H.S., Bruelheide H., Coomes D.A., Piotto D., Sunderland T., Schmid B., Gourlet-Fleury S., Sonké B., Tavani R., Zhu J., Brandl S., Vayreda J., Kitahara F., Searle E.B., Neldner V.J., Ngugi M.R., Baraloto C., Frizzera L., Bałazy R., Oleksyn J., Zawiła-Niedźwiecki T., Bouriaud O., Bussotti F., Finér L., Jaroszewicz B., Jucker T., Valladares F., Jagodzinski A.M., Peri P.L., Gonmadje C., Marthy W., O'Brien T., Martin E.H., Marshall A.R., Rovero F., Bitariho R., Niklaus P.A., Alvarez-Loayza P., Chamuya N., Valencia R., Mortier F., Wortel V., Engone-Obiang N.L., Ferreira L.V., Odeke D.E., Vasquez R.M., Lewis S.L., Reich P.B. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests // Science. — 2016. — Vol. 354. — № 6309. — P. 196–208.

Liepiņš J., Liepiņš K. Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia // Research for Rural Development. – 2015. – Vol. 2. – P. 22–28.

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

Liepiņš K., Rieksts-Riekstiņš J. Stemwood density of juvenile silver birch trees (*Betula pendula* Roth.) from plantations on former farmlands // Baltic Forestry. – 2013. – Vol. 19. – P. 179-186.

Lindberg E., Holmgren J., Olofsson K., Olsson H. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning // European Journal of Forest Research. -2012. - Vol. 131. - № 6. - P. 1917-1931.

Lindström H. Basic density in Norway spruce. Part I. A literature review // Wood and Fiber Science. – 1996a. – Vol. 28. – № 1. – P. 15–27.

Lindström H. Basic density in Norway spruce. Part II. Predicted by stem taper, mean growth ring width, and factors related to crown development // Wood and Fiber Science. – 1996b. – Vol. 28. – № 2. – P. 240-251.

Lindström H. Basic density in Norway spruce. Part III. Development from pith outwards // Wood and Fiber Science. -1996c. - Vol. 28. - No. 4. - P. 391-401.

Lindström H. Fiber length, tracheid diameter, and latewood percentage in Norway spruce: development from pith outwards // Wood Fiber Science. – 1997. – Vol. 29. – P. 21–34.

Lindström H. Intra-tree models of basic density in Norway spruce as an input to simulation software // Silva Fennica. -2000. - Vol. 34. - No 4. - P. 411–421.

Liu S.Y., Liang C.L., Li. L. Studies on the physicochemical properties of the tubers of new sweet potato lines // Journal of Agricultural Research of China. – 1985. – Vol. 34. – P. 21–32.

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

Lokers R., Knapen R., Janssen S., van Randen Y., Jansen J. Analysis of big data technologies for use in agro-environmental science // Environmental Modelling and Software. – 2016. – Vol. 84. – P. 494–504.

Lokmal N., Mohd Noor A.G. Variation of specific gravity in *Acacia mangium* // Journal Agrotechnology. – 2010. – Vol. 1. – P. 69–78.

Longuetaud F., Seifert Th., Leban J.M., Pretzsch H. Analysis of long-term dynamics of crowns of sessile oaks at the stand level by means of spatial statistics // Forest Ecology and Management. – 2008. – Vol. 255. – P. 2007–2019.

Louzada J.L.P.C. Genetic correlations between wood density components in *Pinus pinaster* Ait. // Annals of Forest Science. – 2003. – Vol. 60. – P. 285–294.

Love-Myers K.R., Clark A., Schimleck L.R., Dougherty P.M., Daniels R.F. The Effects of irrigation and fertilization on specific gravity of loblolly pine // Forest Science. -2010. - Vol. 56. - No. 5. - P. 484-493.

Lundkvist K. Genetic structure in natural and cultivated forest tree populations // Silva Fennica. − 1982. − Vol. 16. № 2. − P. 141–149.

Luo Y., Zhang X., Wang X., Lu F. Biomass and its allocation of Chinese forest ecosystems // Ecology. – 2014. – Vol. 95. – P. 2026–2026.

Lupi C., Morin H., Deslauriers A., Rossi S. Xylogenesis in black spruce: does soil temperature matter? // Tree Physiology. — 2012. — Vol. 32. — P. 74—82.

Luther J.E., Skinner R., Fournier R.A., van Lier O.R., Bowers W.W., Coté J.-F., Hopkinson C., Moulton T. Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data // Forestry. – 2014. – Vol. 87. – P. 313–326.

Lutz J. How growth rate affects properties of softwood veneer // Forest Products Journal. – 1964. – Vol. 14. – P. 97–102.

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

MacKenzie J., Bruemmer G. Enhancing Canada's forest fibre // Forestry Chronicle. – 2009. – Vol. 85. – P. 353–354.

Madsen S.F. Overensstemmende stammeside- og vedmassefunktioner for fem forskellige nåletræarter // Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. – 1986. – Vol. 40. – P. 95–140 (in Danish).

Madsen S.F. Vedmassefunktioner ved forskellige aflægningsgrænser og nøjagtighedskrav for nogle vigtige danske skovtræarter // Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. – 1987. – Vol. 41. – P. 41–242 (in Danish).

Madsen T.L., Moltesen P., Olesen P.O. The influence of thinning degree on basic density, production of dry matter, branch thickness and number of branches of Norway spruce // Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. – 1978. – Vol. 36. – P. 183–203.

Madsen T.L., Moltesen P., Olesen P.O. Effect of fertilization on the basic density and production of dry matter in Norway spruce // Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. – 1985. – Vol. 40. - N = 2. - P. 143-171.

Maeglin R.R. Wisconsin wood density survey // USDA Forest Service. – Paper FPL 202, 1973. – 40 p.

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

Maguire D.A., Johnston S.R., Cahill J. Predicting branch diameters on second-growth Douglas-fir from tree-level descriptors // Canadian Journal of Forest Research. $-1999. - \text{Vol.}\ 29. - \text{N}_{2}\ 12. - \text{P.}\ 1829-1840.$

Maguire D.A., Kershaw J.A., Hann D.W. Predicting the effects of silvicultural regime on branch size and crown wood core in Douglas-fir // Forest Science. $-1991. - \text{Vol. } 37. - \text{N}_{2} 5. - \text{P. } 1409-1428.$

Maiti R., Rodriguez H.G., Kumari A. Wood density of ten native trees and shrubs and its possible relation with a few wood chemical compositions // American Journal of Plant Sciences. – 2016. – Vol. 7. – P. 1192–1197.

Mäkinen H., Saranpää P., Linder S. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // Holzforschung. – 2002. – Vol. 56. – № 5. – P. 449–460.

Mäkinen H., Hein S. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce // European Journal of Forest Research. – 2006. – Vol. 125. – P. 239–248.

Mäkinen H., Jaakkola T., Piispanen R., Saranpää P. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce // Forest Ecology and Management. − 2007. − Vol. 241. − № 1–3. − P. 175–188.

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

Mälkönen E. Effect of complete tree utilization on the nutrient reserves of forest soils // IUFRO Biomass Studies. S4.01, Mensuration, Growth and Yield. Working Party on the Mensuration of the Forest Biomass. College of Life Sciences and Agriculture, University of Maine at Orono, 1973. – P. 379–386.

Mansfield S.D., Parish R., Goudie J.W., Kang K.-Y., Ott P. The effects of crown ratio on the transition from juvenile to mature wood production in lodgepole pine in western Canada // Canadian Journal of Forest Research. – 2007. – Vol. 37. – P. 1450–1459.

Mansfield S.D., Parish R., Ott P., Hart J.F., Goudie J.W. Assessing the wood quality of interior spruce (*Picea glauca* \times P. *engelmannii*): variation in strength, relative density, microfibril angle, and fiber length // Holzforschung. – 2015. – Vol. 70. – \mathbb{N}_2 3. – P. 223–234.

Martin-Ducup O., Robert S., Fournier R.A. Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands // Forest Ecology and Management. – 2016. – Vol. 374. – P. 20–32.

Mattheck C. Trees - the mechanical design. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1991. – 121 p.

Matthews G. The carbon content of trees // Forestry Commission. Technical Paper 4. – Edinburgh, 1993. – 21 p.

Mazerolle M.J. Improving data analysis in herpetology: using Akaike's Information Criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses // Amphibia-Reptilia. – 2006. – Vol. 27. – P. 169–180.

McKenney D.W., Hutchinson M.F., Papadopol P., Lawrence K., Pedlar J., Campbell K., Milewska E., Hopkinson R.F., Price D., Owen T. Customized spatial climate models for North America // Bulletin of the American Meteorological Society. $-2011.-Vol.~92.-N cite{2}~12.-P.~1611-1622.$

McMahon T. Size and shape in biology // Science. -1973. - Vol. 179. - P. 1201–1204.

Metzger K. Der Wind als massgebender Faktor für das Wachsthum der Bäume // Mündener forstliche Hefte. – 1893. – Vol. 3. – P. 35–86.

Metzger K. Über das Konstruktions Prinzip des sekundären Holzkörpers // Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst-und Landwirtschaft. – 1908. – Vol. 6. – P. 249–273.

Metzger M.L. Qualitätseigenschaften des Holzes von Traubeneichen (*Quercus petrae* Liebl.) aus drei süddeutschen Beständen in Abhängigkeit

Электронный архив УГЛТУ

von der Jahrringbreite. Dissertation, Albert-Ludwig-Universität Freiburg // Schriftenreihe Agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse. – 1998. – Vol. 16. – 210 p.

Meylan B.A. Density variation within $C\bar{o}cos$ nucif $\bar{e}ra$ stems // New Zealand Journal of Forestry Science. – 1978. – Vol. 8. – No 3. – P. 369–383.

Miles P.D., Smith W.B. Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America. – USDA Forest Service. Northern Research Station. Research Note NRS-38, 2009. – 37 p.

Mitchell H.L. Wood quality evaluation from increment cores // TAPPI Journal. – 1958. – Vol. 41. – P. 150–156.

Mitchell H.L. A concept of intrinsic wood quality, and non-destructive methods for determining quality in standing timber. – Forest Products Laboratory, Wisconsin, United States. Report N 2233, 1961. – 24 p.

Moehring D.M., Grano C.X., Bassett J.R. Xylem development of loblolly pine during irrigation and simulated drought. USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station. Research Paper SO-110, 1975. – 9 pp.

Molteberg D., Hoibo O. Development and variation of wood density, kraft pulp yield and fibre dimension in young Norway spruce // Wood Science and Technology. – 2006. – Vol. 40. – P. 173–189.

Moltesen P., Madsen T.L., Olesen P.O. The influence of spacing on the production of dry matter and wood quality of Norway spruce // Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. – 1985. – Vol. 40. – P. 53–76.

Montagu K.D., Düttmer K., Barton C.V.M., Cowie A.L. Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration—an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites // Forest Ecology and Management. – 2005. – Vol. 204. – P. 113–127.

Mörling T., Valinger E. Effects of fertilization and thinning on heartwood area, sapwood area, and growth in Scots pine // Scandinavian Journal of Forest Research. -1999. - Vol. 14. - No. 5. - P. 462–469.

Morrow C.D., Gorman T.M., Evans J.W., Kretschmann D.E., Hatfield C.A. Prediction of wood quality in small-diameter Douglas-fir using site and stand characteristics // Wood and Fiber Science. -2013. - Vol. 5. - No 1. - P. 49–61.

Newnham R.M. Stem form and the variation of taper with age and thinning regime // Forestry. $-1965.-Vol.~38.-N_{\odot}~2.-P.~218-224.$

Nienstaedt H., Zasada J.C. *Picea glauca* (Moench) Voss, white spruce // Silvics of North America. R.M. Burns and B.H. Honkala (eds.). − USDA Forest Service, Handbook № 654, 1990. − P. 204–226.

Nogueira E.M., Nelson B.W., Fearnside P.M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil // Forest Ecology and Management. – 2005. – Vol. 208. – P. 261–286.

Nuutinen T., Kilpeläinen A., Hirvelä H., Härkönen K., Ikonen V.-P., Lempinen R., Peltola H., Wilhelmsson L., Kellomäki S. Future wood and fibre sources-case North Karelia in eastern Finland // Silva Fennica. – 2009. – Vol. 43. – P. 489–505.

Nybakk E., Lunnan A. Introduction to special issue on bioenergy markets // Biomass and Bioenergy. – 2013. – Vol. 57. – № 10. – P. 1-3

Nygård R., Elfving B. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso // Annals of Forest Science. – 2000. – Vol. 57. – P. 143–153.

Nylinder P. Influence of tree features and wood properties on basic density and buoyancy. I. Scots pine (*Pinus silvestris* L.) // Inst. – Virkeslära Skogshögskolan, Institutionen för virkeslära, Uppsats R 35, 1961. – P. 1–36.

Nymand-Andersen P. Big data: The hunt for timely insights and decision certainty // Irving Fisher Committee on Central Bank Statistics. − Bank for International Settlements. Working Papers №14, 2016. −23 p.

Olesen P.O. The interrelation between basic density and ring width of Norway spruce // Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. – 1976. – Vol. 34. – P. 340-359.

Olesen P.O. The variation of the basic density level and tracheid width within the juvenile and mature wood of Norway spruce // Forest Tree Improvement. -1977. - Vol. 12. - P. 1-21.

Olesen P.O. The effect of cyclophysis on tracheid width and basic density in Norway spruce // Forest Tree Improvement. – 1982. – Vol. 15. – 80 p.

Oliveira I.R., Chagas M.P., Bouillet J.-P., Longui E.L., de Lima I.L., Bordron B., Ferreira A.B., Filho M.T. Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil // Southern Forests: a Journal of Forest Science. − 2018. − Vol. 80. − № 4. − P. 311-318.

Omeis E. Untersuchungen des Wachstumsganges und der Holzbeschaffenheit eines 110-järigen Kiefernbestandes // Forstlichenaturwissenschafliche Zeitschrift. – 1895. – Vol. 4. – P. 117–170.

Ormerod D.W. The diameter-point method for tree taper description // Canadian Journal of Forest Research. – 1986. – Vol. 16. – P. 484–490.

Osika B., Woda C. Geringwertige Holzsortimente als Rohstoff für die Herstellung von Holzfaserplatten // Holztechnologie. – 1962. – Vol. 3. – № 2/3. – P. 99–105, 208–212.

Othmani A., Piboule A., Krebs M., Stolz C., Voon L.L.Y. Towards automated and operational forest inventories with T-Lidar // Proceedings of SilviLaser 2011. – 11th International Conference on LiDAR applications for assessing forest ecosystems, University of Tasmania, Hobart, Australia. October 16-20, 2011. – P. 465-473.

Packman D.F., Laidlaw R.A. Pulping of Britisch-grown softwoods. Part IV. A study of juvenile, mature and top wood in a large Sitka spruce tree // Holzforschung, 1967. – Vol. 21. – P. 38-45.

Panshin A.J., de Zeeuw C. Textbook of wood technology. Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4th edition. – McGraw-Hill Book Company, New York, 1980. – 722 p.

Park Y.-I.D., Spiecker H. Variations in the tree-ring structure of Norway spruce (*Picea abies*) under contrasting climates // Dendrochronologia. – 2005. – Vol. 23. – P. 93–104.

Parresol B.R. Biomass // Encyclopedia of Environmetrics. – Vol. 1. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. – P. 196–198.

Pechmann H.V., Schaite O. Die Auswirkung der waldbaulichen Behandlung auf die Holzeigenschaften der Fichte // Forstwissenschaftliches Centralblatt. – 1955. – Vol. 74. – P. 305–318.

Persson A. Wood and pulp of Norway spruce and Scots pine at various spacings // Swedish University of Agricultural Science. – Stockholm, Sweden. – Note 37, 1975. – P. 1–145.

Petrini S. Stamforms undersökningar // Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt. – 1921. – Vol. 18. – P. 165–220.

Petterson H. Studier över stamformen // Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt. – 1927. – Vol. 23. – P. 63–189.

Pinkard E.A., Neilsen W.A. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implicataions for thinning // Forest Ecology and Management. – 2001. – Vol. 172. – P. 215–227.

Pitt D., Pineau J. Forest inventory research at the Canadian Wood Fibre Centre: Notes from a research coordination workshop, June 3-4, 2009, Pointe Claire, QC // Forestry Chronicle. – 2009. – Vol. 85. – P. 859–869.

Plomion C., Leprovost G., Stokes A. Wood formation in trees // Plant Physiology. – 2001. – Vol. 127. – P. 1513–1523.

Pokharel B., Dech J., Groot A., Pitt D. Ecosite-based predictive modeling of black spruce (*Picea mariana*) wood quality attributes in boreal Ontario // Canadian Journal of Forest Research. -2014. - Vol. 44. - No. 5. - P. 465–475.

Pokharel B., Groot A., Pitt D.G., Woods M., Dech J.P. Predictive modeling of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood density using stand structure variables derived from airborne LiDAR data in boreal forests of Ontario // Forests. -2016. - Vol. 7. - № 12. - P. 311.

Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // New Phytologist. -2015.-Vol. 208.-No 20.-P. 2

Poorter L., Rozendaal D.M.A., Bongers F. et al. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time // Nature Ecology and Evolution. – 2019. – Vol. 3. – P. 928–934.

Pospieszyńska A., Koprowski M., Przybylak R. Optical density of Scots pine wood and climatic conditions in Toruń, Poland // Bulletin of Geography. Physical Geography Series. – 2018. – Vol. 15. – P. 41–52.

Pretzsch H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures // Forest Ecology and Management. – 2014. – Vol. 327. – P. 251–261.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Kemmerer J., Uhl E. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 // Forest Ecology and Management. – 2018. – Vol. 429. – P. 589–616.

Pretzsch H., Rais A. Wood quality in complex forests versus evenaged monocultures: review and perspectives // Food Science and Technology. – 2016. – Vol. 50. – P. 845–880.

Preussner K. Eine neue Schaftkurvengleichung und ihre Anvendung // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Drezden. − 1974. – Vol. 23. – № 1. – P. 305–309.

Pronini D. Estimating tree specific gravity of major pulpwood species of Wisconsin. – USDA Forest Service. – Research Paper FPL 161, 1971. – 16 p.

Puettmann K., Coates D., Messier C. A critique of silviculture: managing for complexity. – Washington, Island Press, 2009. – 200 p.

Pukkala T., Holt Hanssen K., Andreassen K. Stem taper and bark functions for Norway spruce in Norway // Silva Fennica. – 2019. – Vol. 53. – № 3. Article id 10187. – 15 p.

Purves D.W., Lichstein J.W., Pacala S.W. Crown plasticity and competition for canopy space: a new spatially implicit model parameterized for 250 North American tree species // PLoS One. – 2007. – Vol. 9.e870.

Putz F.E., Parker G.G., Archibald R.M. Mechanical abrasion and inter crown spacing // American Midland Naturalis. – 1984. – Vol. 112. – № 1. – P. 24–28.

Raiskila S., Saranpää P., Fagerstedt K., Laakso T., Löija M., Mahlberg R., Paajanen L., Ritschkoff A.-C. Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites // Silva Fennica. – 2006. – Vol. 40. – № 2. – P. 247–256.

Ramanantoandro T., Ramanakoto M.F., Rajoelison G.L., Randriamboavonjy J.C., Rafidimanantsoa H.P. Influence of tree species, tree diameter and soil types on wood density and its radial variation in a midaltitude rainforest in Madagascar // Annals of Forest Science. – 2016. – Vol. 73. – P. 1113–1124.

Rametsteiner E., Mayer P. Sustainable forest management and Pan-European forest policy // Ecological Bulletins. – 2004. – Vol. 51. – P. 51–57.

Raymond C. A., Joe B. Patterns of basic density variation for *Pinus radiata* grown in south-west slopes region of NSW, Australia // New Zealand Journal of Forestry. – 2007. – Vol. 37. – P. 81–95.

Remeš J., Zeidler A. Production potential and wood quality of Douglas fir from selected sires in the Czech republic // Wood Research. -2014. - Vol. 59. - No 2. - P. 509-520.

Repola J. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density // Silva Fennica. -2006. - Vol. 40. - No 4. - P. 673–685.

Reukema D.L., Smith J.H.G. Development over 25 years of Douglasfir, western hemlock, and western red cedar planted at various spacings on a very good site in British Columbia. – USDA Forest Service. Research Paper PNW-RP- 381, 1987. – 46 p.

Reutebuch S.E., Andersen H.-E., McGaughey R.J. Light detection and ranging (LiDAR): an emerging tool for multiple resource inventory // Journal of Forestry. -2005. - Vol. 103. - N 26. - P. 286-292.

Reyes G., Brown S., Chapman J., Lugo A.E. Wood densities of tropical tree species. USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans. – General Technical Report SO-88, 1992. – 15 p.

Rio M., Pretzsch H., Alberdi I., Bielak K., Bravo F., Brunner A., Condès S., Ducey M.J., Fonseca T., von Lüpke N., Pach M., Peric S., Perot T., Souidi Z., Spathelf P., Sterba H., Tijardovic M., Tomè M., Vallet P., Bravo-Oviedo A. Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed species stands: review and perspectives // European Journal of Forest Research. – 2016. – Vol. 135. – P. 23–49.

Rodriguez H.G., Maiti R., Kumari A., Sarkar N.C. Variability in wood density and wood fibre characterization of woody species and their possible utility in Northeastern Mexico // American Journal of Plant Sciences. – 2016. – Vol. 7. – P. 1139–1150.

Rodriguez-Veiga P., Tansey K., Balzter H. Deliverable D2 "Global Biomass Information System". Mapping Above Ground Biomass, Uncertainty, and Forest Area using Multi-Platform Earth Observation Datasets. Work Package 2.2. – Framework Programme 7, People programme, Marie Curie Initial Training Networks (ITN), 2014. – 35 pp.

Rosner S. Wood density as a proxy for vulnerability to cavitation: size matters // Journal of Plant Hydraulics. – 2017. – Vol. 4. – P. 1–10.

Rossi S., Cairo E., Krause C., Deslauriers A. Growth and basic wood properties of black spruce along an alti-latitudinal gradient in Quebec, Canada // Annals of Forest Science. – 2015. – Vol. 72. – P. 77–87.

Routa J., Kellomäki S., Strandman H., Bergh J., Pulkkinen P., Peltola H. The timber and energy biomass potential of intensively managed cloned Norway spruce stands // Global Change Biology. − 2013. − Vol. 5. − № 1. − P. 43–52.

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

Sagang B.T., Momo S.T., Libalah M.B., Rossi V., Fonton N., Mofack G.II, Kamdem N.G., Nguetsop V.F., Sonké B., Pierre P., Barbier N. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data // Forest Ecology and Management. – 2018. – Vol. 424. – P. 519–528.

Sanio K. Über die Gröe der Holzzellen bei der gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*) // Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik, 1872. – Vol. 8. – P. 401–420.

Santini M., Collalti A., Valentini R. Climate change impacts on vegetation and water cycle in the Euro-Mediterranean region, studied by a likelihood approach // Regional Environmental Change. – 2014. – Vol. 14. – P. 1405–1418.

Saranpää P. Basic density, longitudinal shrinkage and tracheid length of juvenile wood of *Picea abies* (L.) Karst // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1994. – Vol. 9. – № 1–4. – P. 68–74.

Saranpää P. Wood density and growth // Wood quality and its biological basis. J.R. Barnett and G. Jeronimidis (eds.). – Blackwell Publishing & CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003. – P. 87–117.

Savidge R.A. Xylogenesis, genetic, and environmental regulation – a review // International Association of Wood Anatomists Journal. – 1996. – Vol. 17. – P. 269–310.

Savidge R.A. Intrinsic regulation of cambial growth // Journal of Plant Growth Regulation. – 2001. – Vol. 20. – P. 52–77.

Savidge R.A. Tree growth and wood quality // Barnett J. R., Jeronimidis G. (eds.). – Wood quality and its biological basis. Blackwell, Oxford, 2003. – P. 1–29.

Scarlat N., Dalemand J.-F., Monforti-Ferrario F., Nita V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts // Environmental Development. – 2015. – Vol. 15. – P. 3–34.

Schenk H.J., Jackson R.B. A global database of ecosystem root profiles (ERP). – Fullerton, California State University, 2003. – 26 p.

Schepaschenko D., Shvidenko A., Usoltsev V.A., Lakyda P., Luo Y., Vasylyshyn R., Lakyda I., Myklush Y., See L., McCallum I., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A dataset of forest biomass structure for Eurasia // Scientific Data. − 2017. − Vol. 4. Article № 170070. − P. 1–11.

Schimleck L.R., Evans R., Matheson A.C. Estimation of *Pinus radiata* D. Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy // Journal of Wood Science. – 2002. – Vol. 48. – P. 132–137.

Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation // Forests. -2019. - Vol. 10. - P. 728.

Schmidt F.L., DeBell D.S. Wood production and kraft pulping of short-rotation hardwoods in the Pacific Northwest // IUFRO Biomass Studies. S4.01, Mensuration, Growth and Yield. Working Party on the Mensuration of the Forest Biomass. – College of Life Sciences and Agriculture, University of Maine at Orono, 1973. – P. 509-516.

Schmidt P.A., Denner M. The effects of forest conversion of spruce (*Picea abies*) plantations into site-adapted mixed stands on the ground vegetation // Personnel and scientific provision for the sustainable forest

Электронный архив УГЛТУ

management: conditions and prospects. – Proceedings of International Conference. 19-24 September 2005. – Yoshkar-Ola, 2005. – P. 158-168.

Schniewind A. P. Horizontal specific gravity variation in tree stems in relation to their support function // Forest Science. -1962. - Vol. 8. - N_{2} 2. - P. 111-118.

Schotte G. Om gallringsförsök // Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt. – 1912. – Vol. 9. – P. 211–269.

Schulgasser K., Witztum A. How the relationship between density and shrinkage of wood depends on its microstructure // Wood Science and Technology. – 2015. – Vol. 49. – P. 389–401.

Schultze-Dewitz G. Wie wirkt der Einfluss der Stellung eines Baumes im Bestand auf seine Holzstruktur aus? // Holz-Forschung und Holz-Verwertung. – 1960. – Vol. 12. – P. 30–33.

Schultze-Demitz G. Variation und Häufigheit der Faserlänge der Kiefer // Holz als Roh- und Werkstoff. – 1965. – Vol. 23. – P. 81–86.

Schulz H. Die Beurteilung der Qualitätsentwicklung junger Bäume // Forstarchiv. – 1961. – Vol. 32. – № 5. – P. 89–99.

Schumacher P., Tratzmiller P., Glos P., Wegener G. Vergleich der Qualitäten von nordischem und bayerischem Fichtenschnittholz aus unterschiedlichem Rundholz // Holz-Zentralblatt. − 1997. − Vol. 123. − № 28. − P. 427.

Schütt P., Augustin H. Die Verteilung des Cellulosegehaltes im Stamm. Untersuchungen über die Methode der züchterischen Probenahme an 30-järigen Murraykiefern // Das Papier. – 1961. – Vol. 15. – P. 661–665.

Schwappach A. Untersuchungen über Raumgewicht und Druckfestigkeit des Holzes wichtiger Waldbäume, ausgeführt von der preussischen Hauptstation des forstlichen Versuchswesens zu Eberswalde und der mechanisch-technischen Versuchsanstalt zu Charlottenburg. – I. Die Kiefer. – Berlin, J. Springer, 1897. – 302 p.

Schweingruber F.H. Tree rings and environment: dendroecology. – Bern, Switzerland, Paul Haupt Publishers, 1996. – 609 p.

Schwendener S. Das mechanische Princip in anatomischen Bau der Monocotylen. – Leipzig, Wilhelm Engelmann, 1874. – 179 p.

Scurlock J.M.O., Cramer W., Olson R.J., Parton W.J., Prince S.D. Terrestrial NPP: toward a consistent data set for global model evaluation // Ecological Applications. – 1999. – Vol. 9. – N_2 3. – P. 913-919.

Searson M.J., Thomas D.S., Montagu K.D., Conroy J.P. Wood density and anatomy of water-limited eucalypts // Tree Physiology. -2004. - Vol. 24. - No 11. - P. 1295-1302.

Seeling U. Transformation of plantation forests — expected wood properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) within the period of stand stabilization // Forest Ecology and Management. – 2001. – Vol. 151. – N_{2} 1–3. – P. 195–210.

Sharma M., Parton J. Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis // Forest Science. -2009. - Vol. 55. - No 3. - P. 268-282.

Sherson G.E., Woo K.L., Jang H.F., Huntley S., Drummond J., Lawrence V., Gomes F. From forest to product: New solutions for rapid, comprehensive wood and fibre analyses. – III ICEP – International Colloquium on *Eucalyptus* Pulp, 2007. – 12 p.

Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology // Japanese Journal of Ecology. – 1964. – Vol. 14. – P. 133–139.

Shipley B., Vu T.-T. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts // New Phytologist. – 2002. – Vol. 153. – P. 359–364.

Shobairi S.O.R., Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P. Vegetation Fractional Coverage (VFC) Estimation of Planted and Natural Zones Based on Remote Sensing // American Journal of Environmental Policy and Management. -2018. - Vol. 4. - No 21. - P. 21-31.

Siau J.F. Wood: influence of moisture on physical properties. Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1995. – 227 p.

Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušiene L., Aleinikoviene J., Škema M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities // Forests. – 2020. – Vol. 11. – P. 587.

Singh T. Variation in the oven dry wood density of ten prairie tree species // The Forestry Chronicle. -1984. - Vol. 60. - No 4. - P. 217-221.

Singh T. Wood density variations in thirteen Canadian tree species // Wood and Fiber Science. -1987. - Vol. 19. - No 24. - P. 362–369.

Skolmen R.G. Wood density and growth of some conifers introduced to Hawaii. – U.S. Forest Service. Research Paper PSW-12, 1963. – 21 p.

Skovsgaard J.-P., Bald C., Nord-Larsen T. Functions for biomass and basic density of stem, crown and root system of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Denmark // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2011. – Vol. 26. (Suppl 11). – P. 3–20.

Smart S.M., Glanville H.C., del Carmen Blanes M., Mercado L.M., Emmett B.A., Jones D.L., Cosby B.J., Marrs R.H., Butler A., Marshall M.R., Reinsch S., Herrero-Jauregui C., Hodgson J.G. Leaf dry matter content is better at predicting aboveground net primary production than specific leaf area // Functional Ecology. – 2017. – Vol. 31. – P. 1336–1344.

Socha J., Kulej M. Variation of the tree form factor and taper in European larch of Polish provenances tested under conditions of the Beskid Sądecki mountain range (southern Poland) // Journal of Forest Science. -2007. - Vol. 53. - N 212. - P. 538-547.

Sousa V. B., Louzada J. L., Pereira H. Variation of ring width and wood density in two unmanaged stands of the Mediterranean oak *Quercus faginea* // Forests. – 2018. – Vol. 9. – P. 44.

Spellmann H., Nagel J. Auswertung des Nelder-Pflanzverbandsversuches mit Kiefer im Forstamt Walsrode // Berichte von der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde 1992 in Grillenburg/Sachsen, Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, 1992. – P. 149–161.

Spurr S.H., Hsiung W.Y. Growth rate and specific gravity in conifers // Journal of Forestry. -1954. - Vol. 52. - No 2. - P. 191-200.

Sseremba O.E., Mugabi P., Banana A.Y., Wessels B.C., Plessis M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood // Journal of Forestry Research. 2020. – P. 1-10 (in press). – https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7

Steinlin H. Rationalisierung der Aufarbeitung und des Transportes von Laubholzkronen- und Durchforstungsmaterial // Allgemeine Forstzeitschrift. – 1962. – Vol. 17. – N_2 35–36. – P. 536–541.

Stener L.G., Hedenberg O. Genetic parameters of wood, fiber, stem quality and growth traits in a clone test with *Betula pendula* // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2003. – Vol. 18. – P. 103–110.

St-Germain J.-L., Krause C. Latitudinal variation in tree-ring and wood cell characteristics of *Picea mariana* across the continuous boreal forest in Quebec // Canadian Journal of Forest Research. -2008. - Vol. 38. - No 6. - P. 1397-1405.

Strehlke E.G. Ernte und Verwertung von Schwachholz – ein europäisches Problem // Allgemeine Forstzeitschrift. – 1961. – Vol. 16. – P. 329–331.

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. - N 2 3. - P. 451 - 459.

Swenson N.G., Enquist B.J. The relationship between stem branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area // American Journal of Botany. -2008. - Vol. 95. - № 4. - P. 516–519.

Sytnyk S., Lovynska V., Lakyda P., Maslikova K. Basic density and crown parameters of forest forming species within steppe zone in Ukraine // Folia Oecologica. -2018. - Vol. 45. - No. 2. - P. 82-91.

Tabachnick B.G., Fidell L.S. Using multivariate statistics (3rd ed.). – New York, NY, Harper Collins, 1996. – 880 p.

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 // Annals of Botany. – 2007. – Vol. 99. – P. 777–783.

Taneda H., Tateno M. The criteria for biomass partitioning of the current shoot: water transport versus mechanical support // American Journal of Botany. -2004. - Vol. 91. - No 12. - P. 1949–1959.

Taras M.A., Wahlgren H.E. A comparison of increment core sampling methods for estimating tree specific gravity. USDA Forest Service. – SE Forest Experimental Station. Research Paper SE-7, 1963. – 16 p.

Tarp-Johansen M. J., Skovsgaard J.-P., Madsen S. F., Johannsen V. K., Skovgaard I. Compatible stem taper and stem volume functions for oak (*Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Matt) Liebl.) in Denmark // Annals of Forest Science. -1997. - Vol. 54. - No. 7. - P. 577-595.

Teye E., Asare A.P., Amoah R.S.M, Tetteh J.P. Determination of the dry matter content of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) tubers using specific gravity method // ARPN Journal of Agricultural and Biological Science. -2011. - Vol. 6. - N 211. - P. 23-28.

The Finnish Bioeconomy Strategy. Ministry of Employment and the Economy, Ministry of Agriculture and Forestry, Ministry of the Environment. Edita Prime Ltd. 2014. – 31 p. – http://www.tem.fi/files/ 40366/ The_Finnish_Bioeconomy_Strategy.pdf

The Principal Attributes of Canadian Wood Fibre. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre. – Ottawa, 2010. – 17 p.

Thomasius H. Ökologische und landeskulturelle Aspekte der forstwirtschaftlichen Stoffproduktion // Technische Unuversität Dresden, Universitätsreden. − 1981. − № 54. − P. 23–33.

Электронный архив УГЛТУ

Thörnqvist T. Juvenile wood in coniferous trees. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, Document D13, 1993. 110 p.

Tiren L. Einige Untersuchungen über der Schaftform // Meddelanden från Skogsförsöksanstalt. – 1928. – Vol. 24. – P. 81–152.

Todoroki C.L., Lowell E.C., Dykstra D., Briggs D.G. Maps and models of density and stiffness within individual Douglas-fir trees // New Zealand Journal of Forestry Science. – 2012. – Vol. 42. – P. 1–13.

Tomczak A., Jelonek T., Jakubowski M., Pazdrowski W. The effect of tree slenderness on wood properties in Scots pine. Part II: modulus of rupture and modulus of elasticity // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology. – 2016. – Vol. 96. – P. 188–194.

Tomusiak R., Zarzyński P. The old trees trunk's volume determination with use of theodolite // Rocznik Dendrologiczni. 2007. Vol. 55. P. 9–16.

Trendelenburg R., Mayer-Wegelin H. Das Holz als Rohstoff. – München, Carl Hanser Verlag, 1955. – 541 p.

Tsoumis G. Wood as raw material: Source, structure, chemical composition, growth, degradation and identification. – Pergamon Press, 1968. – 276 p.

Turinawe H., Mugabi P., Tweheyo M. Density, calorific value and cleavage strength of selected hybrid eucalypts grown in Uganda // Maderas. Ciencia y tecnología. – 2014. – Vol. 16. – № 1. – P. 13–24.

Thygesen L.G. Tørvaegt af rødgranstammer. Master's Thesis. – Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen. – 1991. – 58 p.

Usoltsev V.A. Birkenäste als Rohstoff für die Herstellung von Holzspannplatten // Bauinformation (Berlin). – 1971. – Vol. 9. – P. 140.

Usoltsev V.A. Some methodological and conceptual uncertainties in estimating the income component of the forest carbon cycle // Russian Journal of Ecology. -2007. - Vol. 38. - № 1. - P. 1-10. DOI: 10.1134/ S1067413607010018

Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and re-harmonized. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. – http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020a. – ISBN 978-5-94984-727-5. – DOI: 10.13140/RG.2.2.31984.00001

Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020 b. – ISBN 978-5-94984-732-9. DOI: 10.13140/RG.2.2.29991.70568. https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9648.

Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: CD-monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020 c. – ISBN 978-5-94984-737-4. DOI: 10.13140/RG.2.2.23595.39208ю https://elar.usfeu.ru/handle/ 123456789/9649.

Uusvaara O. Wood quality in plantation-grown Scots pine // Communicationes Instituti Forestalis Fenniae. – 1974. – Vol. 80. – 105 p.

Valinger E. Effects of thinning and nitrogen fertilization on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1992. – Vol. 7. – P. 219–228.

van Leeuwen M., Hilker T., Coops N.C., Frazer G., Wulder M.A., Newnham G.J., Culvenor D.S. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review // Forest Ecology and Management. – 2011. – Vol. 261. – P. 1467–1478.

Van Miegroet M. Untersuchungen über den Einflu ☐ der waldbaulichen Behandlung und der Umweltfaktoren auf den Aufbau und die morphologischen Eigenschaften von Eschendickungen im schweizerischen Mittelland. – Dissertation, ETH Zürich, 1956. – 125 p.

Vargas-Hernandez J., Adams W.T. Genetic variation of wood density components in young coastal Douglas-fir: Implications for tree breeding // Canadian Journal of Forest Research. – 1991. – Vol. 21. – P. 1801–1807.

Vaughan D., Auty D., Kolb T.E., Meador A.J.S., Mackes K.H., Dahlen J., Moser W.K. Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA // Annals of Forest Science. -2019. - Vol. 76. - No 2. - P. 4.

Via B.K., So C.L., Shupe T.F., Groom L.H., Wikaira J. Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position // Composites: Part A. – 2009. – Vol. 40. – P. 60–66.

Viherä-Aarnio A., Velling P. Growth, wood density and bark thickness of silver birch originating from the Baltic countries and Finland in two Finnish provenance trials // Silva Fennica. − 2017. − Vol. 51. − № 4. − Article id 7731. − 18 p.

Vile D., Garnier E., Shipley B., Laurent G., Navas M.-L., Roumet C., Lavorel S., Diaz S., Hodgson J.G., Lloret F., Midgley G.F., Poorter H., Rutherford M.C., Wilson P.J., Wright I.J. Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves // Annals of Botany. – 2005. – Vol. 96. – P. 1129–1136.

Vogt K.A., Grier C.C., Vogt D.J. Production, turnover and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests // Advances in Ecological Research. – 1986. – Vol. 15. – P. 303–377.

von Pechmann H. Untersuchungen über Gebirgsfichtenholz // Forstwissenschaftliches Centralblatt. – 1954. – Vol. 73. – P. 65–91.

von Pechmann H., Courtois H. Untersuchungen über die Holzeigenschaften von Douglasien aus linksrheinischen Anbaugebieten // Forstwissenschaftliches Centralblatt. – 1970. – Vol. $89. - \text{N}_{2}.$ – P. 88-122.

Vorreiter L. Stammform und Holzeigenschaften der Bayernwald-Fichte // Holz als Roh- und Werkstoff. – 1954. – Vol. 12. – P. 47–54.

Wahlgren H.E. Forest service western wood density Survey: Phases II (increment core processing) and III (estimating tree specific gravity) // Proceedings of the Symposium on "Density... a key to wood quality" held May 4-6, 1965 at Madison, Wisconsin. – USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1965. – P. 21–35.

Wahlgren H.E., Fassnacht D.L. Estimating tree specific gravity from a single increment core. – U.S. Forest Products Laboratory at Madison, WI. Report $N \ge 2146$, 1959. – 24 p.

Wahlgren H.E., Schumann O.R. Wood density survey: Part I // Properties of major southern pines. — USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1975. — P. 6-57.

Walker J.C.F., Butterfield B.G. The importance of microfibril angle for the processing industries // New Zealand Journal of Forestry. -1995. - Vol. 40. - No. 4. - P. 35-40

Wang X. Pulp log sorting based on growth rings and wood density obtained by image analysis of X-ray and optical data. Dr. Scient. Thesis. – Image processing laboratory, Department of Informatics, University of Oslo, 1998. – 103 p.

Wang S., Chen K. Effects of plantation spacings on tracheid lengths, annual-ring widths, and percentages of latewood and heartwood of Taiwan-grown Japanese cedar // Mokuzai Gakkaishi. – 1992. – Vol. 38. – P. 645–656.

Wang L., Payette S., Bégin Y. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at

tree line in northern Quebec // Canadian Journal of Forest Research. -2002. - Vol. 32. - N 2002. - Vol. 32. - N 2002.

Wardrop A.B. Cell wall organization and the properties of the xylem I. Cell wall organization and the variation of breaking load in tension of the xylem in conifer stems // Australian Journal of Scientific Research. Ser. – B (Biol. Sci.). – 1951. – Vol. 4. – P. 391–414.

Watson P., Bradley M. Canadian pulp fibre morphology: superiority and considerations for end use potential // Forestry Chronicle. -2009. - Vol. 85. - No 3. - P. 401–408.

Watt M.S., Clinton P.W., Coker G., Davis M.R., Simcock R., Parfitt R.L., Dando J. Modelling the influence of environment and stand characteristics on basic density and modulus of elasticity for young *Pinus radiata* and *Cupressus lusitanica* // Forest Ecology and Management. – 2008a. – Vol. 255. – P. 1023–1033.

Watt M.S., D'Ath R., Leckie A.C., Clinton P.W., Coker G., Davis M.R., Simcock R., Parfitt R.L., Dando J., Mason E.G. Modelling the influence of stand structural, edaphic and climatic influences on juvenile *Pinus radiata* fibre length // Forest Ecology and Management. – 2008b. – Vol. 254. – P. 166–177.

Watt M.S., Moore J.R., Façon J.P., Downes G.M., Clinton P.W., Coker G., Davis M.R., Simcock R., Parfitt R.L., Dando J., Mason E.G., Bown H.E. Modelling the influence of stand structural, edaphic, and climatic influences on juvenile *Pinus radiata* dynamic modulus of elasticity // Forest Ecology and Management. – 2006. – Vol. 229. – P. 136–144.

Watt P.J., Donoghue D.N.M. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning // International Journal of Remote Sensing. – 2005. – Vol. 26. – P. 1437–1446.

Went F.W., Thimann K.V. Phytohormones. – New York, NY, The MacMillan Company, 1937. – 320 p.

Wiedemann E. Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft. J.D. – Sauerländer's Verlag Frankfurt am Main, 1951. – P. 61–98.

Wiemann M.C., Green D.W. Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species. – USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-RP-643, 2007. – 21 p.

Wiemann M.C., Williamson G.B. Geographic variation in wood specific gravity: effects of latitude, temperature and precipitation // Wood and Fiber Science. -2002. - Vol. 34. - No 1. - P. 96–107.

Wiksten Å. Beskrivning och analys av nägra fasta gallringsförsök i mellersta Norrland // Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt. – 1960. - Vol. 49. - N 26. - P. 1-56.

Wilhelmsson L., Arlinger J., Spångberg K., Lundqvist S.-O., Grahn T., Hedenberg O., Olsson L. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2002. – Vol. 17. – P. 330–350.

Wilkes J. The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species // Wood Science and Technology. – 1984. – Vol. 18. – P. 113–120.

Williams C.J., Johnson A.H., LePage B.A., Vann D.R., Taylor K.D. Reconstruction of tertiary metasequoia forests. I. Test of a method for biomass determination based on stem dimensions // Paleobiology. -2003. - Vol. 29. - N = 2. - P. 256-270.

Williamson G.B., Wiemann M.C. Measuring wood specific gravity...Correctly // American Journal of Botany. — 2010. — Vol. 97. — P. 519-524.

Wilson P.J., Thompson K., Hodgson J.G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies // New Phytologist. -1999. - Vol. 143. - No 1. - P. 155–162.

Woodcock D.G., Shier A.D. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree // Trees. -2002. - Vol. 16. - P. 437–443.

Woods J.H., Kolotelo D., Yanchuk A.D. Early selection of coastal Douglas-fir in a farm-field test environment // Silvae Genetica. – 1995. – Vol. 44. – P. 178–186.

Woods M., Lim K., Treitz P. Predicting forest stand variables from LiDAR data in the Great Lakes – St. Lawrence forest of Ontario // Forestry Chronicle. – 2008. – Vol. 84. – P. 827–839.

Woods M., Pitt D., Penner M., Lim K., Nesbitt D., Etheridge D., Treitz P. Operational implementation of a LiDAR inventory in Boreal Ontario // Forestry Chronicle. – 2011. – Vol. 87. – P. 512–528.

Woolfe J.A. Sweet potato: an untapped food resource. – Cambridge University Press, Cambridge, UK. – 1992. – 643 p.

Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F., Cavender-Bares J., Chapin T., Cornelissen J.H.C., Diemer M., Flexas J., Garnier E., Groom P.K., Gulias J., Hikosaka K., Lamont B.B., Lee T., Lee W., Lusk C., Midgley J.J., Navas M.-L., Niinemets U., Oleksyn J., Osada N., Poorter H., Poot P., Prior L., Pyankov V.I., Roumet C.,

Thomas S.C., Tjoelker M.G., Veneklaas E.J., Villar R. The worldwide leaf economics spectrum // Nature. – 2004. – Vol. 428. – P. 821–827.

Wulder M.A., Bater C.W., Coops N.C., Hilker T., White J.C. The role of LiDAR in sustainable forest management // Forestry Chronicle. – 2008. – Vol. 84. – P. 807–826.

Wulder M., Hall R., Coops N., Franklin S. High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization // BioScience. – 2004. – Vol. 54. – P. 511–521.

Wylie R.R.M., Woods M.E., Dech J.P. Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – P. 2022.

Xiang W. Modelling the radial and longitudinal variation in wood density and its sensitivity to climate in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). – PhD Thesis. – Lakehead University, Faculty of Natural Resources Management, 2013. – 157 p.

Yamaoka Y. Measurement of the total transpiration from a forest // Bulletin of the Government Forest Experimental Station. – 1952. – Vol. 54. – P. 187–206.

Yanchuk A.D., Kiss G.K. Genetic variation in growth and wood specific gravity and its utility in the improvement of interior spruce in British Columbia // Silvae Genetica. – 1993. – Vol. 42. – P. 141–148.

Yang J.L., Evans R. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density // Holz als Roh- und Werkstoff. -2003. - Vol. 61. - P. 449-452.

Yang K.C., Hazenberg G. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth-rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana* // Canadian Journal of Forest Research. -1994. - Vol. 24. - No. 5. - P. 996–1007.

Zanne A.E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D.A., Ilic J., Jansen S., Lewis S.L., Miller R.B., Swenson N.G., Wiemann M.C., Chave J. Global wood density database. – Dryad. – 2009. – Identifier: http://hdl.handle.net/10255/dryad.235

Zenker R., Poller S. Über die unterschiedliche Beschaffenkeit von dünnem und starkem Kiefernholz // Archiv für Forstwesen. – 1968. – Vol. 17. – N_2 5. – P. 501–511.

Zhang L.Y., Deng X.W., Lei X.D., Xing W.H., Peng C.H., Lei P.H., Yan W.D. Determining stem biomass of *Pinus massoniana* L. through variations in basic density // Forestry. – 2012. – Vol. 85. – № 5. – P. 601–609.

- Zhang S.Y., Morgenstern E.K. Genetic variation and inheritance of wood density in black spruce (*Picea mariana*) and its relationship with growth: Implications for tree breeding // Wood Science and Technology. 1995. Vol. 30. P. 63–75.
- Zhang L., Shi H. Local modeling of tree growth by geographically weighted regression // Forest Science. -2003. Vol. 50. No. 2. P. 225–244.
- Zhang S.Y., Koubaa A. Softwoods of eastern Canada: Their silvics, characteristics, manufacturing, and end-uses. FPInnovations Forintek Division, Vancouver, British Columbia, Special Publication SP-526E, 2008. 330 p.
- Zhang S.-Y., Owoundi R.E., Nepveu G., Mothe F., Dhôte J.-F. Modelling wood density in European oak and simulating the silvicultural influence // Canadian Journal of Forest Research. 1993. Vol. 23. P. 2587—2593.
- Zhang S.Y., Yu Q., Beaulieu J. Genetic variation in veneer quality and its correlation to growth in white spruce // Canadian Journal of Forest Research. -2004. Vol. 34. No 6. P. 1311-1318.
- Zhou L., Chen Z., Lundqvist S.-O., Olsson L., Grahn T., Karlsson B., Wu H.X., García-Gil M.R. 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 // Canadian Journal of Forest Research. -2019. Vol. 49. No. 7. P. 810-818.
- Zhu J., Nakano T., Hirakawa Y. Effect of growth on wood properties for Japanese larch (*Larix kaempferi*): Differences of annual ring structure between corewood and outerwood // Journal of Wood Science. 1998. Vol. 44. P. 392–396.
- Zobel B.J., Rhodes R.R. Relationship of wood specific gravity in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) to growth and environmental factors. – Texas Forest Service. Report N_2 11, 1955. – 30 p.
- Zobel B.J., van Buijtenen J.P. Wood variation: Its causes and control. Springer Series in Wood Science, Timell T.E. (ed.). Springer-Verlag, 1989. 363 p.
- Zobel B.J., Jett J.B. Genetics of wood production. Springer Series in Wood Science, Timell T.E. (ed.), Springer-Verlag, 1995. 337 p.
- Zobel B.J., Sprague J.R. Juvenile wood in forest trees. Springer Series in Wood Science, Timell T.E. (Ed.), Springer-Verlag, 1998. 300 p.
- Zobel B.J., Talbert J. Applied forest tree improvement. New York, John Wiley & Sons, 1984. 511 p.

Электронный архив УГЛТУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
Глава 1. Квалиметрия фитомассы дерева: определения и	
общие положения	2
Глава 2. Базисная плотность фитомассы дерева: исследование	
системы связей и закономерностей	11
2.1. Общие положения и взаимосвязи	1.1
2.2. Теории формообразования ствола и их значение	
в объяснении изменчивости базисной плотности	
древесины	19
2.3. Базисная плотность древесины ствола и ее связь	
с таксационными показателями и внешними факторами	22
2.4. Базисная плотность древесины ствола и ее парная связь	
с базисной плотностью на высоте груди	26
2.5. Базисная плотность древесины ствола	
и ее многофакторная связь с базисной плотностью	
на высоте груди и другими показателями	29
2.6. Основные факторы, влияющие на базисную плотность	
ствола в связи с развитием кроны	32
2.7. Базисная плотность как дополнительный фактор	
при оценке фитомассы деревьев и древостоев	
в тропических лесах	4(
Глава 3. Квалиметрия тонкомерной древесины как промышленного	. `
сырья	42
3.1. Сравнительная квалиметрическая характеристика	
различных категорий тонкомерной древесины	
(на примере осины и березы лесостепной зоны)	43
3.2. Древесина и кора ветвей растущих деревьев:	
сравнительный анализ их квалиметрических	
показателей в естественных сосняках и культурах	54
3.3. Тонкомерная древесина и «зелёная» энергетика	58
Глава 4. Моделирование динамики плотности и связанных с ней	
квалиметрических показателей фитомассы растущих	
деревьев	60
4.1. Квалиметрия древесины в естественных насаждениях и	
культурах	6
4.2. Прогнозирование качества древесных волокон в зависи-	
мости от лесорастительных условий (на примере ели	
приморской в Канаде)	6.5
4.3. Контроль качества древесины ствола и ветвей в процессе	•
лесовыращивания	67

Электронный архив УГЛТУ

4.4. Моделирование динамики «кажущеися» плотности	
и содержания сухого вещества в древесине растущих	
деревьев с учетом формы ствола (на примере сосновых,	
березовых и осиновых древостоев степной зоны)	74
Глава 5. Базисная плотность и содержание сухого вещества	84
5.1. Характеристика некоторых взаимосвязей	84
5.2. Абсолютно сухая масса ствола и его объем	88
Глава 6. Big Data, ГИС-технологии и перспективы картирования	
квалиметрии лесного покрова	92
6.1. Эра Big Data и базы данных о количественных	
и качественных показателях фитомассы лесов	92
6.2. ГИС-технологии и определение квалиметрических	
показателей деревьев по данным дистанционного	
зондирования	100
6.3. ГИС-технологии и определение квалиметрических	
показателей древостоев по данным дистанционного	
зондирования	111
Заключение	118
Библирографический список	119

Научное издание

Усольцев Владимир Андреевич, **Цепордей** Иван Степанович

Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества

ISBN 978-5-94984-768-8



Редактор Е. Л. Михайлова Оператор компьютерной верстки О. А. Казанцева

Подписано в печать 26.11.2020 Формат 60х84/16 Уч.-изд. л. 13,8 4,24 Мб Тираж 500 экз. (1-й завод 12 экз.) Заказ №

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37 Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ» 620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35a, оф. 2. Тел.: 8(343)362-91-16