ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

10.21178/2079-6080.2024.2.29
УДК 630*52:630*174.754

Оценка сбежистости стволов деревьев лесообразующих видов Евразии для бортового лазерного зондирования

© В.А. Усольцев[1,2], Н.И. Плюха[1], И.С. Цепордей[2]

Estimating the stem slenderness of forest-forming species of Eurasia for airborne laser sensing

V.A. Usoltsev, N.I. Plyukha, I.S. Tsepordey (Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)

The growing need for spatially oriented mapping and more accurate assessment of forest biomass is partially met by the use of advanced laser (lidar) forest sensing technologies, in particular, airborne and ground-based scanners. It is known that the use of an on-board lidar provides an accurate estimate of the crown diameter and height of the tree. Therefore, models of aboveground biomass, including crown diameter and tree height as independent variables, may be adequate to the experimental data. Since the stem biomass is about 80 % of the aboveground tree biomass, the inclusion in such models of stem slenderness, as the ratio of tree height to stem diameter at breast height, as a third independent variable can increase the adequacy of the models. The purpose of our study is to develop allometric models to assess the slenderness of tree stems of 10 forest-forming genera of Eurasia in relation to the crown diameter and tree height measured during laser profiling. The source data was the author's database of 5158 definitions. The obtained models are statistically significant and are characterized by determination coefficients from 0,318 for five-coniferous pines to 0,742 for aspens. It has been established for all genera that there is a negative relationship between the stem slenderness and the diameter of the crown, and a biologically inexplicable contradiction has been found in relation to the relationship with the tree height: the presence of a positive relationship between the stem slenderness and the tree height in conifers and a negative one in deciduous. In further research, this fact should be explained, or at least confirmed or denied. It is established that the contributions of independent variables to the explanation of the variability of the stem slenderness are not equivalent: the largest contribution is made by the diameter of the crown and the smallest by the height of the tree.

Keywords: genera and subgenera of Eurasia, allometric models, stem slenderness as a dependent variable, crown diameter and tree height as independent variables, airborne lidar sensing

Оценка сбежистости стволов деревьев лесообразующих видов Евразии для бортового лазерного зондирования

В.А. Усольцев, Н.И. Плюха, И.С. Цепордей

Растущая потребность в пространственно-ориентированном картографировании и более корректном определении лесной биомассы частично удовлетворяется применением передовых технологий лазерного (лидарного) зондирования лесов, в частности, бортовым и наземным сканерами. Известно, что использование бортового лидара обеспечивает точную оценку диаметра кроны и высоты дерева. Поэтому модели надземной биомассы, включающие в качестве независимых переменных эти показатели могут соответствовать исходным данным. Поскольку масса ствола составляет около 80 % надземной биомассы дерева, включение в подобные модели сбежистости ствола как отношения высоты дерева к диаметру ствола на высоте груди в качестве третьей независимой переменной может повысить адекватность моделей.

Цель нашего исследования состоит в разработке аллометрических моделей для оценки сбежистости стволов деревьев 10 лесообразующих родов Евразии в связи с диаметром кроны и высотой дерева, измеряемыми в процессе лазерного профилирования. Исходными данными послужила авторская база данных в количестве 5158 определений. Полученные модели статистически значимы и характеризуются коэффициентами от 0,318 для пятихвойных сосен до 0,742 для осин. Установлено для всех родов наличие отрицательной связи сбежистости ствола с диаметром кроны, а в отношении связи с высотой дерева обнаружено пока биологически необъяснимое противоречие: наличие положительной связи сбежистости с высотой дерева у хвойных и отрицательной – у лиственных. В дальнейших исследованиях этот факт должен получить подтверждение или отрицание. Установлено, что вклады независимых переменных в объяснение изменчивости сбежистости ствола не равнозначны: наибольший вклад вносит диаметр кроны и наименьший – высота дерева.

Ключевые слова: роды и подроды Евразии, аллометрические модели, сбежистость ствола, диаметр кроны и высота дерева, бортовое лидарное зондирование

Усольцев Владимир Андреевич – профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, д-р с.-х. наук
E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Плюха Николай Иванович – аспирант УГЛТУ
E-mail: nikcskript@mail.ru

Цепордей Иван Степанович – старший научный сотрудник, канд. с.-х. наук
E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

[1]ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
Телефон: +7(343)254-62-25

[2]ФГБУН Ботанический сад Уральского отделения РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а
Телефон: +7(343)210-38-59

Введение

Озабоченность глобальным изменением климата обусловила необходимость поиска эффективных и более точных способов оценки углерода, депонируемого в лесах в национальном, континентальном и глобальном масштабах. Эта оценка необходима для лучшего понимания углеродного цикла, поскольку лесные экосистемы служат основными резервуарами наземного углерода [12]. Надежный аудит изменений лесной биомассы или запасов углерода с течением времени может принести экологическую и экономическую выгоду странам, участвующим в решении проблем изменения климата, сформулированных Рамочной Конвенцией ООН об изменении климата (РКИК ООН). Количественная оценка поглощения углерода лесами дает всестороннее представление о биогеохимических процессах, в частности, о реакции растительности на результаты антропогенной деятельности [8, 17].

В настоящее время разработан ряд методов оценки лесной надземной биомассы и запасов углерода [29]. В сложных биофизических условиях смешанных многоярусных древостоев измерение запасов углерода часто сопряжено с неопределенностями, в том числе с трудностями фиксации вершины дерева при традиционном измерении его высоты [22]. Растущая потребность в пространственно-ориентированном картографировании и более точной оценке лесного углерода частично компенсируется новейшими передовыми технологиями лазерного зондирования лесов, в том числе бортовым и наземным сканерами (далее – соответственно БС и НС). Использование этих лазерных технологий для дистанционного зондирования лесов дает большие преимущества по сравнению с применением дистанционных оптических приборов с их проблемой насыщения спектральных откликов по мере увеличения плотности полога насаждений. Установлено, что технологии БС и НС при сканировании деревьев лазерными импульсами обеспечивают точную оценку таких базовых параметров, как высота, диаметр на высоте груди, диаметр кроны и координаты отдельных деревьев [8, 11, 18, 32].

Метод БС основан на измерениях расстояний между положением датчика и отражающим объектом с использованием дифференциальной глобальной системы позиционирования (GPS) и инерциального измерительного блока (IMU), в результате чего определяются размеры и координаты дерева в 3D-пространстве. Полученные облака точек с географической привязкой позволяют рассчитывать цифровые модели рельефа и поверхности, а также модели высоты полога [8]. Используя последние, можно провести разграничение крон отдельных деревьев путем сегментации [9], пространственного вейвлет-анализа [10], кластеризации в трехмерном пространстве [14, 33], или путем оценки диаметра крон деревьев с помощью преобразования Хафа [23]. Использование данных БС может обеспечить оценку высоты дерева с точностью 0,02–0,73 м [6], т. е. более точно и эффективно по сравнению с традиционными наземными методами [21, 36].

Метод НС представляет активное дистанционное зондирование и получение облаков точек, обеспечивающих высокоточную оценку трехмерных (3D) размеров деревьев, таких как диаметр ствола, высота дерева и его координаты [25]. Показано, что НС обеспечивает измерение диаметра ствола на высоте груди и высоты дерева с погрешностью, не превышающей соответственно 1 и 2 см при высоте деревьев до 13 м [15], а по другим данным – соответственно 1,28 и 95 см [27]. Есть свидетельство, что НС обеспечило более точную оценку диаметра ствола по сравнению с наземным перечетом [31]. Однако метод НС сталкивается с ограничениями, касающимися способности обнаружения вершин деревьев. Поэтому метод НС имеет некоторую неопределенность в определении высоты дерева, но с его помощью можно более точно измерить диаметр ствола [31]. Пробные площади могут быть измерены в режиме однократного или многократного наземного сканирования. Режим единичного сканирования обеспечивает меньшие возможности для 3D-фиксации отдельных деревьев из-за окклюзии (сокрытия деревьев другими, ближе расположенными деревьями). Режим многократного сканирования с нескольких точек приводит к высокодетализированной реконструкции размеров и положения деревьев [19, 20, 24, 28, 30]. Из вышеизложенного следует, что каждый из методов БС и НС имеет свои преимущества и недостатки, то есть в первом случае является более точной оценка высоты дерева, а во втором – оценка диаметра ствола. При объединении этих двух типов облаков точек используются преимущества названных двух методов, они дополняют друг друга [13, 16, 26]. Однако это взаимное дополнение возможно лишь при использовании БС и НС на постоянных пробных площадях. Совмещение данных БС и НС обеспечивается точной географической привязкой деревьев. Так, в лиственничниках северо-востока Китая точность привязки данных БС составила 10 мм по горизонтали и 15 мм по вертикали, а данных НС – 8 мм по горизонтали и 15 мм по вертикали. Обработка данных БС и НС была реализована соответственно в программных обеспечениях DJI Terra версии 3.5 и StonexSiScan версии 3.0 [13].

В результате совмещения технологий БС и НС разрабатываются статистические модели для оценки объема ствола [26]. Известно, однако, что точность оценки объема или массы ствола по его диаметру и высоте дерева зависит от степени варьирования полнодревесности ствола, обратно пропорциональной его сбежистости или относительной высоты (отношения высоты ствола к его диаметру на высоте груди). Таким образом, используя преимущества технологий БС и НС, можно моделировать объем и биомассу ствола по данным сканирования диаметра ствола и высоты дерева с коррекцией на сбежистость ствола путем включения в ее модель в качестве третьей независимой переменной.

При оценке биомассы деревьев дистанционными методами важным показателем, объясняющим ее варьирование, является диаметр кроны, который измеряется с большей точностью по сравнению с традиционной наземной таксацией [1]. Исследование аллометрических моделей связи надземной биомассы деревьев лесообразующих родов Евразии с диаметром кроны показало наличие коэффициентов детерминации для хвойных – сосны, лиственницы, ели и кедра – в пределах от 0,805 до 0,828 и для лиственных – березы, осины и дуба – от 0,744 до 0,835 [4]. По данным лазерного сканирования ели черной в Канаде установлено, что модели надземной биомассы, включающие в качестве независимых переменных диаметр кроны и высоту дерева, оказались более адекватными исходным данным по сравнению с моделями, включающими традиционные измерения диаметра ствола и высоты дерева [35]. Результаты нашего сравнительного анализа двух упомянутых видов моделей [2] показали, что объяснительная способность первых по отношению к вторым для листвы, ветвей и корней ниже соответственно на 3, 4 и 7 %, однако это различие статистически не значимо; а для массы ствола, надземной и общей также ниже в среднем на 4 %, но это различие статистически значимо. Поскольку масса ствола составляет около 80 % надземной биомассы дерева, включение в подобные модели сбежистости ствола в качестве третьей независимой переменной может повысить адекватность моделей.

Цель нашего исследования состоит в разработке моделей сбежистости (относительной высоты) стволов деревьев лесообразующих видов при бортовом лазерном зондировании.

Объекты и методы исследования

Для реализации поставленной цели исследования из сформированной базы данных в количестве 15800 определений [3] отобраны 5158 модельных деревьев 10 лесообразующих родов как совокупностей викарирующих видов Евразии. Пять родов (подродов) представлены хвойными: двухвойные сосны, ели, пихты, пятихвойные сосны (кедры), лиственницы и пять родов представлены лиственными: березы, осина и тополи, ольхи, дубы, буки. Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (http://www.statgraphics.com/). Представленность родов (подродов) различными видами в наших исходных данных была показана ранее [5].

Исходные данные названных родов в их статистической обработке для хвойных и лиственных отдельно представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных модельных деревьев лесообразующих родов

Показатель	Среднее значение	Диапазон варьирования	Коэффициент изменчивости	Стандартное отклонение
Таксационные показатели хвойных деревьев				
Высота дерева *(H)*, м	11,8	1,3–42,8	59,8	7,08
Диаметр ствола на высоте груди *(D)*, см	13,4	0,3–72,9	74,6	10,0
Диаметр кроны (D_{cr}), м	2,4	0,1–13,9	58,3	1,41
Таксационные показатели лиственных деревьев				
Высота дерева *(H)*, м	15,6	1,3–39,3	41,0	6,40
Диаметр ствола на высоте груди *(D)*, см	14,5	0,2–69,7	63,4	9,20
Диаметр кроны *(Dcr)*, м	3,1	0,3–15,5	63,0	1,98
Таксационные показатели хвойных и лиственных деревьев				
Высота дерева *(H)*, м	13,4	1,3–42,8	52,8	7,05
Диаметр ствола на высоте груди *(D)*, см	13,8	0,2–72,9	70,0	9,70
Диаметр кроны (D_{cr}), м	2,7	0,1–15,5	62,7	1,70

Принята следующая структура аллометрической модели:

$$\ln(H/D) = a_0 + a_1 \ln D_{cr} + a_2 \ln H, \quad (1)$$

где H/D – относительная высота стволов, м/см.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета моделей (1) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика моделей

Зависимая переменная ln*(H/D)* для родов	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных			adjR²**	SE***
	a_0*	a1 lnD_{cr}	a_2 ln$H$		
Хвойные					
Двухвойные сосны	-0,0271	-0,5342	0,1809	0,568	0,22
Ели	0,1457	-0,3413	0,0634	0,342	0,17
Пихты	0,0729	-0,3267	0,0654	0,541	0,13
Пятихвойные сосны (кедры)	-0,2151	-0,4263	0,1958	0,318	0,19
Лиственницы	0,4626	-0,4848	0,0088	0,682	0,20
Лиственные					
Березы	0,7914	-0,3244	-0,0810	0,639	0,18
Осина и тополи	0,9228	-0,4684	-0,0621	0,742	0,17
Ольхи	1,2513	-0,2348	-0,3150	0,596	0,17

Зависимая переменная ln(H/D) для родов	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных			adjR^2**	SE***
	a_0*	a1 lnD_{cr}	a_2 ln$H$		
Дубы	0,5558	-0,1416	-0,1493	0,405	0,18
Буки	0,7604	-0,3884	-0,0397	0,537	0,24

Примечания.
*Свободный член скорректирован на логарифмическое преобразование [7];
**Коэффициент детерминации adjR^2 скорректирован на количество переменных;
***SE – стандартная ошибка моделей (1).

Модели (1) действительны в диапазонах действующих факторов, показанных в таблице 1. У всех родов установлена отрицательная связь H/D с диаметром кроны. Примечательно и пока биологически необъяснимо различие хвойных и лиственных по знаку при переменной ln$H$, что означает наличие положительной связи H/D с высотой дерева у хвойных и отрицательной — у лиственных. Ранее уже отмечались недостатки сформированной базы данных о биомассе деревьев [34], в частности, в данном случае могут играть роль разная представленность родов по возрасту деревьев, когда у одних преобладают молодые, у других — средневозрастные, у третьих — спелые деревья; разная географическая привязка пробных площадей; смещения выборочных оценок, вызванные отсутствием единой методики получения фактических данных о биомассе деревьев на пробных площадях и в целом — разные уровни неучтенных факторов. Однако сам факт наличия положительной связи H/D с высотой дерева у хвойных и отрицательной — у лиственных заслуживает внимания, и в дальнейших исследованиях он должен получить объяснение или хотя бы подтверждение или отрицание.

Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости H/D не равнозначны: наибольший вклад вносит диаметр кроны и наименьший — высота дерева (табл. 3).

Таблица 3

Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости зависимой переменной H/D

Род	Вклады независимых переменных,%	
	lnDcr	ln$H$
	Хвойные	
Pinus	73	27
Picea	76	24
Abies	85	15
Haploxylon	62	38
Larix	97	3
Итого по хвойным	78,6 ± 13,2	21,4 ± 13,2
	Лиственные	
Betula	85	15
Populus	89	11
Alnus	54	46
Quercus	50	50
Fagus	92	8
Итого по лиственным	74,0 ± 20,3	26,0 ± 20,3
Всего	76,3 ± 16,3	23,7 ± 16,3

О степени адекватности моделей (1) и отсутствии корреляции остатков можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений *H/D* (рис.).

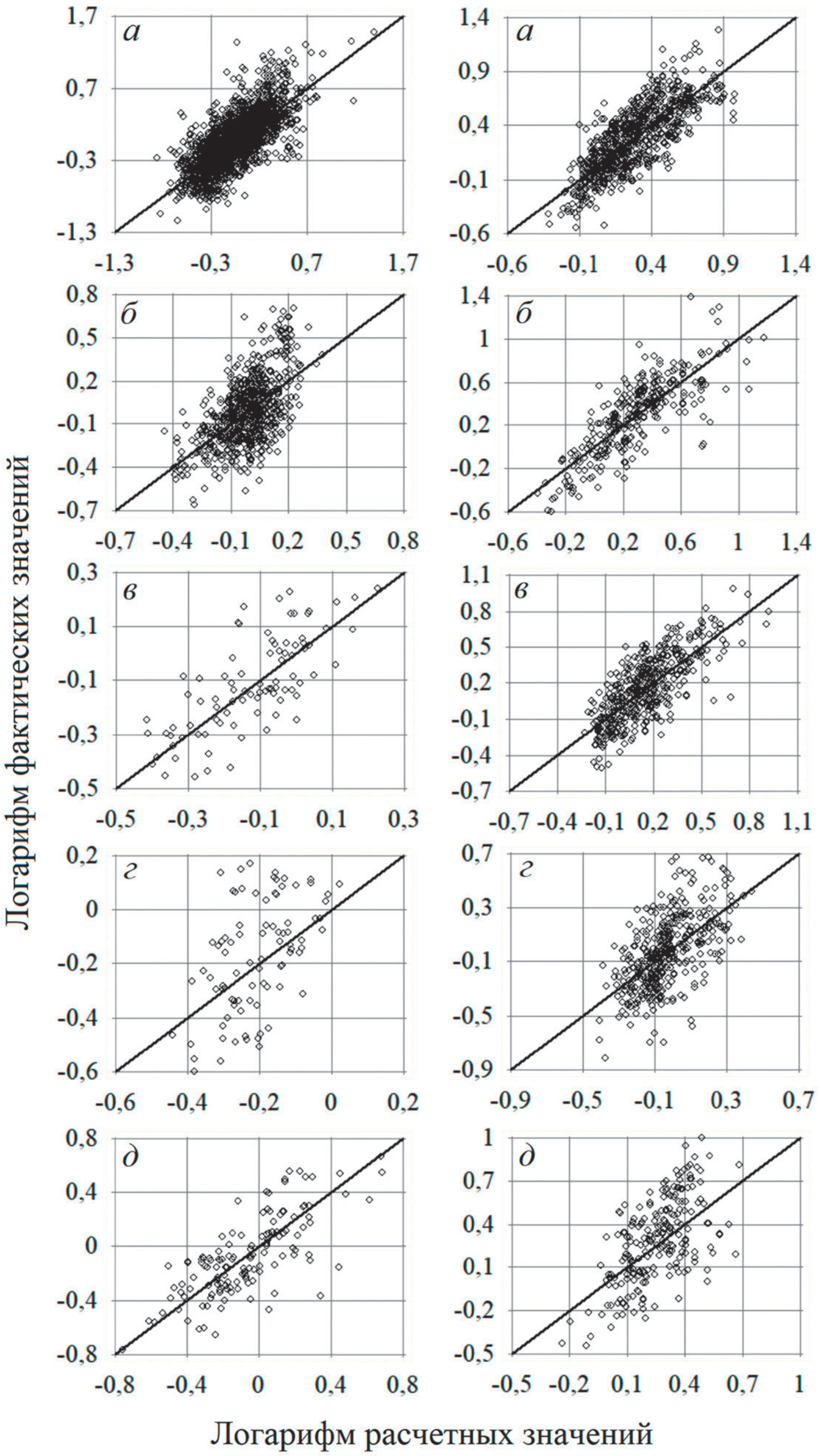

Рис. Соотношение расчетных и фактических значений *H/D* согласно моделям (1).
Слева для хвойных: *а, б, в, г* и *д* – соответственно *Pinus*, *Picea, Abies, Haploxylon* и *Larix*; справа для лиственных: *а, б, в, г* и *д* – соответственно *Betula, Populus, Alnus*, *Quercus* и *Fagus*

Заключение

Таким образом, предложены аллометрические модели сбежистости стволов деревьев лесообразующих родов Евразии как отношения высоты дерева к диаметру ствола на высоте груди, предназначенные для оценки сбежистости стволов по значениям диаметра кроны и высоты дерева, измеряемым в процессе лазерного профилирования.

Установлено наличие отрицательной связи сбежистости ствола с диаметром кроны, но пока биологически необъяснимо наличие отрицательной связи сбежистости с высотой дерева у хвойных и отрицательной – у лиственных. Данный факт может быть обусловлен некоторыми особенностями использованной базы данных, и в дальнейших исследованиях должен получить объяснение или хотя бы подтверждение или отрицание.

Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости сбежистости ствола не равнозначны: наибольший вклад вносит диаметр кроны и наименьший – высота дерева.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН (№ 123112700125–1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Синицын, С.Г. Использование материалов многозональных и космических съёмок в интересах лесного хозяйства / С.Г. Синицын, В.И. Сухих // Аэрокосмические исследования Земли. – М. : Наука, 1979. – С. 86–101.
2. Усольцев, В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы / В.А. Усольцев. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. – 336 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696 (дата обращения: 07.12.2023).
3. Усольцев, В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии : монография / В.А. Усольцев. – 3-е изд., доп. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет; Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, 2023. – 1 CD-ROM. – ISBN 978-5-8295-0861-6. – URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451 (дата обращения: 07.12.2023).
4. Усольцев, В.А. Модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, В.П. Часовских // Хвойные бореальной зоны. – 2023. – Т. 41, № 4. – С. 300-305. – DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305.
5. Усольцев, В.А. Морфология кроны лесообразующих родов Евразии: аллометрия и ранжирование / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей // Хвойные бореальной зоны. – 2023. – Т. 41(6). С. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514.
6. Andersen, H.-E. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods / H.-E. Andersen, S.E. Reutebuch, R.J. McGaughey // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 32 (5). – P. 355–366. – DOI: 10.5589/m06-030.
7. Baskerville, G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass / G.L. Baskerville // Canadian Journal of Forest Research. – 1972. – Vol. 2 (1). – P. 49–53.
8. Bazezew, M.N. Integrating airborne LiDAR and terrestrial laser scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia / M.N. Bazezew, Y.A. Hussin, E.H. Kloosterman // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. – Vol. 73 (5). – P. 638–652. – DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.026.
9. Carleer, D. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations / D. Carleer, E. Wolff // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2005. –Vol. 11 (10). – P. 1285–1294. – DOI: 10.14358/PERS.71.11.1285.
10. Falkowski, M.J. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data / M.J. Falkowski, A.M.S. Smith, A.T. Hudak [et al.] // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 32 (2). – P. 153–161. – DOI: 10.5589/m06-005.
11. Ferraz, A. Lidar detection of individual tree size in tropical forests / A. Ferraz, S. Saatchi, C. Mallet [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 183 (4). – P. 318–333. – DOI: 10.1016/j.rse.2016.05.028.
12. Garcia, M. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data / M. Garcia, D. Riano, E. Chuvieco [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114 (4). – P. 816–830. – DOI: 10.1016/j.rse.2009.11.021.
13. Guo, L. A feature-level point cloud fusion method for timber volume of forest stands estimation / L. Guo, Y. Wu, L. Deng [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15 (12). – Article 2995. – DOI: 10.3390/rs15122995.

14. Gupta, S. Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-D single tree detection using airborne fullwave lidar data / S. Gupta, H. Weinacker, B. Koch // Remote Sensing. – 2010. – Vol. 2 (4). – P. 968–989. – DOI: 10.3390/rs2040968.
15. Henning, J.G. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar / J.G. Henning, P.J. Radtke // Forest Science. – 2006. – Vol. 52 (1). – P. 67–80.
16. Hilker, T. Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand / T. Hilker, M. van Leeuwen, N.C. Coops [et al.] // Trees. – 2010. – Vol. 24 (5). – P. 819–832. – DOI: 10.1007/s00468-010-0452-7.
17. Houghton, R.A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance / R.A. Houghton // Global Change Biology. – 2005. – Vol. 11 (6). – P. 945–958. – DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x.
18. Hyyppa, J. Laser scanning in forests / J. Hyyppa, M. Holopainen, H. Olsson // Remote Sensing. – 2012. – Vol. 4 (10). – P. 2919–2922. – DOI: 10.3390/rs4102919.
19. Kaasalainen, S. Change detection of tree biomass with terrestrial laser scanning and quantitative structure modelling / S. Kaasalainen, A. Krooks, J. Liski [et al.] // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6 (5). – P. 3906–3922. – DOI: 10.3390/rs6053906.
20. Kankare, V. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning / V. Kankare, M. Holopainen, M. Vastaranta [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 75. – P. 64–75. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003.
21. Kronseder, K. Above ground biomass estimation across forest types at different degradation levels in Central Kalimantan using LiDAR data / K. Kronseder, U. Ballhorn, V. Böhm [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2012. – Vol. 18. – P. 37–48. – DOI: 10.1016/j.jag.2012.01.010.
22. Larjavaara, M. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest / M. Larjavaara, H.C. Muller-Landau // Methods in Ecology and Evolution. – 2013. – Vol. 4 (9). – P. 793–801. – DOI: 10.1111/2041-210X.12071.
23. Leeuwen, M. Canopy surface reconstruction from a LiDAR point cloud using Hough transform / M. Leeuwen, N.C. van Coops, M.A. Wulder // Remote Sensing Letters. – 2010. – Vol. 1 (3). – P. 125–132. – DOI: 10.1080/01431161003649339.
24. Liang, X. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning / X. Liang, P. Litkey, J. Hyyppä [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50 (2). – P. 661–670. – DOI:10.1109/TGRS.2011.2161613.
25. Liang, X. Terrestrial laser scanning in forest inventories / X. Liang, V. Kankare, J. Hyyppä [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 115. – P. 63–77. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.
26. Lindberg, E. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning / E. Lindberg, J. Holmgren, K. Olofsson [et al.] // European Journal of Forest Research. – 2012. – Vol. 131 (6). – P. 1917–1931. – DOI: 10.1007/s10342-012-0642-5.
27. Liu, G. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level / G. Liu, J. Wang, P. Dong [et al.] // Forests. – 2018. – Vol. 9 (7). – Article 398. – DOI: 10.3390/f9070398.
28. Loudermilk, E.L. Ground-based LIDAR: a novel approach to quantify fine-scale fuelbed characteristics / E.L. Loudermilk, J.K. Hiers, J.J. O’Brien [et al.] // International Journal of Wildland Fire. – 2009. – Vol. 18 (6). – P. 676–685. – DOI: 10.1071/WF07138.
29. Lu, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation / D. Lu // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27 (7). – P. 1297–1328. – DOI: 10.1080/01431160500486732.
30. Moskal, L. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest / L.M. Moskal, G. Zheng // Remote Sensing. – 2012. – Vol. 4 (1). – P. 1–20. – DOI: 10.3390/rs4010001.
31. Panagiotidis, D. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures / D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad, M. Slavík // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Vol. 112 (7). – Article 102917. – DOI: 10.1016/j.jag.2022.102917.
32. Ramirez, F.A. Testing the application of terrestrial laser scanning to measure forest canopy gap fraction / F.A. Ramirez, R.P. Armitage, F.M. Danson // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5 (6). – P. 3037–3056. – DOI: 10.3390/rs5063037.
33. Reitberger, J. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data / J. Reitberger, C. Schnörr, P. Krzystek [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 64 (6). – P. 561–574. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002.
34. Usoltsev, V.A. Some methodological and conceptual uncertainties in estimating the income component of the forest carbon cycle / V.A. Usoltsev // Russian Journal of Ecology. – 2007. – Vol. 38 (1). – P. 1–10. – DOI: 10.1134/S1067413607010018.

35. Wagers, S. Using TLS-measured tree attributes to estimate above ground biomass in small black spruce trees / S. Wagers, G. Castilla, M. Filiatrault [et al.] // Forests. – 2021. – Vol. 12 (1). – Article 1521. – DOI: 10.3390/f12111521.
36. Yamamoto, K. Estimation of mean tree height using small-footprint airborne LiDAR without a digital terrain model / K. Yamamoto, T. Takahashi, Y. Miyachi [et al.] // Journal of Forestry Research. – 2011. – Vol. 16 (6). – P. 425–431. – DOI: 10.1007/s10310-010-0234-5.

REFERENCES

1. Sinitsyn S.G., Sukhikh V.I. Ispol'zovanie materialov mnogozonal'nykh i kosmicheskikh s"yomok v interesakh lesnogo khozyajstva [The use of multispectral and space imagery materials for the benefit of forestry]. *Aehrokosmicheskie issledovaniya Zemli* [*Aerospace exploration of the Earth*], Moscow, 1979, pp. 86–101. (In Russian).
2. Usol'tsev V.A. Fitomassa model'nykh derev'ev lesoobrazuyushhikh porod Evrazii: baza dannykh, klimaticheski obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy [Phytomass of model trees of forest-forming species of Eurasia: database, climatic geography, taxation standards]. Ekaterinburg, Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2016, 336 p., URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696 (accessed: 07.12.2023). (In Russian).
3. Usol'tsev V.A. Fitomassa model'nyh derev'ev dlja distancionnoj i nazemnoj taksacii lesov Evrazii, monografija [Phytomass of model trees for remote and ground-based taxation of Eurasian forests: monograph]. 3rd edition, revised, Ekaterinburg, 2023, 1 CD-ROM, ISBN 978-5-8295-0861-6, URI: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451 (accessed: 07.12.2023). (In Russian).
4. Usol'tsev V.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Modeli dlya otsenki biomassy derev'ev lesoobrazuyushhikh vidov po diametru krony v svyazi s ispol'zovaniem dronov [Models for estimating the biomass of trees of forest-forming species by crown diameter in connection with the use of drones]. *Khvojnye boreal'noj zony* [*Conifers of the boreal zone*], 2023, vol. 41, no. 4, pp. 300-305. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-300-305. (In Russian).
5. Usol'tsev V.A., Tsepordey I.S. Morfologiya krony lesoobrazuyushhikh rodov Evrazii: allometriya i ranzhirovanie [Crown morphology of forest-forming genera of Eurasia: allometry and ranking]. *Khvojnye boreal'noj zony* [*Conifers of the boreal zone*], 2023, vol. 41 (6), pp. 504–514. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-504-514. (In Russian).
6. Andersen H.-E., Reutebuch S.E., McGaughey R.J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 32 (5), pp. 355–366. DOI: 10.5589/m06-030.
7. Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2 (1), pp. 49–53.
8. Bazezew M.N., Hussin Y.A., Kloosterman E.H. Integrating airborne LiDAR and terrestrial laser scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, vol. 73 (5), pp. 638–652. DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.026.
9. Carleer D., Wolff E. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, vol. 11 (10), pp. 1285–1294. DOI: 10.14358/PERS.71.11.1285.
10. Falkowski M.J., Smith A.M.S., Hudak A.T., Gessler P.E., Vierling L.A., Crookston N.L. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 32 (2), pp. 153–161. DOI: 10.5589/m06-005.
11. Ferraz A., Saatchi S., Mallet C., Meyer V. Lidar detection of individual tree size in tropical forests. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 183 (4), pp. 318–333. DOI: 10.1016/j.rse.2016.05.028.
12. Garcia M., Riano D., Chuvieco E., Danson F.M. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, vol. 114 (4), pp. 816–830. DOI: 10.1016/j.rse.2009.11.021.
13. Guo L., Wu Y., Deng L., Hou P., Zhai J., Chen Y. A feature-level point cloud fusion method for timber volume of forest stands estimation. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15 (12), Article 2995. DOI: 10.3390/rs15122995.
14. Gupta S., Weinacker H., Koch B. Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-D single tree detection using airborne fullwave lidar data. *Remote Sensing*, 2010, vol. 2 (4), pp. 968–989. DOI: 10.3390/rs2040968.
15. Henning J.G., Radtke P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, 2006, vol. 52 (1), pp. 67–80.
16. Hilker T., Leeuwen M.V., Coops N.C., Wulder M.A., Newnham G.J., Jupp D.L., Culvenor D. Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand. *Trees*, 2010, vol. 24 (5), pp. 819–832. DOI: 10.1007/s00468-010-0452-7.

17. Houghton R.A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, vol. 11 (6), pp. 945–958. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x.
18. Hyyppa J., Holopainen M., Olsson H. Laser scanning in forests. *Remote Sensing*, 2012, vol. 4 (10), pp. 2919–2922. DOI: 10.3390/rs4102919.
19. Kaasalainen S., Krooks A., Liski J., Raumonen P., Kaartinen H., Kaasalainen M., Puttonen E., Anttila K., Mäkipää R. Change detection of tree biomass with terrestrial laser scanning and quantitative structure modelling. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6 (5), pp. 3906–3922. DOI: 10.3390/rs6053906.
20. Kankare V., Holopainen M., Vastaranta M., Puttonen E., Yu X., Hyyppä J., Vaaja M.T., Hyyppä H., Alho P. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, vol. 75, pp. 64–75. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003.
21. Kronseder K., Ballhorn U., Böhm V., Siegert F. Above ground biomass estimation across forest types at different degradation levels in Central Kalimantan using LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 18, pp. 37–48. DOI: 10.1016/j.jag.2012.01.010.
22. Larjavaara M., Muller-Landau H.C. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, vol. 4 (9), pp. 793–801. DOI: 10.1111/2041-210X.12071.
23. Leeuwen M., van Coops N.C., Wulder M.A. Canopy surface reconstruction from a LiDAR point cloud using Hough transform. *Remote Sensing Letters*, 2010, vol. 1 (3), pp. 125–132. DOI: 10.1080/01431161003649339.
24. Liang X., Litkey P., Hyyppä J., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, vol. 50 (2), pp. 661–670. DOI:10.1109/TGRS.2011.2161613.
25. Liang X., Kankare V., Hyyppä J., Wang Y., Kukko A., Haggrén H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., Vastaranta M. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, vol. 115, pp. 63–77. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.
26. 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), pp. 1917–1931. DOI: 10.1007/s10342-012-0642-5.
27. Liu G., Wang J., Dong P., Chen Y., Liu Z. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests*, 2018, vol. 9 (7), Article 398. DOI: 10.3390/f9070398.
28. Loudermilk E.L., Hiers J.K., O'Brien J.J., Mitchell R.J., Singhania A., Fernandez-Diaz J.C., Cropper W.P., Slatton K.C. Ground-based LIDAR: a novel approach to quantify fine-scale fuelbed characteristics. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18 (6), pp. 676–685. DOI: 10.1071/WF07138.
29. Lu D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27 (7), pp. 1297–1328. DOI: 10.1080/01431160500486732.
30. Moskal L., Zheng G. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*, 2012, vol. 4 (1), pp. 1–20. DOI: 10.3390/rs4010001.
31. Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Slavík M. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, vol. 112 (7), Article 102917. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102917.
32. Ramirez F.A., Armitage R.P., Danson F.M. Testing the application of terrestrial laser scanning to measure forest canopy gap fraction. *Remote Sensing*,2013, vol. 5 (6), pp. 3037–3056. DOI: 10.3390/rs5063037.
33. Reitberger J., Schnörr C., Krzystek P., Stilla U. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, vol. 64 (6), pp. 561–574. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002.
34. 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), pp. 1-10. DOI: 10.1134/S1067413607010018.
35. Wagers S., Castilla G., Filiatrault M., Sanchez-Azofeifa G.A. Using TLS-measured tree attributes to estimate above ground biomass in small black spruce trees. *Forests*, 2021, vol. 12 (1), Article 1521. DOI: 10.3390/f12111521.
36. Yamamoto K., Takahashi T., Miyachi Y., Kondo N., Morita S., Nakao M., Shibayama T., Takaichi Y., Tsuzuku M., Murate N. Estimation of mean tree height using small-footprint airborne LiDAR without a digital terrain model. *Journal of Forestry Research*, 2011, vol. 16 (6), pp. 425–431. DOI: 10.1007/s10310-010-0234-5.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023