

УДК 630\*182.5

## МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИАМЕТРА СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ И ДРЕВОСТОЕВ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПО МОРФОМЕТРИИ КРОН И ПОЛОГА

© 2025 г. В. А. Усольцев<sup>1, 2, \*</sup><sup>1</sup>Уральский государственный лесотехнический университет,  
ул. Сибирский тракт, д. 37, Екатеринбург, 620100 Россия<sup>2</sup>Уральский государственный экономический университет,  
ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, Екатеринбург, 620144, Россия

\*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Поступила в редакцию 25.07.2024 г.

После доработки 03.04.2025 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

В рамках климатически оптимизированного ведения лесного хозяйства необходима точная информация о фитомассе и углерододепонирующей способности лесов. К настоящему времени опубликовано множество эмпирических моделей и составлена масса таксационных нормативов для оценки фитомассы деревьев и древостоев по измеренным на пробных площадях морфометрическим показателям. Однако их применение с целью оценки углерододепонирующей способности лесов на больших площадях средствами традиционной наземной таксации лесов довольно трудозатратно. Альтернатива может состоять в использовании лазерной (лидарной) техники, однако она не позволяет определять основные массообразующие показатели — диаметр ствола дерева или средний диаметр стволов древостоя. Для совмещения традиционных эмпирических моделей и таблиц фитомассы с данными дистанционного зондирования необходимы модели промежуточного звена для оценки диаметра ствола или среднего диаметра древостоя в зависимости от морфометрии полога, регистрируемой или наземными способами, или дистанционно. Цель настоящего исследования состояла в построении моделей зависимости диаметра ствола дерева и среднего диаметра древостоя от основных морфометрических показателей полога, полученных путем наземных измерений, но доступных для лидарного сканирования. Модели построены на уровне родов, как совокупностей викарирующих видов. Исходными данными для исследования послужили материалы двух авторских баз данных о фитомассе и морфоструктуре 5320 деревьев и 5817 древостоев Евразии. Для 13 родов построены двухфакторные аллометрические зависимости: (а) диаметра ствола на высоте груди от высоты дерева и диаметра кроны и (б) среднего диаметра древостоя от его средней высоты и густоты, объясняющие в большинстве случаев от 90 до 97 % изменчивости искомого показателя. Предложенные модели, построенные по данным традиционной наземной таксации, могут быть напрямую применены в лидарных технологиях или использованы для валидации моделей, построенных по данным лидарного зондирования. Это особенно актуально ввиду отсутствия наземных измерений морфометрии кроны и полога по большинству существующих видов и местообитаний. Использование предложенных моделей по результатам дистанционной регистрации морфологии кроны и полога дает возможность для оценки фитомассы и углеродного пула деревьев и древостоев на некоторых территориях в режиме реального времени путем их совмещения с имеющимися нормативными материалами для определения фитомассы деревьев и древостоев.

**Ключевые слова:** *Pinus L., Picea L., Abies Mill., Larix Mill., Haploxylon (Koehne) Pilg., Betula L., Populus L., Alnus Gaertn., Tilia L., Quercus L., Fagus L., Carpinus L., Fraxinus L., диаметр ствола на высоте груди, средний диаметр древостоя, морфометрия кроны и полога, аллометрические модели.*

DOI: 10.31857/S0024114825030022, EDN: HBMXTC

Знание структурно-функциональной организации лесного покрова является ключом к пониманию и прогнозированию реакции земной биосферы на глобальные изменения (Li et al., 2024). В последние годы становится все более актуальной концепция развития биоэкономики замкнутого цикла для лесов России в рамках климатически оптимизированного

ведения лесного хозяйства (Лескинен и др., 2020). Для ее реализации необходима точная информация о фитомассе и углерододепонирующей способности лесов. К настоящему времени опубликовано множество эмпирических моделей и составлена масса таксационных таблиц для оценки фитомассы деревьев и древостоев по измеренным на пробных площадях

морфометрическим показателям (Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Усольцев, 2002; Luo et al., 2020). Однако их применение с целью оценки углероддепонирующей способности лесов на больших площадях средствами традиционной наземной таксации лесов довольно трудозатратно (Luoma et al., 2017; Stereńczak et al., 2019), к тому же на большей части территории лесного фонда России давность лесоустройства превышает установленный ревизионный период, а существующие объемы лесоустроительных работ недостаточны для полной актуализации информации о лесах (Юнсон, Мельничук, 2024). Альтернатива может состоять в использовании лазерной (лидарной) техники. Применение фото- и лидарных устройств, смонтированных на БПЛА (UAV) для регистрации высоты деревьев и диаметра крон (Иванова и др., 2021; Sun et al., 2022; Pereira Martins-Neto et al., 2023; Кабонен, Иванова, 2023; Усольцев и др., 2023), а также бортовых лидарных устройств, смонтированных на самолетах или вертолетах для регистрации высоты древесного полога и густоты древостоев в обширных пространственных и временных масштабах (Yao et al., 2014; Coops et al., 2021; Newton, 2021; Lee et al., 2022; Umeki, Inoue, 2024), сегодня чрезвычайно перспективно. Однако проблема состоит в том, что с помощью названных устройств невозможно оценить основные массообразующие показатели — диаметр ствола дерева ( $D$ , см) и средний диаметр древостоя ( $D_m$ , см).

В многочисленных литературных источниках изложен опыт построения моделей для оценки  $D$  и  $D_m$  по известной морфометрии крон деревьев и полога древостоев. Названная морфометрия может оцениваться как наземным, так и дистанционным способом, но в обоих случаях построенные модели нацелены не на наземную таксацию, а на лидарное воздушное сканирование. Состояние проблемы по выбору структуры моделей при использовании двух названных технологий получения морфометрических данных можно проанализировать отдельно на уровнях деревьев ( $D$ ) и древостоев ( $D_m$ ) (Umeki, Inoue, 2024).

#### Оценивание $D$ деревьев по их морфометрии, измеренной наземными методами

По данным более 5 тыс. модельных деревьев для 23 лесообразующих видов Евразии были построены аллометрические модели для оценки  $D$  по известным значениям диаметра кроны, объясняющие от 34 до 98% изменчивости  $D$  (Усольцев и др., 2024). Для сосняков Чехии аллометрическая взаимосвязь диаметра кроны и  $D$  была дополнена переменными верхней высоты, сбega, кронового отношения, индекса густоты и доли основной породы в пологе, и модель объясняла 66–68% варьирования искомого параметра (Sharma et al., 2017). В насаждениях сосны густоцветной (*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.) и кедра корейского (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) в Южной

Корее парные (однофакторные) зависимости  $D$  от высоты деревьев и диаметра кроны характеризовались коэффициентами детерминации соответственно 0.65 и 0.72 (Chang et al., 2015).

Более точные прогнозы  $D$  обеспечивает одновременный учет высоты дерева и диаметра кроны (Xu et al., 2019). В насаждениях ели черной (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), пихты дугласовой (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* [Mirb.] Franco) и сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) в Канаде модель, включающая в качестве независимых переменных высоту дерева и диаметр кроны, объяснила изменчивость  $D$  соответственно на 86, 85 и 91% (Filipescu et al., 2012), в насаждениях 26 лесообразующих видов Евразии — от 80 до 98% (Усольцев, 2016б), а в мангровых лесах Пуэрто-Рико — на 19% (Brandeis et al., 2009). В насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в Финляндии были исследованы зависимости  $D$  от высоты дерева и диаметра кроны как в отдельности, так и совместно. Установлено, что высота дерева объяснила изменчивость  $D$  у названных видов соответственно на 68, 86 и 73%, диаметр кроны на 72, 63 и 60% и высота дерева и диаметр кроны совместно на 85, 91 и 82% (Kalliovirta et al., 2005). В насаждениях сосны длиннохвойной (*Pinus palustris* Mill.) в США высота дерева объяснила 77% изменчивости  $D$ , высота дерева и площадь его кроны совместно 90%, а включение в модель в качестве дополнительных независимых переменных таких таксационных показателей древостоев, как верхняя высота деревьев, густота и класс бонитета, повысило объяснительную способность модели несущественно — лишь на 2% (Gonzalez-Benecke et al., 2014). В насаждениях сосны замечательной (*Pinus radiata* D. Don) в центральной части Чили высота дерева объяснила 97% изменчивости  $D$ , высота дерева и площадь кроны совместно 99%, а включение в модель густоты древостоя в качестве дополнительной независимой переменной оставило объяснительную способность модели без изменений (Gonzalez-Benecke et al., 2022).

Диаметр ствола может быть также предсказан на основе теории формообразования ствола как тела равного сопротивления изгибу под действием ветра (Metzger, 1893). Согласно этой теории, наличие сбega позволяет дереву по всей длине ствола выравнивать напряжение изгиба, создаваемое давлением ветра на крону, что позднее было использовано для прогнозирования диаметра ствола в любом сечении, в том числе на высоте груди (Dean, Long, 1986). Названная модель дает возможность получить значение  $D$  только по двум параметрам — общей высоте дерева и длине кроны. Соотношение названных двух независимых переменных определяет степень “парусности” дерева и, соответственно, ее влияние на величину  $D$  (Jerez Rico, 2002; Dean et al., 2009).

*Оценивание  $D_m$  стволов древостоев  
по их морфометрии, измеренной  
наземными методами*

Для пяти лесообразующих видов США был выполнен анализ зависимости среднего диаметра  $D_m$  от средней высоты и густоты древостоя. Было установлено, что при включении дополнительной переменной в виде густоты древостоя в модель зависимости диаметра  $D_m$  от высоты древостоя повышение объяснительной способности модели было незначительным и зависело от древесной породы: у сосны желтой (*Pinus ponderosa* P. Lawson & C. Lawson) с 66 до 69%, у пихты дугласовой с 62 до 63%, у пихты великой (*Abies grandis* (Douglas ex D. Don) Lindley) с 57 до 62%, у сосны скрученной с 32 до 49%, а у ели Энгельмана (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm.) названное повышение отсутствовало, и объяснительная способность модели составила в обоих случаях 71% (Parker, Evans, 2004).

В Японии на примере древостоев кедра японского (*Cryptomeria japonica* D. Don) и кипариса японского (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) предложена модель оценки  $D_m$  от средней высоты деревьев и густоты древостоя, исходя не из фактических данных пробных площадей, а из трех теоретических предпосылок (Umemi, Inoue, 2024): (1) соблюдения принципа постоянства площади поверхности стволов (Gavrikov, 2014; Inoue, Nishizono, 2015), (2) наличия аллометрической зависимости отношения фактической площади поверхности ствола к максимальной (Umemi, Inoue, 2024) от относительного расстояния между деревьями (Moriguchi et al., 2017; Lee, Choi, 2019) и (3) наличия линейной зависимости между площадью поверхности ствола и произведением высоты дерева на диаметр ствола на высоте груди (Inoue et al., 2021). Несмотря на теоретический характер модели, она включала четыре эмпирических коэффициента, которые были определены по данным наземной таксации древостоев кедра и кипариса, полученным на всей территории Японии. Были выявлены для обоих видов тесные связи фактических и расчетных значений  $D_m$ , однако модель показала занижение искомого показателя при  $D_m$ , превышающем 40 см, что авторы связывают с нарушением принципа постоянства площади поверхности стволов у крупных деревьев. Поскольку модель имеет теоретическую основу, авторы считают возможным ее применение к другим хвойным видам (Umemi, Inoue, 2024).

*Оценивание  $D$  стволов деревьев  
по их морфометрии, измеренной  
дистанционными методами*

Известно, что бортовое лидарное сканирование используется во многих областях лесного хозяйства (Means et al., 2000; Parker, Mitchell, 2005; Данилин и др., 2005; Усольцев, 2014; Алтынцев, Сабер, 2021;

Демидов, 2021) и с достаточной точностью обеспечивает измерение высоты и размеров крон деревьев, а также их густоты и вертикального профиля крон (Harding et al., 2001; Drake et al., 2002; Parker, Evans, 2004; Maltamo et al., 2004; Dean et al., 2009; Özdemir, 2013; Galvancio, Popescu, 2016; Panagiotidis et al., 2017; Бойко, Караган, 2021; Юнсон, Мельничук, 2024).

В частности, объяснительная способность высоты дерева и диаметра кроны при оценке  $D$  составила в насаждениях сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) в США 90% (Popescu, 2007) и в насаждениях ели ситхинской (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) в Шотландии 79% (Zagalikis et al., 2005). В насаждениях лиственницы ольгинской (*Larix olgensis* A. Henry) в Китае высота дерева в качестве единственной независимой переменной объяснила 81% варьирования  $D$ , а включение в модель диаметра кроны и индекса конкуренции дополнительно к высоте дерева повысило ее объяснительную способность до 90% (Hao et al., 2021). В другом исследовании, выполненном в насаждениях лиственницы ольгинской, высота дерева и площадь горизонтальной проекции кроны (далее — площадь кроны) в моделях разной конфигурации объясняли 81—84% варьирования диаметра  $D$  (Sun et al., 2022). В насаждениях ели толстоиглой (*Picea crassifolia* Kom.) в Китае совместная объяснительная способность высоты дерева, площади кроны и сомкнутости полога при оценке диаметра  $D$  варьировала в диапазоне от 59 до 64% в зависимости от конфигурации модели (Fu et al., 2020).

В Норвегии расчет зависимости  $D$  от высоты дерева и диаметра кроны, замеренных лидарным устройством, был выполнен по нескольким алгоритмам — обычному методу наименьших квадратов, обобщенному методу наименьших квадратов, линейной модели смешанного типа и географически взвешенной регрессии. Наилучшую подгонку к фактическим данным показала модель смешанного типа (Salas et al., 2010). В другом анализе аналогичной модели лучшую подгонку показал метод “трехмерной связки лидарных замеров” (Xu et al., 2019). При оценке  $D$  по дистанционно измеренной высоте деревьев сосны замечательной в Австралии было выполнено сопоставление информативности 12 различных функций и сделан вывод о необходимости привлечения в анализ других переменных дерева и древостоя с целью повышения точности модели (Bi et al., 2012).

*Оценивание  $D_m$  стволов древостоев  
по их морфометрии, измеренной  
дистанционными методами*

В насаждениях Ленинградской области было выполнено лидарное профилирование лесного полога по кварталам, и по программе Global Mapper (Global Mapper..., 2018) определена средняя высота древостоя. По табличным данным (Мошкалев и др., 1984)

определяли  $D_m$ , используя полученные значения высот. Разность значений  $D_m$ , полученных путем лидарного профилирования и наземной глазомерно-измерительной таксации, не выходила за пределы 12%, допускаемых лесоустроительной инструкцией (Ковязин и др., 2020).

В насаждениях пихты дугласовой в штате Орегон (США) при оценке суммы площадей сечений стволов на высоте груди по средней высоте древостоя и сомкнутости полога, оцененных с помощью лидарной техники, коэффициент детерминации модели составил 0.95 (Means et al., 2000), а при ее оценке только по высоте — 0.87 (Lefsky et al., 1999). Отмечается при этом, что возможное занижение оценки высоты древостоя по лидарной технологии по отношению к фактической составляет от 1 до 4 м вследствие проблематичности получения отраженного сигнала от апекса кроны (Magnussen, Boudewyn, 1998; Young, 2000; Harrington, 2001).

Таким образом, результаты моделирования диаметра ствола отдельного дерева и древостоя в целом как по наземным, так и по дистанционно измеряемым показателям деревьев и древостоев, различаются по видам, вкладам независимых переменных в объяснение изменчивости искомого показателя, структурной форме модели и т. д. Однако каких-либо противоречивых аспектов в структуре тех и других не выявлено. При оценке диаметра  $D$  по морфометрии дерева лучшие результаты, как правило, показывает двухфакторная аллометрическая модель, включающая в качестве независимых переменных высоту дерева и диаметр кроны. Названная модель объясняла изменчивость  $D$  на 19—99% при оценке морфометрии дерева наземным способом (Kalliovirta et al., 2005; Brandeis et al., 2009; Filipescu et al., 2012; Gonzalez-Benecke et al., 2014, 2022; Усольцев, 2016б) и на 59—90% — при дистанционной ее оценке (Zagalikis et al., 2005; Popescu, 2007; Fu et al., 2020; Hao et al., 2021; Sun et al., 2022). По-видимому, основную роль в степени адекватности модели играет видоспецифичность морфоструктуры дерева, вследствие чего имеем 91% объясненной изменчивости диаметра  $D$  в сосняках (Filipescu et al., 2012) против 19% в мангровом “ходульном” лесу (Brandeis et al., 2009). Однако модель  $D$ , построенная на основе теории формообразования ствола (Dean, Long, 1986), включала иное сочетание независимых переменных, а именно высоту дерева и длину кроны (Jerez Rico, 2002; Dean et al., 2009). При оценке диаметра  $D_m$  по морфометрии лесного полога удовлетворительную объяснительную способность показала двухфакторная аллометрическая модель, включающая в качестве независимых переменных среднюю высоту древостоя и его густоту, независимо от метода получения исходных данных. Очевидно, что из всего видового разнообразия опубликованными моделями на сегодня охвачена лишь незначительная часть видов.

Выше приведенный анализ публикаций по теме заявленного исследования касался моделирования диаметров  $D$  и  $D_m$  на локальном или региональном уровнях. Несколько изданий последовательно пополняемых авторских баз данных о фитомассе и морфометрии деревьев (Усольцев, 2016б, 2023а) и древостоев (Усольцев, 2001, 2010, 2023б) дают возможность построения моделей  $D$  и  $D_m$  на трансконтинентальном уровне.

Цель нашего исследования состояла в построении трансконтинентальных моделей зависимости  $D$  и  $D_m$  от основных морфометрических показателей деревьев и древостоев, измеренных наземными методами на уровне лесообразующих родов Северной Евразии, в ориентации на использование их в лидарных технологиях для оценки фитомассы и углеродных пулов деревьев и древостоев.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исходными данными для исследования послужили материалы последних дополненных версий баз данных о структуре фитомассы деревьев (Усольцев, 2023а) и древостоев (Усольцев, 2023б) лесообразующих видов Северной и Юго-Восточной Евразии. Этими данными охвачена территория от Франции и Великобритании на западе до Японии и Китая на юго-востоке. Материалы по фитомассе и морфометрии деревьев и древостоев, приведенные в названных базах данных, оценивались на временных пробных площадях традиционными наземными методами, отработанными в ходе выполнения работ по Международной биологической программе и в последующих исследованиях. Сводка методов получения исходных данных на пробных площадях была представлена в главе 1 “Методы получения экспериментальных данных о фитомассе насаждений” авторской монографии (Усольцев, 2007). По видовому составу в базу данных по древостоям включены материалы как по чистым, так и по смешанным древостоям. Видовая принадлежность древостоя в последнем случае устанавливалась по принципу его преобладания в видовом составе, как принято при государственном учете лесов.

В приведенном выше обзоре рассматривались модели, построенные по принципу максимально возможного количества независимых переменных, действующих на статистически значимых уровнях. Так, были построены трансевразийские модели фитомассы деревьев и древостоев, включающие в качестве независимых переменных как таксационные, так и климатические показатели. Модели давали возможность прогнозировать изменения фитомассы вследствие предполагаемых сдвигов температур и осадков при фиксированных таксационных показателях (Цепордей, 2023).

Но есть другой тип моделей — так называемые всеобщие модели (generic models). Они подчинены

принципу: при всей сложности лесных экосистем в их основе лежат очень простые правила (Whitfield, 2001). Предложено несколько всеобщих моделей, связывающих фитомассу деревьев с тем или иным таксационным показателем. В основу одних положен метод фрактальной модели (West et al., 1999), другая основана на теории метаболического масштабирования (West et al., 1997), третья — на теории адаптивного распределения масс (Poorter et al., 2015). Проверка названных теоретических моделей на реальных совокупностях деревьев обычно показывает наличие тех или иных отклонений фактических регрессионных коэффициентов от теоретических (Zianis, Mencuccini, 2004; Wirth et al., 2004; Усольцев, 2016а). Тем не менее основной их практический смысл состоит в том, чтобы заполнять лакуны — отсутствие данных о фитомассе и морфометрии полога по большинству имеющихся видов и местопроизрастаний. На уровне древостоев более 100 лет назад была предложена иная всеобщая модель, известная как “закон Эйхгорна”, согласно которому одной определенной высоте древостоев пихты (*Abies*) для всех классов бонитета соответствует один и тот же их запас (Eichhorn, 1902). После того, как названная закономерность подтвердилась для древостоев бука (*Fagus*), ели европейской и сосны обыкновенной (Eichhorn, 1904; Gerhardt, 1909), ее стали формулировать как “расширенный закон Эйхгорна” (Assman, 1955; Thomasius, 1963). Тем не менее оказалось, что этот “закон” не является всеобщим и его применение вызывает смещения в предельных эдафических условиях (Gerhardt, 1928; Assman, 1955; Magin, 1955).

Модели обоих упомянутых выше типов (ориентированные на использование соответственно максимального и минимального числа независимых переменных) обладают смещениями, поскольку в лесных экосистемах мы имеем дело не с законами, а с закономерностями (Assmann, 1961; Антанайтис и др., 1976; Антанайтис и др., 1986). Это основополагающий отличительный признак стохастических закономерностей: чем больше их обобщают, тем в большей степени результат обобщения отдалится от понятия “закон”. Для оценки допустимой величины этих смещений в каждом конкретном случае требуются специальные исследования. Тем не менее, модели обоих типов имеют право на существование. В данном исследовании предпочтение отдается обобщенным моделям  $D$  и  $D_m$ , построенным в зависимости от основных (одного-двух) морфометрических показателей на трансконтинентальном уровне.

Построение обобщенных регрессионных моделей в настоящем исследовании предваряется содержательным анализом исходных данных. Его элементы и специфика построения пассивного эксперимента (Налимов, 1971; Четыркин, 1977; Мак-Лоун, 1979; Лиэпа, 1980) были изложены ранее (Усольцев, Цепордей, 2023). Обработка экспериментального

материала выполнена по программе многофакторного перцепсионного анализа Statgraphics-19 (<http://www.statgraphics.com/>). Свободный член моделей скорректирован на поправку за счет логарифмирования переменных (Baskerville, 1972); коэффициент детерминации  $\text{adj}R^2$  скорректирован на количество переменных; рассчитана стандартная ошибка модели SE. Оценка вклада независимых переменных в объяснение изменчивости зависимой переменной выполнена по алгоритму, предложенному И. Я. Лиэпой (1980). Регрессионный анализ выполнен на уровне родов (подродов), видовой состав которых был показан ранее (Цепордей, 2023). Подобный подход дает возможность использовать полученные модели для тех видов в пределах рода, фактические данные о которых пока отсутствуют. В частности, при отсутствии эмпирических данных о морфометрии березы желтой биологически более обосновано применение для нее имеющихся данных о морфометрии березы белой, нежели осины, дуба или липы. Поскольку эмпирические модели применимы лишь в фактических диапазонах изменчивости анализируемых переменных, для представления о диапазоне применимости моделей приведена статистика исходных данных (табл. 1).

Исходя из анализа опубликованных работ по теме исследования, биологически обоснованными и наиболее часто применяемыми независимыми переменными (причем с разными уровнями значимости в том или ином исследовании), объясняющими изменчивость диаметра  $D$ , являются высота дерева  $H$ , диаметр кроны  $D_c$ , ее длина  $L_c$  и значительно реже  $N$  — число деревьев на 1 га, тыс. экз. Исходя из того же анализа, независимыми переменными, объясняющими изменчивость  $D_m$ , являются средняя высота древостоя  $H_m$  и его густота  $N$  (реже полнота и сомкнутость полога).

В соответствии с поставленной целью исследований и учетом опыта моделирования диаметра стволов деревьев и древостоев, изложенного в обзоре публикаций, анализ фактических данных (табл. 1) нами выполнен с использованием двух структур аллометрических моделей, апробированных ранее (Усольцев, 2024)

$$\ln D = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_c + a_3 \ln L_c + a_4 \ln N, \quad (1)$$

$$\ln D_m = a_0 + a_1 \ln H_m + a_2 \ln N. \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Модель (1) на уровне дерева.* При расчете модели (1) оказалось, что густота древостоя вносит незначительный, 0.25%-ный, вклад в объяснение общего варьирования  $D$ , и эта переменная была исключена из дальнейшего анализа. Дальнейший анализ модели для  $D$  выполнен в двух вариантах

Таблица 1. Характеристика фактических данных о 5320 деревьях и 5817 древостоях, использованных в последующем регрессионном анализе

№	Род (подрод)	Число на- блюдений	Диапазоны исходных значений анализируемых показателей деревьев					Число на- блюдений	Диапазоны исходных значений анализируемых показателей древостоев			
			D	H	D <sub>c</sub>	L <sub>c</sub>	N		D <sub>m</sub>	H <sub>m</sub>	N	SI
1	<i>Pinus</i> L.	1910	0.3—55.0	1.4—36.6	0.1—13.9	0.4—17.2	0.2—82.4	2360	0.5—60.0	1.4—38.3	0.1—120.0	Ib-Vb
2	<i>Picea</i> L.	665	0.5—53.6	1.4—36.3	0.3—8.6	0.7—29.5	0.2—22.4	664	1.8—48.9	1.6—38.6	0.2—187.5	Ib-Vb
3	<i>Abies</i> Mill.	215	1.4—65.5	2.2—32.7	0.6—8.9	1.8—21.4	0.2—8.4	260	1.1—74.0	2.2—45.0	0.1—96.0	Ib-Vb
4	<i>Larix</i> Mill.	140	0.3—73.0	1.4—34.0	0.3—13.0	0.8—21.8	0.2—56.2	464	0.5—72.9	1.8—40.0	0.1—122.5	Ib-Vc
5	<i>Haploxydon</i> (Koehne) Pilg.	81	1.5—53.6	1.7—26.8	0.8—7.7	1.5—20.0	0.3—3.7	146	1.6—58.0	1.5—31.0	0.1—16.2	I—Va
6	<i>Betula</i> L.	706	0.2—44.7	1.5—27.1	0.3—13.4	0.7—17.8	0.3—56.2	480	0.7—48.2	1.5—30.3	0.1—304.0	Ib-Vc
7	<i>Populus</i> L.	295	0.6—42.1	2.1—28.8	0.4—11.0	0.7—15.0	0.7—131.4	252	0.9—38.3	1.7—31.0	0.2—131.4	Ic-Vb
8	<i>Alnus</i> Gaertn.	423	1.9—42.1	4.2—27.8	0.5—8.4	0.9—18.0	0.3—33.9	165	1.2—32.0	2.7—30.0	0.2—96.2	Ic-V
9	<i>Tilia</i> L.	128	4.0—38.6	7.5—23.8	0.5—9.2	3.9—19.6	0.5—1.5	258	1.5—47.2	1.7—29.6	0.1—115.0	Ia-IV
10	<i>Quercus</i> L.	374	1.5—69.7	2.2—32.6	0.6—15.5	0.6—24.4	0.3—14.3	468	0.5—69.2	1.8—34.1	0.1—41.2	Ia-Va
11	<i>Fagus</i> L.	218	0.9—55.0	2.2—28.8	0.7—12.3	1.0—19.9	0.3—51.8	208	1.5—52.8	1.7—39.0	0.1—51.8	Ib-Va
12	<i>Carpinus</i> L.	90	1.7—28.2	2.5—24.5	0.5—6.1	0.5—21.5	0.4—13.5	40	2.4—24.6	3.4—23.4	0.4—13.5	Ib-III
13	<i>Fraxinus</i> L.	75	1.7—57.6	2.5—36.0	0.6—10.4	0.6—22.1	0.4—13.5	52	1.8—37.0	3.1—35.0	0.2—52.7	Ib-III

\*Примечание. *D* и *D<sub>m</sub>* — диаметр ствола на высоте груди соответственно дерева и древостоя, см; *H* и *H<sub>m</sub>* — соответственно высота дерева и средняя высота древостоя, м; *D<sub>c</sub>* и *L<sub>c</sub>* — соответственно диаметр и длина кроны, м; *N* — число деревьев на 1 га, тыс. экз.; *SI* — класс бонитета. Подрод *Pinus* представлен двухвойными соснами, подрод *Haploxydon* — пятихвойными соснами.

$$\ln D = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_c + a_3 \ln L_c, \quad (3)$$

$$\ln D = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_c. \quad (4)$$

Результаты расчета моделей (3) и (4) даны в табл. 2. Все регрессионные коэффициенты в модели (3) положительны в силу известной аллометрической связи между размерами различных органов растений (Gould, 1966). В ходе расчетов обнаружилось, что из трех независимых переменных модели (3) длина кроны, во-первых, вносит наименьший вклад в объяснение изменчивости *D* и, во-вторых, она статистически значима не для всех родов. При одних и тех же значениях высоты дерева и диаметра кроны положительный знак при переменной длины кроны означает кроме того, что увеличение длины кроны и соответствующей ее “парусности” способствует увеличению диаметра ствола по условию сопротивления изгибу. В модели (3) высота дерева и диаметр кроны в среднем по всем родам берут на себя 84% и длина кроны 16% изменчивости *D*.

Согласно результатам анализа модели (4), аллометрическая двухфакторная связь диаметра ствола с высотой дерева и диаметром кроны характеризуется коэффициентами детерминации у всех родов от 0.90 до 0.96, за исключением липы, у которой названный коэффициент составил лишь 0.71. Остаточная (необъясненная) дисперсия приходится на неучтенные факторы — положение дерева в пологе, сомкнутость полога и степень конкурентных отношений деревьев, разнообразие эдафических условий. Соотношение долей вкладов высоты дерева и диаметра кроны в объяснение изменчивости *D* в моделях (4) в среднем по родам составило 73% к 27%.

Таким образом, вопреки имеющимся рекомендациям при оценке *D* привлекать в качестве независимых переменных дополнительно к высоте дерева и диаметру кроны иные морфометрические показатели (Bi et al., 2012; Cao, Dean, 2013), было установлено, что при включении в модель в качестве независимых переменных только высоты дерева и диаметра кроны изменчивость *D* по совокупности 12 родов (за исключением липы) объясняется на уровне 90–96%, и привлекать в модель дополнительно длину кроны и иные дендрометрические показатели нет оснований: это практически не повышает адекватности модели, но требует дополнительных затрат средств и времени.

Необходимо отметить, что модели, аналогичные по структуре моделям (4), были получены ранее по материалам первого варианта авторской базы данных (Усольцев, 2016б), включающего данные 7325 деревьев. Используемый в данном исследовании ее последний вариант включает 15800 деревьев. В обоих случаях не все деревья имели необходимый набор исходных данных и поэтому не все были включены в анализ. Тем не менее модели, полученные в данном исследовании по вдвое большему исходному

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа моделей (3) и (4)

№	Род (подрод)	Характеристика модели (3)					Характеристика модели (4)				
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	SE	$a_0$	$a_1$	$a_2$	adjR <sup>2</sup>	SE
1	<i>Pinus</i>	-0.0391	0.7334	0.4157	0.2534	0.216	0.0267	0.8507	0.5111	0.912	0.227
2	<i>Picea</i>	-0.1663	0.7612	0.3124	0.2585	0.172	-0.0964	0.9093	0.3917	0.959	0.184
3	<i>Abies</i>	-0.0926	0.8719	0.3351	0.1022	0.182	-0.0650	0.9472	0.3301	0.947	0.183
4	<i>Larix</i>	—	—	—	—	—	-0.4496	1.0039	0.4891	0.947	0.215
5	<i>Haploxydon</i>	0.1731	0.4879	0.3443	0.4580	0.185	0.2656	0.7815	0.4686	0.935	0.194
6	<i>Betula</i>	-0.8722	0.9761	0.2624	0.2324	0.181	-0.8366	1.1016	0.3417	0.929	0.191
7	<i>Populus</i>	-0.6615	0.8323	0.4327	0.2387	0.187	-0.5581	0.9101	0.5475	0.936	0.193
8	<i>Alnus</i>	-1.1497	1.2435	0.2225	0.0755	0.173	-1.1383	1.2821	0.2486	0.903	0.173
9	<i>Tilia</i>	-1.3066	1.2380	0.1825	0.1768	0.218	-1.4598	1.4455	0.1718	0.712	0.222
10	<i>Quercus</i>	-0.4569	0.9741	0.2166	0.1824	0.178	-0.5734	1.1540	0.1883	0.927	0.199
11	<i>Fagus</i>	-0.5876	0.7046	0.2960	0.4464	0.212	-0.6519	1.0193	0.3980	0.910	0.244
12	<i>Carpinus</i>	—	—	—	—	—	-1.1701	1.1385	0.4984	0.922	0.177
13	<i>Fraxinus</i>	—	—	—	—	—	-0.7986	1.1435	0.2354	0.903	0.226

\*Примечание. Поскольку в модели (3) переменная (lnLc) для лиственницы, граба и ясени оказалась незначимой на уровне вероятности  $P < 0.05$ , модели (3) для названных трех родов не показаны.

материалу, можно считать более адекватными реальной ситуации. Кроме того, упомянутые модели по первому варианту не были скорректированы на логарифмическое преобразование (Baskerville, 1972), а коэффициент детерминации не был скорректирован на число переменных. Наконец, для некоторых пород модели были рассчитаны по недостаточному количеству исходных данных (до 7 деревьев), и в данной работе эти породы не были рассмотрены.

*Модель (2) на уровне древостоя.* При расчете модели (2) оказалось (табл. 3), что коэффициенты детерминации по 13 родам находятся в пределах от 0.91 до 0.97, а регрессионные коэффициенты значимы на уровне вероятности  $P < 0.999$ . Остаточная дисперсия (от 3 до 9% общей изменчивости) приходится на неучтенные факторы — разный видовой и возрастной состав древостоев, разные эдафические условия. Названные неучтенные факторы, такие, как возраст древостоя, класс бонитета, запас, не поддаются непосредственной регистрации при дистанционном зондировании. В частности, возможное включение в модель (2) возраста или класса бонитета в качестве дополнительных независимых переменных вряд ли снизило бы остаточную дисперсию, и так составляющую всего 3—9% общей изменчивости искомых показателей. К тому же в крайних условиях произрастания, представленных в используемой базе данных классами бонитета в основном от Ia-Ib до Va-Vb (табл. 1), влияние класса бонитета в какой-то степени опосредуется сочетанием средней высоты и густоты древостоя. В противном случае трудно было бы объяснить столь низкий уровень (3—9%) остаточной дисперсии моделей (2).

В этой связи были разработаны трансконтинентальные модели для оценки возраста деревьев и древостоев по морфометрии крон и полога, структура которых достаточно обоснована и была аналогичной структуре моделей (2) настоящего исследования (Усольцев, 2024). По-видимому, вследствие невозможности определения класса бонитета и запаса стволовой древесины по морфометрии полога, измеренной дистанционными методами, предстоит построить подобные модели для оценки и класса бонитета, и запаса, тем более, что имеющаяся база данных (Усольцев, 2023б) такую возможность предоставляет. В перспективе наличие совокупности моделей, включающих в качестве зависимых переменных основные таксационные показатели древостоев, недоступные для лазерного зондирования, а в качестве независимых переменных — морфометрические показатели, доступные для лазерного зондирования, открывает новые возможности и новое направление в использовании лазерных технологий совокупно с имеющейся сводкой 590 таблиц биологической продуктивности лесообразующих пород, дифференцированной по 50 экорегионам Северной Евразии (Усольцев, 2002). Названные таблицы имеют входами таксационные показатели, которые путем стыковки с моделями, аналогичными модели (2),

имеющими в качестве независимых переменных морфометрические показатели полого, могут быть применены для оценки фитомассы и углеродных пулов древостоев на обширных территориях в режиме реального времени.

Необходимо отметить, что при использовании аналогичной модели по пяти древесным породам в США объясненная изменчивость  $D_m$  варьировала в диапазоне от 49 до 71% (Parker, Evans, 2004). Столь низкие показатели, по сравнению с нашими (91—97%), возможно, объясняются тем, что в нашем анализе использовали традиционные наземные замеры высоты и густоты древостоев, тогда как показатели упомянутых пяти пород в США оценивали с помощью бортового лидара (Magnussen, Boudewyn, 1998; Young, 2000; Harrington, 2001). Смещение оценок средней высоты обусловлено тем, что при наземном способе средняя высота определяется как взвешенная по сумме площадей сечений стволов, а при лидарном — по разности сигналов, отраженных от земли и верхушек деревьев; неопределенность с определением числа деревьев на единице площади лидарным способом может быть усугублена при вертикальной сомкнутости полого, особенно при наличии подлеска.

Включение в модель густоты древостоя дополнительно к его высоте по упомянутым пяти породам США увеличило объясненную изменчивость  $D_m$  на величину от 1 до 17%, а по ели Энгельмана увеличения не было (Parker, Evans, 2004). Согласно анализу наших данных по 13 родам, долевые вклады  $H_m$  и  $N$  в объяснение изменчивости  $D_m$  составили в среднем соответственно 63 и 37%.

В результате параллельного обзора применяемых структур моделей как для  $D$ , так и для  $D_m$  на локальных уровнях, была показана их фактическая идентичность при двух разных способах оценки морфометрии дерева или древостоя, что дает возможность использования моделей, полученных на основе

наземных измерений, для валидации моделей, полученных по лидарной технологии. Как уже упоминалось, моделям обоих типов свойственны ошибки, меньшие при наземной и более выраженные при лидарной оценке. По-видимому, возможно прямое применение предложенных моделей (4) в лидарных технологиях путем непосредственного включения в них лидарных оценок высот деревьев и диаметров крон в качестве независимых переменных при условии предварительной оценки возможных суммарных ошибок и смещений в результате совмещения наземных (по моделям) и дистанционных (реальных) измерений. Сказанное можно отнести и к моделям (2) на уровне древостоев. С другой стороны, модели, построенные на уровне родов в масштабах Северной Евразии, могут быть использованы для валидации моделей, построенных по данным лидарного зондирования той или иной совокупности деревьев на пробных площадях (модели 4) и той или иной совокупности древостоев (модели 2) в конкретном регионе. Это особенно актуально ввиду отсутствия наземных измерений морфологии деревьев и древостоев по большинству из существующих видов и местопроизрастаний.

Применение методов машинного обучения (Besnard et al., 2021; Smolina et al., 2023) и разработка автоматизированных алгоритмов, исключающих выше названные ошибки и смещения или существенно их снижающих (Sexton et al., 2009; Алтынцев, Сабер, 2021), повысит результативность предложенных моделей при их совмещении с данными лидарной регистрации морфологии лесного полого. Хорошие перспективы использования разработанных моделей открываются при совмещении нескольких методов оценки морфоструктуры деревьев и древостоев, в частности, по фотограмметрическим и наземным лидарным данным (Кабонен, Иванова, 2023), по фотограмметрическим и бортовым лидарным данным

Таблица 3. Результаты регрессионного анализа моделей (2)

№	Род (подрод)	Характеристика модели (2)				
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	adjR <sup>2</sup>	SE
1	<i>Pinus</i>	1.0414	0.6699	−0.2628	0.954	0.146
2	<i>Picea</i>	0.6523	0.8123	−0.1699	0.935	0.165
3	<i>Abies.</i>	0.3943	0.9190	−0.1230	0.926	0.170
4	<i>Larix</i>	0.3352	0.9091	−0.1579	0.912	0.184
5	<i>Haploxylon</i>	0.3363	0.9978	−0.1310	0.942	0.208
6	<i>Betula</i>	0.6614	0.7447	−0.2566	0.962	0.145
7	<i>Populus</i>	0.9650	0.6711	−0.3378	0.960	0.165
8	<i>Alnus</i>	0.3028	0.8908	−0.2089	0.953	0.133
9	<i>Tilia</i>	0.6983	0.8057	−0.2292	0.968	0.111
10	<i>Quercus</i>	0.5451	0.8509	−0.2620	0.947	0.179
11	<i>Fagus</i>	1.7689	0.4039	−0.4089	0.952	0.152
12	<i>Carpinus</i>	0.0649	0.9372	−0.1840	0.909	0.156
13	<i>Fraxinus</i>	0.4659	0.8354	−0.2668	0.966	0.141



(Бойко, Караган, 2021) или по гиперспектральным изображениям и БПЛА-лидарным метрикам (Pereira Martins-Neto et al., 2023).

Предложенные модели (4) для оценки диаметра ствола по морфометрии крон дают возможность использовать их (совокупно с имеющимися многочисленными нормативами для оценки фитомассы деревьев) для определения подеревной фитомассы посредством дронов на некоторой территории в режиме реального времени. Предложенные модели (2) для оценки среднего диаметра ствола, аналогичные моделям для оценки возраста древостоев (Усольцев, 2024) и будущие аналогичные модели для оценки класса бонитета и запаса древостоев дают возможность использовать их (совокупно с имеющимся набором региональных таблиц биологической продуктивности древостоев) для определения фитомассы и углеродных пулов на обширных территориях в режиме реального времени.

## ВЫВОДЫ

1. По данным морфометрии 5320 модельных деревьев 13 лесобразующих родов Евразии, полученным традиционной наземной таксацией, разработаны модели для оценки диаметра ствола на высоте груди по высоте дерева и диаметру кроны, характеризующие коэффициентом детерминации в диапазоне от 0.90 до 0.96. Исключение составляет липа, у которой названный коэффициент составил лишь 0.71. Вклады высоты дерева и диаметра кроны в объяснение изменчивости диаметра ствола в среднем составили соответственно 73 и 27%.

3. По данным морфометрии полога 5817 насаждений 13 лесобразующих родов Евразии, полученным традиционной наземной таксацией, разработаны модели для оценки среднего диаметра ствола на высоте груди по средней высоте древостоя и числу деревьев на 1 га, характеризующие коэффициентом детерминации в диапазоне от 0.91 до 0.97. Долевые вклады средней высоты древостоев и их густоты в объяснение изменчивости среднего диаметра стволов составили в среднем соответственно 63 и 37%.

4. Предложенные модели могут быть использованы для валидации моделей, построенных по данным дистанционного зондирования той или иной совокупности деревьев на пробных площадях (модели 4) и той или иной совокупности древостоев (модели 2) в конкретном регионе. Это особенно актуально ввиду отсутствия наземных измерений морфологии деревьев и древостоев по большому числу существующих видов и местопроизрастаний.

5. Использование предложенных моделей по результатам дистанционной регистрации морфологии крон и полога дает возможность оценки фитомассы и углеродного пула деревьев и древостоев на некоторых территориях в режиме реального времени путем их совмещения с имеющимися нормативными

материалами, предназначенными для определения фитомассы деревьев и древостоев.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев М.А., Сабер К.Х.М. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2021. № 3. С. 5—19.
- Антанайтис В.В., Манкус Р., Шяпетене Я.А. Закономерности лесной таксации: Методическое пособие. Каунас: Литовская сельскохозяйственная академия, 1976. С. 5—10.
- Антанайтис В.В., Тябера А.П., Шяпетене Я.А. Законы, закономерности роста и строения древостоев: Методическое пособие. Каунас: Литовская сельскохозяйственная академия, 1986. 157 с.
- Бойко Е.С., Караган А.В. Цифровое моделирование древесно-кустарниковой растительности аккумулятивных берегов по данным воздушного лазерного сканирования // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2021. № 2. С. 103—114.
- Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса: Учебное пособие. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2005. 182 с.
- Демидов В.Э. Применение воздушного лазерного сканирования для картирования рельефа, поиска следов антропогенного воздействия и изучения растительного покрова на территории Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича. 2021. № 28. С. 74—82.
- Иванова Н.В., Шашков М.П., Шанин В.Н. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 54. С. 158—175.
- Кабонен А.В., Иванова Н.В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного LiDAR и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2023. Т. 8. № 1. С. 64—83.
- Ковязин В.Ф., Виноградов К.П., Киценко А.А., Васильева Е.А. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. № 6. С. 42—54.
- Лескинен П., Линднер М., Веркерк П.-Й., Набуурс Г.-Я., ван Брусселен Й., Куликова Е., Хассегава М., Леринк Б. Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука. 11. Европейский институт леса, 2020. 140 с. <https://doi.org/10.36333/wsctul1>
- Лиена И.Я. Динамика древесных запасов: Прогнозирование и экология. Рига: Зинатне, 1980. 170 с.

- Мак-Лоун Р.Р. Математическое моделирование — искусство применения математики // Математическое моделирование. М.: Мир, 1979. С. 9—20.
- Мошкалева А.Г., Давидов Г.М., Яновский Л.Н., Моисеев В.С., Столяров Д.П., Бурневский Ю.И. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР. Л.: ЛТА, 1984. 319 с.
- Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.
- Усольцев В.А. Перспективы 3D-моделирования пространственной структуры фитомассы лесов // Эко-потенциал. 2014. № 2. С. 55—71. <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3356/1/Usoltsev.pdf>
- Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: База данных и география. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 708 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>
- Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: Нормативы и элементы географии. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. 762 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>
- Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>
- Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>
- Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесобразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016а. 384 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5634>
- Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: База данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016б. 336 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>
- Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023а. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>
- Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023б. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>
- Усольцев В.А. Модели для оценки возраста деревьев и древостоев лесобразующих видов Евразии по морфометрии крон и полога, доступной для воздушного лазерного сканирования // Биосфера. 2024. № 4. С. 399—406.
- Усольцев В.А., Цепордей И.С., Часовских В.П. Модели для оценки биомассы деревьев лесобразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41. № 4. С. 300—305.
- Усольцев В.А., Цепордей И.С. Возрастные изменения в структуре надземной фитомассы лесобразующих видов Евразии // Лесоведение. 2023. № 6. С. 563—576. DOI: 10.31857/S0024114823060116, EDN: EHRIEL
- Усольцев В.А., Цепордей И.С., Плюха Н.И. Взаимосвязи диаметров ствола и кроны лесобразующих видов Евразии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 176—199. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.176-199.
- Цепордей И.С. Биологическая продуктивность лесобразующих видов в климатическом контексте Евразии. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2023. 467 с. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.
- Юнсон Э.В., Мельничук Д.Ю. Цифровой двойник лесного массива // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 6. С. 1—5.
- Assman E. Die Bedeutung des “erweiterten Eichhorn’schen Gesetzes” für die Kontrolle von Fichten Ertragstafeln // Forstwissenschaftliches Centralblatt. 1955. V. 74. P. 321—330.
- Assmann E. Waldertragskunde: Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München, Bonn, Wien: BLV Verlagsgesellschaft, 1961. 492 p.
- Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. V. 2. № 1. P. 49—53.
- Besnard S., Koirala S., Santoro M., Weber U., Nelson J., Güter J., Herault B., Kassi J., N’Guessan A., Neigh C., Poulter B., Zhang T., Carvalhais N. Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data // Earth System Science Data. 2021. V. 13. P. 4881—4896.
- Bi H., Fox J.C., Li Y., Lei Y., Pang Y. Evaluation of non-linear equations for predicting diameter from tree height // Canadian Journal of Forest Research. 2012. V. 42. P. 789—806.
- Brandeis T., Randolph K.C., Strub M.R. Modelling Caribbean tree stem diameters from tree height and crown width measurements // Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences. 2009. V. 1. № 2. P. 78—85.
- Cao Q.V., Dean T.J. Predicting diameter at breast height from total height and crown length: Proceedings of the 15th biennial southern silvicultural research conference. Asheville, NC: U.S.D.A. Forest Service, Southern Research Station. Tech. Rep. SRS-GTR-175, 2013. P. 201—205.

- Chang A., Jung J., Kim Y. Estimation of forest stand diameter class using airborne lidar and field data // Remote Sensing Letters. 2015. V. 6. № 6. P. 419–428.
- Coops N.C., Tompalski P., Goodbody T.R.H., Queinnec M., Luther J.E., Bolton D.K., White J.C., Wulder M.A., van Lier O.R., Hermosilla T. Modelling LiDAR-derived estimates of forest attributes over space and time: a review of approaches and future trends // Remote Sensing. 2021. V. 260. Article 112477.
- Dean T.J., Cao Q.V., Roberts S.D., Evans D.L. Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand // Forest Ecology and Management. 2009. V. 257. № 1. P. 126–133.
- Dean T.J., Long J.N. Validity of constant-stress and elastic-instability principles of stem formation in *Pinus contorta* and *Trifolium pretense* // Annals of Botany. 1986. V. 58. P. 833–840.
- Drake J.B., Dubayah R.O., Knox R.G., Clark D.B., Blair J.B. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 81. P. 378–392.
- Eichhorn F. Ertragstafeln für die Weißtanne. Berlin: Springer, 1902. 118 p.
- Eichhorn F. Beziehungen zwischen Bestandeshöhe und Bestandesmasse // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1904. V. 80. P. 45–49.
- Filipescu C.N., Groot A., MacIsaac D.A., Cruickshank M.G., Stewart J.D. Prediction of diameter using height and crown attributes: a case study // Western Journal of Applied Forestry. 2012. V. 27. № 1. P. 30–35.
- Fu L., Duan G., Ye Q., Meng X., Luo P., Sharma R.P., Sun H., Wang G., Liu Q. Prediction of individual tree diameter using a nonlinear mixed-effects modeling approach and airborne LiDAR data // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 1066.
- Galvencio J.D., Popescu S.C. Measuring individual tree height and crown diameter for mangrove trees with airborne lidar data // International Journal of Advanced Engineering, Management and Science. 2016. V. 2. № 5. P. 431–443.
- Gavrikov V.L. A simple theory to link bole surface area, stem density and average tree dimensions in a forest stand // European Journal of Forest Research. 2014. V. 133. № 6. P. 1087–1094.
- Gerhardt E. Über Bestandes- Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1909. V. 85. P. 117–128.
- Gerhardt E. Zur Ertragstafelfrage: Eine dreiteilige Fichtenertragstafel // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1928. V. 104. P. 377–386.
- Global Mapper: Getting Started Guide. Blue Marble Geographics, 2018. 24 p. Available at: <https://www.bluemarblegeo.com/docs/guides/global-mapper-19-gettingstarted-guide-en.pdf>.
- Gonzalez-Benecke C.A., Fernández M.P., Gayoso J., Pincheira M., Wightman G. Using tree height, crown area and stand-level parameters to estimate tree diameter, volume, and biomass of *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* // Forests. 2022. V. 13. № 12. Article 2043.
- Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Samuelson L.J., Cropper W.P., Leduc D.J., Martin T.A. Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters // Journal of Forestry Research. 2014. V. 25. № 1. P. 43–52.
- Gould S. Allometry and size in ontogeny and phylogeny // Biological Reviews. 1966. V. 41. № 4. P. 587–640.
- Hao Y., Widagdo F.R.A., Liu X., Quan Y., Dong L., Li F. Individual tree diameter estimation in small-scale forest inventory using UAV laser scanning // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 13. Article 24.
- Harding D.J., Lefsky M.A., Parker G.G., Blair J.B. Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests // Remote Sensing of Environment. 2001. V. 76. P. 283–297.
- Harrington R. Comparison of field- and LIDAR-derived tree crown parameters in mid-rotation loblolly pine. M. Sc. thesis, Mississippi State University, Mississippi State, MS, 2001. 43 p.
- Inoue A., Koyama R., Koshikawa K., Yamamoto K. Comparison of models for estimating stem surface area of coniferous trees grown in old-growth natural forests // Journal of Forestry Research. 2021. V. 26. № 1. P. 1–6.
- Inoue A., Nishizono T. Conservation rule of stem surface area: a hypothesis // European Journal of Forest Research. 2015. V. 134. № 4. P. 599–608.
- Jerez Rico M. Modeling canopy structure effects on loblolly pine growth. 2002. LSU Doctoral Dissertations. 79 p. [https://repository.lsu.edu/gradschool\\_dissertations/837](https://repository.lsu.edu/gradschool_dissertations/837)
- Kalliovirta J., Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information // Silva Fennica. 2005. V. 39. P. 227–248.
- Lee D., Choi J. Evaluating maximum stand density and size–density relationships based on the competition density rule in Korean pines and Japanese larch // Forest Ecology and Management. 2019. V. 446. P. 204–213.
- Lee S.-H., Kim D.-H., Jeong J.-H., Han S.-H., Kim S., Park H.-J., Kim H.-J. Developing a yield table and analyzing the economic feasibility for *Acacia* hybrid plantations in achieving carbon neutrality in southern Vietnam // Forests. 2022. V. 13. № 8. Article 1316.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Acker S.A., Parker G.G., Spies T.A., Harding D. LIDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 70. P. 339–361.
- Li W., Duveiller G., Wieneke S., Forkel M., Gentile P., Reichstein M., Niu S., Migliavacca M., Orth R. Regulation of the global carbon and water cycles through vegetation structural and physiological dynamics // Environmental Research Letters. 2024. V. 19. Article 073008.

- Luo Y., Wang X., Ouyang Z., Lu F., Feng L., Tao J. A review of biomass equations for China's tree species // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 1. P. 21–40.
- Luoma V., Saarinen N., Wulder M.A., White J.C., Vastaranta M., Holopainen M., Hyypä J. Assessing precision in conventional field measurements of individual tree attributes // *Forests*. 2017. V. 8. № 2. Article 38.
- Magin R. Möglichkeiten der dynamischen Bonitierung im Hinblick auf die künftige Einheitsbewertung // *Allgemeine Forst Zeitschrift*. 1955. V. 10. P. 122–124.
- Magnussen S., Boudewyn P. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators // *Canadian Journal of Forest Research*. 1998. V. 28. № 7. P. 1016–1031.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkänen J., Yu X. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. V. 34. № 9. P. 1791–1801.
- Means J.E., Acker S.A., Fitt J.B., Renslow M., Emerson L., Hendrix C.J. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LiDAR // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2000. V. 66. P. 1367–1371.
- Metzger K. Der Wind als massgebender Faktor für das Wachstum der Bäume // *Mündener Forstliche Hefte*. 1893. V. 3. P. 35–86.
- Moriguchi K., Ueki T., Saito M. Responses of spacing indices for relative yield based on the reciprocal competition-density effect // *Forest Science*. 2017. V. 63. № 5. P. 485–495.
- Newton P.F. Stand density management diagrams: modelling approaches, variants, and exemplification of their potential utility in crop planning // *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. V. 51. № 2. P. 236–256.
- Özdemir İ. Estimation of forest stand parameters using airborne LIDAR data // *SDU Faculty of Forestry Journal*. 2013. V. 14. P. 31–39.
- Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. V. 38. № 8–10. P. 2392–2410.
- Parker R.C., Evans D.L. An application of LiDAR in a double-sample forest inventory // *Western Journal of Applied Forestry*. 2004. V. 19. № 2. P. 95–101.
- Parker R.C., Mitchel A.L. Smoothed versus unsmoothed LiDAR in a double-sample forest inventory // *Southern Journal of Applied Forestry*. 2005. V. 29. № 1. P. 40–47.
- Pereira Martins-Neto R., Garcia Tommaselli A.M., Imai N.N., Honkavaara E., Miltiadou M., Saito Moriya E.A., David H.C. Tree species classification in a complex Brazilian tropical forest using hyperspectral and LiDAR data // *Forests*. 2023. V. 14. № 5. Article 945. <https://doi.org/10.3390/f14050945>
- 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. V. 208. № 3. P. 736–749.
- Popescu S.C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar // *Biomass and Bioenergy*. 2007. V. 31. P. 646–655.
- Salas C., Ene L., Gregoire T.G., Næsset E., Gobakken T. Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: A comparison of spatial statistical models // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 1277–1285.
- Sexton J.O., Bax T., Siqueira P., Swenson J.J., Hensley S. A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America // *Forest Ecology and Management*. 2009. V. 257. P. 1136–1147.
- Sharma R.P., Bílek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the Central Europe // *Trees – Structure and Function*. 2017. V. 31. P. 1875–1889.
- Smolina A., Illarionova S., Shadrin D., Kedrov A., Burnaev E. Forest age estimation in northern Arkhangelsk region based on machine learning pipeline on Sentinel-2 and auxiliary data // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. Article 22167.
- Stereńczak K., Mielcarek M., Wertz B., Bronisz K., Zajczkowski G., Jagodziński A.M., Ochał W., Skorupski M. Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species // *Journal of Environmental Management*. 2019. V. 231. P. 1284–1292.
- Sun Y., Jin X., Pukkala T., Li F. Predicting individual tree diameter of larch (*Larix olgensis*) from UAV–LiDAR data using six different algorithms // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 1125.
- Ter-Mikaelian M.T., Korzukhin M.D. Biomass equations for sixty-five North American tree species // *Forest Ecology and Management*. 1997. V. 97. P. 1–24.
- Thomasius H. Untersuchungen über die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen für die quantitative Standortsbeurteilung // *Archiv für Forstwesen*. 1963. V. 12. № 12. P. 1267–1323.
- Umeki K., Inoue A. A model for predicting mean diameter at breast height from mean tree height and stand density // *Journal of Forest Research*. 2024. V. 29. № 3. P. 186–195.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology // *Science*. 1997. V. 276. P. 122–126.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system // *Nature*. 1999. V. 400. P. 664–667.
- Whitfield J. All creatures great and small // *Nature*. 2001. V. 413. P. 342–344.
- Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation // *Tree Physiology*. 2004. V. 24. P. 121–139.

- Xu Q., Li B., Maltamo M., Tokola T., Hou Z.* Predicting tree diameter using allometry described by non-parametric locally-estimated copulas from tree dimensions derived from airborne laser scanning // *Forest Ecology and Management*. 2019. V. 434. P. 205—212.
- Yao W., Krull J., Krzystek P., Heurich M.* Sensitivity analysis of 3D individual tree detection from LiDAR point clouds of temperate forests // *Forests*. 2014. V. 5. P. 1122—1142.
- Young B.* Comparison of field and LiDAR measurements of loblolly pine. M. Sc. thesis, Mississippi State University, Mississippi State, MS, 2000. 76 p.
- Zagalikis G., Cameron A.D., Miller D.R.* The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics // *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. V. 35. № 5. P. 1224—1237.
- Zianis D., Mencuccini M.* On simplifying allometric analyses of forest biomass // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 187. № 2—3. P. 311—332.

## Crown's and Canopy's Morphometry-Based Estimation Models for the Tree's and Stand's Trunk Diameter of Forest-Forming Species of Northern Eurasia Available for Lidar Scanning

V. A. Usoltsev<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russia*

<sup>2</sup>*Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia*

*\*E-mail: Usoltsev50@mail.ru*

Within the framework of climate-smart forestry, accurate information on phytomass and carbon deposition capacity of forests is necessary. To date, many empirical models have been published and many taxation standards have been compiled to assess the trees' and stands' phytomass based on morphometric indicators measured in sample plots. However, using them in order to assess the carbon-depositing capacity of forests across large areas by means of traditional land-based forest inventory is quite a laborious undertaking. The laser (lidar) technology may be used as an alternative, but it does not allow determining the main mass-forming parameters — the tree trunk's diameters or the average trunk diameter within the stand. To combine traditional empirical models and tables of phytomass with remote sensing data, intermediate models are needed to estimate the diameter of the tree trunk or the average trunk diameter within the stand, depending on the morphometry of the canopy, recorded either by terrestrial methods or remotely. The purpose of this study was to design the models of the tree trunk's diameter's dependence and the average trunk diameter within the stand on the main morphometric indicators of the canopy, obtained by ground measurements, but also available for lidar scanning. The models are constructed at the level of genera as aggregates of vicarious species. The materials of two previously compiled databases on phytomass and morphometric structure of 5320 trees and 5817 stands of Eurasia were used as the initial data for the study. Two-factor allometric dependences were constructed for 13 genera: (a) the stem diameter at breast height relation to the height of the tree and the diameter of the crown and (b) the average trunk diameter of the stand relation to the average tree height and stand's density, explaining in most cases from 90 to 97% of the dependent variable's variability. The proposed models based on traditional ground-based taxation data can be directly applied in lidar technologies or used to validate models based on lidar sensing data. This is especially important due to the lack of ground-based measurements of tree and stand morphometry for most existing species and habitats. The use of the proposed models based on the results of remote registration of crown and canopy morphology makes it possible to assess the phytomass and carbon pool of trees and stands in some territories in real time by combining them with available standards and specifications for determining the phytomass of trees and stands.

**Keywords:** *Pinus L., Picea L., Abies Mill., Larix Mill., Haploxylon (Koehne) Pilg., Betula L., Populus L., Alnus Gaertn., Tilia L., Quercus L., Fagus L., Carpinus L., Fraxinus L., trunk diameter at breast height, average trunk diameter of the stand, crown and canopy morphometry, allometric models.*

**Acknowledgements:** The study has been carried out in accordance with the State contract with the UB RAS Botanical Garden.

## REFERENCES

- Altyn'tsev M.A., Saber K. Kh.M., Metodika avtomatizirovannoi fil'tratsii dannykh mobil'nogo lazernogo skanirovaniya (The technique of automated filtering of mobile laser scanning data), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosystem i tekhnologii*, 2021, No. 3, pp. 5–19.
- Antanaitis V.V., Vvedenie (Introduction). In: *Zakonomernosti lesnoi taksatsii: Metodicheskoe posobie* (Patterns of forest taxation: A methodological guide), Kaunas: Lithuanian Agricultural Academy, 1976, pp. 5–10.
- Antanaitis V.V., Tyabera A.P., Shyapetene Ya.A., *Zakony, zakonomernosti rosta i stroeniya drevostoev: Metodicheskoe posobie* (Laws, patterns of growth and structure of stands: A methodological guide), Kaunas: Lithuanian Agricultural Academy, 1986. 157 p.
- Assman E., Die Bedeutung des "erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes" für die Kontrolle von Fichten Ertragstafeln, *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 1955, Vol. 74, pp. 321–330.
- Assmann E., *Waldertragskunde: Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen*, München, Bonn, Wien: BLV Verlagsgesellschaft, 1961, 492 p.
- Baskerville G.L., Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass, *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, Vol. 2, pp. 49–53.
- Besnard S., Koirala S., Santoro M., Weber U., Nelson J., Gütter J., Herault B., Kassi J., N'Guessan A., Neigh C., Poulter B., Zhang T., Carvalhais N., Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data, *Earth System Science Data*, 2021, Vol. 13, pp. 4881–4896.
- Bi H., Fox J.C., Li Y., Lei Y., Pang Y., Evaluation of nonlinear equations for predicting diameter from tree height, *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, Vol. 42, pp. 789–806.
- Boyko E.S., Karagyan A.V., Tsifrovoe modelirovanie drevosno-kustarnikovoï rastitel'nosti akkumulyativnykh beregov po dannym vozdušnogo lazernogo skanirovaniya (Digital modeling of tree and shrub vegetation of accumulative shores based on aerial laser scanning data), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosystem i tekhnologii*, 2021, No. 2, pp. 103–114.
- Brandeis T., Randolph K.C., Strub M.R., Modelling Caribbean tree stem diameters from tree height and crown width measurements, *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences*, 2009, Vol. 1, No. 2, pp. 78–85.
- Cao Q.V., Dean T.J., Predicting diameter at breast height from total height and crown length, *Proceedings of the 15th biennial southern silvicultural research conference*, Asheville, NC: U.S.D.A., Forest Service, Southern Research Station. Tech. Rep. SRS-GTR-175, 2013, pp. 201–205.
- Chang A., Jung J., Kim Y., Estimation of forest stand diameter class using airborne lidar and field data, *Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 6, No. 6, pp. 419–428.
- Chetyrkin E.M., *Statisticheskie metody prognozirovaniya* (Statistical forecasting methods), Moscow: Statistika, 1977, 200 p.
- Coops N.C., Tompalski P., Goodbody T.R.H., Quein-nec M., Luther J.E., Bolton D.K., White J.C., Wulder M.A., van Lier O.R., Hermosilla T., Modelling LiDAR-derived estimates of forest attributes over space and time: a review of approaches and future trends, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 260, Article 112477.
- Danilin I.M., Medvedev E.M., Melnikov S.R., *Lazernaya lokatsiya Zemli i lesa* (Laser location of the Earth and forests: A textbook), Krasnoyarsk: Institute of Forests SB RAS, 2005, 182 p.
- Dean T.J., Cao Q.V., Roberts S.D., Evans D.L., Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand, *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 257, pp. 126–133.
- Dean T.J., Long J.N. Validity of constant-stress and elastic-instability principles of stem formation in *Pinus contorta* and *Trifolium pretense*, *Annals of Botany*, 1986, Vol. 58, pp. 833–840.
- Demidov V.E., Primenenie vozdušnogo lazernogo skanirovaniya dlya kartirovaniya rel'efa, poiska sledov antropogennogo vozdeistviya i izucheniya rastitel'nogo pokrova na territorii Prioksko-terrasnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika (Application of aerial laser scanning for terrain mapping, search for traces of anthropogenic impact and study of vegetation cover on the territory of the Prioksko-Terrasny State Natural Biosphere Reserve), *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2021, No. 28, pp. 74–82.
- Drake J.B., Dubayah R.O., Knox R.G., Clark D.B., Blair J.B., Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 81, pp. 378–392.
- Eichhorn F., *Ertragstafeln für die Weißtanne*. Berlin: Springer, 1902, 118 p.
- Eichhorn F., Beziehungen zwischen Bestandeshöhe und Bestandesmasse, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1904, Vol. 80, pp. 45–49.
- Filipescu C.N., Groot A., MacIsaac D.A., Cruickshank M.G., Stewart J.D., Prediction of diameter using height and crown attributes: a case study, *Western Journal of Applied Forestry*, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 30–35.
- Fu L., Duan G., Ye Q., Meng X., Luo P., Sharma R.P., Sun H., Wang G., Liu Q., Prediction of individual tree diameter using a nonlinear mixed-effects modeling approach and airborne LiDAR data, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 1066.
- Galvencio J.D., Popescu S.C., Measuring individual tree height and crown diameter for mangrove trees with airborne lidar data, *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 2016, Vol. 2, No. 5, pp. 431–443.
- Gavrikov V.L., A simple theory to link bole surface area, stem density and average tree dimensions in a forest stand,

- European Journal of Forest Research*, 2014, Vol. 133, No. 6, pp. 1087–1094.
- Gerhardt E., Über Bestandes- Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1909, Vol. 85, pp. 117–128.
- Gerhardt E., Zur Ertragstafelfrage: Eine dreiteilige Fichten-ertragstafel, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1928, Vol. 104, pp. 377–386.
- Global Mapper: Getting Started Guide. Blue Marble Geographics, 2018, 24 p., available at: <https://www.bluemarblegeo.com/docs/guides/global-mapper-19-getting-started-guide-en.pdf> (October 13, 2019).
- Gonzalez-Benecke C.A., Fernández M.P., Gayoso J., Pincheira M., Wightman G., Using tree height, crown area and stand-level parameters to estimate tree diameter, volume, and biomass of *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*, *Forests*, 2022, Vol. 13, No. 12, Article 2043.
- Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Samuelson L.J., Cropper W.P., Leduc D.J., Martin T.A., Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters, *Journal of Forestry Research*, 2014, Vol. 25, pp. 43–52.
- Gould S., Allometry and size in ontogeny and phylogeny, *Biological Reviews*, 1966, Vol. 41, pp. 587–640.
- Hao Y., Widagdo F.R.A., Liu X., Quan Y., Dong L., Li F., Individual tree diameter estimation in small-scale forest inventory using UAV laser scanning, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 13, Article 24.
- Harding D.J., Lefsky M.A., Parker G.G., Blair J.B., Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 76, pp. 283–297.
- Harrington R., *Comparison of field- and LIDAR-derived tree crown parameters in mid-rotation loblolly pine*. M. Sc. thesis, Mississippi State University, Mississippi State, MS, 2001, 43 p.
- Inoue A., Koyama R., Koshikawa K., Yamamoto K., Comparison of models for estimating stem surface area of coniferous trees grown in old-growth natural forests, *Journal of Forestry Research*, 2021, Vol. 26, No. 1, pp. 1–6.
- Inoue A., Nishizono T. Conservation rule of stem surface area: a hypothesis, *European Journal of Forest Research*, 2015, Vol. 134, No. 4, pp. 599–608.
- Ivanova N.V., Shashkov M.P., Shanin V.N., Opređenje karakteristik smeshannykh drevostoev po dannym aerofotos'emki s primeneniem bespilotnogo letatel'nogo apparata (BPLA) (Determination of characteristics of mixed stands according to aerial photography using an unmanned aerial vehicle (UAV)), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2021, No. 54, pp. 158–175.
- Jerez Rico M., *Modeling canopy structure effects on loblolly pine growth*, 2002, LSU Doctoral Dissertations, 837, 79 p., available at: [https://repository.lsu.edu/gradschool\\_dissertations/837](https://repository.lsu.edu/gradschool_dissertations/837).
- Kabonen A.V., Ivanova N.V., Otsenka biometricheskikh karakteristik dereviev po dannym nazemnogo lidar i raznosezonnoj aerofotos'emki v iskusstvennykh nasazhdeniyakh (Assessment of biometric characteristics of trees according to ground lidar and multi-season aerial photography in artificial forest stands), *Nature Conservation Research. Zapovednaya Nauka*, 2023, No. 1, pp. 64–83.
- Kalliovirta J., Tokola T., Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information, *Silva Fennica*, 2005, Vol. 39, pp. 227–248.
- Kovyazin V.F., Vinogradov K.P., Kitsenko A.A., Vasilyeva E.A., Vozdushnoe lazernoe skanirvanie dlya utocneniya taksatsionnykh kharakteristik drevostoev (Aerial laser scanning to clarify the taxation characteristics of stands), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2020, No. 6, pp. 42–54.
- Lee D., Choi J., Evaluating maximum stand density and size–density relationships based on the competition density rule in Korean pines and Japanese larch, *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 446, pp. 204–213.
- Lee S.H., Kim D.H., Jeong J.H., Han S.H., Kim S., Park H.J., Kim H.J., Developing a yield table and analyzing the economic feasibility for *Acacia* hybrid plantations in achieving carbon neutrality in southern Vietnam, *Forests*, 2022, Vol. 13, No. 8, Article 1316.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Acker S.A., Parker G.G., Spies T.A., Harding D., LIDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, *Remote Sensing of Environment*, 1999, Vol. 70, pp. 339–361.
- Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.-Y., Nabours G.-Ya., van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B. (eds.), *Les Rossii i izmenenie klimata. Chto nam mozhets kazat' nauka?* (Forests of Russia and climate change. What can science tell us?), 11, European Forest Institute, 2020, 140 p. <https://doi.org/10.36333/wscu11>
- Li W., Duveiller G., Wieneke S., Forkel M., Gentine P., Reichstein M., Niu S., Migliavacca M., Orth R., Regulation of the global carbon and water cycles through vegetation structural and physiological dynamics, *Environmental Research Letters*, 2024, Vol. 19, Article 073008.
- Liepa I.Y., *Dinamika drevesnykh zapasov: prognozirovanie i ekologiya* (Dynamics of wood stocks: forecasting and ecology), Riga: Zinatne, 1980, 170 p.
- Luo Y., Wang X., Ouyang Z., Lu F., Feng L., Tao J., A review of biomass equations for China's tree species, *Earth System Science Data*, 2020, Vol. 12, No. 1, pp. 21–40.
- Luoma V., Saarinen N., Wulder M.A., White J.C., Vastaranta M., Holopainen M., Hyypä J., Assessing precision in conventional field measurements of individual tree attributes, *Forests*, 2017, Vol. 8, No. 2, Article 38.
- Magin R., Möglichkeiten der dynamischen Bonitierung im Hinblick auf die künftige Einheitsbewertung, *Allgemeine Forst Zeitschrift*, 1955, Vol. 10, pp. 122–124.
- Magnussen S., Boudewyn P., Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators, *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, Vol. 28, pp. 1016–1031.



- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkänen J., Yu X., The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve, *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, Vol. 34, pp. 1791—1801.
- McLone R.R., *Matematicheskoe modelirovanie — iskusstvo primeneniya matematiki (Mathematical modeling — the art of applying mathematics)*, In: *Matematicheskoe modelirovanie (Mathematical modeling)*, Moscow: Mir, 1979, pp. 9—20.
- Means J.E., Acker S.A., Fitt J.B., Renslow M., Emerson L., Hendrix C.J., Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, Vol. 66, pp. 1367—1371.
- Metzger K. Der Wind als massgebender Faktor für das Wachstum der Bäume, *Mündener forstliche Hefte*, 1893, Vol. 3, pp. 35—86.
- Moriguchi K., Ueki T., Saito M., Responses of spacing indices for relative yield based on the reciprocal competition-density effect, *Forest Science*, 2017, Vol. 63, No. 5, pp. 485—495.
- Moshkalev A.G., Davidov G.M., Yanovskiy L.N., Moiseyev V.S., Stolyarov D.P., Burnevskiy Yu.I., *Lesotaksatsionnyj spravochnik po Severo-Zapadu SSSR (Forest Inventory Handbook for the North-West of the USSR)*, Leningrad: LLTA, 1984, 319 p.
- Nalimov V.V., *Teoriya eksperimenta (Theory of experiment)*, Moscow: Nauka, 1971, 208 p.
- Newton P.F., Stand density management diagrams: modelling approaches, variants, and exemplification of their potential utility in crop planning, *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, Vol. 51, No. 2, pp. 236—256.
- Özdemir İ., Estimation of forest stand parameters using airborne LIDAR data, *SDU Faculty of Forestry Journal*, 2013, Vol. 14, pp. 31—39.
- Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V., Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2017, Vol. 38, No. 8—10, pp. 2392—2410.
- Parker R.C., Evans D.L., An application of LiDAR in a double-sample forest inventory, *Western Journal of Applied Forestry*, 2004, Vol. 19, pp. 95—101.
- Parker R.C., Mitchel A.L., Smoothed versus unsmoothed LiDAR in a double-sample forest inventory, *Southern Journal of Applied Forestry*, 2005, Vol. 29, pp. 40—47.
- Pereira Martins-Neto R., Garcia Tommaselli A.M., Imai N.N., Honkavaara E., Miltiadou M., Saito Moriya E.A., David H.C., Tree species classification in a complex Brazilian tropical forest using hyperspectral and LiDAR data, *Forests*, 2023, Vol. 14, Article 945. <https://doi.org/10.3390/f14050945>
- 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. 3, pp. 736—749.
- Popescu S.C., Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar, *Biomass and Bioenergy*, 2007, Vol. 31, pp. 646—655.
- Salas C., Ene L., Gregoire T.G., Næsset E., Gobakken T., Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: A comparison of spatial statistical models, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, pp. 1277—1285.
- Sexton J.O., Bax T., Siqueira P., Swenson J.J., Hensley S., A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America, *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 257, pp. 1136—1147.
- Sharma R.P., Bílek L., Vacek Z., Vacek S., Modelling crown width—diameter relationship for Scots pine in the Central Europe, *Trees — Structure and Function*, 2017, Vol. 31, pp. 1875—1889.
- Smolina A., Illarionova S., Shadrin D., Kedrov A., Burnaev E. Forest age estimation in northern Arkhangelsk region based on machine learning pipeline on Sentinel-2 and auxiliary data, *Scientific Reports*, 2023, Vol. 13, Article 22167.
- Stereńczak K., Mielcarek M., Wertz B., Bronisz K., Zajączkowski G., Jagodziński A.M., Ochał W., Skorupski M., Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species, *Journal of Environmental Management*, 2019, Vol. 231, pp. 1284—1292.
- Sun Y., Jin X., Pukkala T., Li F., Predicting individual tree diameter of larch (*Larix olgensis*) from UAV—LiDAR data using six different algorithms, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 1125.
- Ter-Mikaelian M.T., Korzukhin M.D., Biomass equations for sixty-five North American tree species, *Forest Ecology and Management*, 1997, Vol. 97, pp. 1—24.
- Thomasius H., Untersuchungen über die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen für die quantitative Standortsbeurteilung, *Archiv für Forstwesen*, 1963, Vol. 12, No. 12, pp. 1267—1323.
- Tsepordey I.S., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh vidov v klimaticheskoy kontekste Evrazii (Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia)* (edited by prof. V.A. Usoltsev), Yekaterinburg: Izdatel'stvo UMTS UPI, 2023, 467 p., available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- Umeki K., Inoue A., A model for predicting mean diameter at breast height from mean tree height and stand density, *Journal of Forest Research*, 2024, Vol. 29, No. 3, pp. 186—195.
- Usoltsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod v klimaticheskikh gradientakh Evrazii: k menezhmentu biosfernykh funktsij lesov (Biological productivity of forest-forming species in the climatic gradients of Eurasia: on the management of biospheric functions of forests)*, Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University, 2016a. 384 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5634>.



- Usoltsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoj Evrazii: Metody, baza dannykh i ee prilozheniya* (Biological productivity of forests of Northern Eurasia: Methods, database and its applications), Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 636 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>.
- Usoltsev V.A., *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* (Phytomass and primary production of Eurasian forests), Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010, 570 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>.
- Usoltsev V.A., *Fitomassa lesov Severnoj Evrazii: baza dannykh i geografiya* (Phytomass of forests of Northern Eurasia: database and geography), Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001, 708 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>.
- Usoltsev V.A., *Fitomassa lesov Severnoj Evrazii: Normativy i elementy geografii* (Phytomass of forests of Northern Eurasia: Standards and elements of geography), Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002, 762 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>.
- Usoltsev V.A., *Fitomassa model'nykh dereviev dlya distantsionnoj i nazemnoj taksatsii lesov Evrazii. Elektronnaya baza dannykh. 3-e dopolnennoe izdanie*. (Phytomass of model trees for remote and terrestrial forest taxation in Eurasia. An electronic database. 3rd expanded edition), Yekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forestry University, 2023a, 1 electron. opt. disk (CD-ROM), available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.
- Usoltsev V.A., *Biomass and primary production of Eurasian forests*. An electronic database. 4th expanded edition. Yekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forestry University, 2023b, 1 electron. opt. disk (CD-ROM), available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
- Usoltsev V.A., Modeli dlya otsenki vozrasta fereviev i drevostoev lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii po mohometrii kroon i pologa, dostupnoj dlya vozdušnogo lazernogo skanirovaniya (Models for estimating the age of trees and stands of forest-forming species of Eurasia based on crown and canopy morphometry available for aerial laser scanning), *Biosphera*, 2024, No. 4, pp. 399–406.
- Usoltsev V.A., Perspektivy 3D-modelirovaniya prostranstvennoj struktury fitomassy lesov (Prospects for 3D modeling of the spatial structure of forest phytomass), *Eco-potentsial*, 2014, No. 2, pp. 55–71., available at: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3356/1/Usoltsev.pdf>
- Usoltsev V.A., *Phytomass of model trees of forest-forming species of Eurasia: database, climatically determined geography, taxation standards*. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering Univ., 2016., 336 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>
- Usoltsev V.A., Tsepordei I.S., Chasovskikh V.P., Modeli dlya otsenki biomassy dereviev lesoobrazuyushchikh vidov po diametry kroony v svyazi s ispol'zovaniem dronov (Models for estimating the biomass of trees of forest-forming species by crown diameter in relation to the use of drones), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2023, Vol. 41, No. 4, pp. 300–305.
- Usoltsev V.A., Tsepordei I.S., Vozrastnye izmeneniya v strukture nadzemnoi fitomassy lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii (Age-related changes in the structure of aboveground phytomass of forest-forming species of Eurasia), *Lesovedenie*, 2023, No. 6, pp. 563–576.
- Usoltsev V.A., Tsepordei I.S., Plyukha N.I. Vzaimosvyazi diametrov stvola i kroony lesoobrazuyushchikh vidov (Interrelations of stem and crown diameters of forest-forming species of Eurasia), *Izvestia Sankt-Peterburgskoi Lesotekhnicheskoi Akademii*, 2024, Issue 250, pp. 176–199. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.176-199.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J., A general model for the origin of allometric scaling laws in biology, *Science*, 1997, Vol. 276, pp. 122–126.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J., A general model for the structure and allometry of plant vascular system, *Nature*, 1999, Vol. 400, pp. 664–667.
- Whitfield J., All creatures great and small, *Nature*, 2001, Vol. 413, pp. 342–344.
- Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D., Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe — a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation, *Tree Physiology*, 2004, Vol. 24, pp. 121–139.
- Xu Q., Li B., Maltamo M., Tokola T., Hou Z., Predicting tree diameter using allometry described by non-parametric locally-estimated copulas from tree dimensions derived from airborne laser scanning, *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 434, pp. 205–212.
- Yao W., Krull J., Krzystek P., Heurich M., Sensitivity analysis of 3D individual tree detection from LiDAR point clouds of temperate forests, *Forests*, 2014, Vol. 5, pp. 1122–1142.
- Young B., *Comparison of field and LiDAR measurements of loblolly pine*, M. Sc. thesis, Mississippi State University, Mississippi State, MS, 2000, 76 p.
- Yunson E.V., Melnichuk D.Y., Tsifrovoy dvoynik lesnogo massiva (Digital double of a forest stand), *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2024, No. 6, pp. 1–5.
- Zagalikis G., Cameron A.D., Miller D.R., The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, Vol. 35, No. 5, pp. 1224–1237.
- Zianis D., Mencuccini M., On simplifying allometric analyses of forest biomass, *Forest Ecology and Management*, 2004, Vol. 187, pp. 311–332.