

Научная статья
УДК 630*52:630*174.754

**ОЦЕНКА СБЕЖИСТОСТИ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ
ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К БОРТОВОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ ИХ ФИТОМАССЫ**

Владимир Андреевич Усольцев¹, Николай Иванович Плюха², Иван Степанович Цепордей³

^{1, 2, 3} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

² Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹ Usoltsev50@mail.ru

² nikskript@mail.ru

³ ivan.tsepordey@yandex.ru

Аннотация. По фактическим данным, 4583 модельных деревьев пяти хвойных и пяти лиственных лесообразующих родов Евразии построены модели связи сбежистости стволов с диаметром кроны и высотой дерева. Сбежистость определена как отношение диаметра ствола на высоте груди к высоте дерева. Установлена положительная связь сбежистости ствола с диаметром кроны. Связь сбежистости ствола с высотой дерева для хвойных и лиственных имеет противоположный характер: она отрицательная для хвойных и положительная для лиственных. Причины полученного парадоксального результата пока неизвестны. Предложенные модели предназначены для адекватной оценки надземной фитомассы деревьев по диаметру кроны и высоте дерева путем бортового лазерного зондирования.

Ключевые слова: сбежистость ствола как отношение его диаметра к высоте, бортовое лазерное зондирование, аллометрические модели, диаметр кроны, высота дерева

Благодарности: работа выполнена по государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

Original article

**ASSESSMENT OF STEM SLENDERNESS OF FOREST-FORMING
SPECIES OF EURASIA IN RELATION TO AIRBORNE LASER
SENSING OF TREE BIOMASS**

Vladimir A. Usoltsev¹, Nikolay I. Plyukha², Ivan S. Tsepordey³

^{1, 2, 3} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

© Усольцев В. А., Плюха Н. И., Цепордей И. С., 2024

² Botanical Garden of Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

¹ Usoltsev50@mail.ru

² nikcskript@mail.ru

³ ivan.tsepordey@yandex.ru

Abstract. According to the empirical data of 4583 model trees of five coniferous and five deciduous forest-forming genera of Eurasia, models of the relation of stem slenderness to crown diameter and tree height were constructed. Slenderness is defined as the ratio of the stem diameter at breast height to the tree height. A positive relationship of the stem slenderness with the crown diameter has been established. The relationship of stem slenderness with tree height for coniferous and deciduous has the opposite character: it is negative for coniferous and positive for deciduous ones. The reasons for the paradoxical result are still unknown. The proposed models are designed to adequately assess the aboveground biomass of trees by crown diameter and tree height when using airborne laser sensing.

Keywords: stem slenderness as the ratio of stem diameter to tree height, airborne laser sensing, allometric models, crown diameter, tree height

Acknowledgments: the work was carried out according to the state task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Растущая потребность в картографировании и точной оценке лесного углерода компенсируется новейшими технологиями лазерного зондирования лесов. Использование бортового (воздушного) лазерного зондирования обеспечивает точную оценку таких базовых параметров, как диаметр кроны и высота дерева [1], причем более точно и эффективно по сравнению с традиционными наземными методами [2]. На этом основании были предложены аллометрические модели для оценки фитомассы деревьев по диаметру кроны с использованием бортового лазерного зондирования [3]. Модели, построенные для пяти хвойных и шести лиственных видов Евразии, объясняли от 43 до 84 % изменчивости надземной фитомассы деревьев. Включение в модели высоты дерева в качестве второй независимой переменной повысило их объяснительную способность до 92–98 %. Тем не менее она в целом была ниже по отношению к зависимости фитомассы от высоты дерева и диаметра ствола [4].

Причина более низкой объяснительной способности моделей зависимости фитомассы от высоты дерева и диаметра кроны состоит в том, что они не учитывают сбежистости ствола как отношения диаметра ствола к высоте дерева. Очевидно, что при данных значениях диаметра кроны и высоты дерева фитомасса ствола увеличивается по мере снижения его сбежистости как величины, обратной относительной высоте ствола [5], связанной с его полнодревесностью. Близкие по смыслу термины в англоязычной литературе обозначаются как “*stem profile*” [6], “*taper*” [7] и “*slenderness*” [8].

Масса ствола составляет около 80 % надземной фитомассы дерева, и неучтенная изменчивость массы ствола, вследствие игнорирования сбежистости, сказывается на неучтенной изменчивости надземной фитомассы.

Цель нашего исследования состояла в разработке моделей сбежистости стволов деревьев, применимых при бортовом лазерном зондировании лесообразующих родов как совокупностей викарирующих видов Евразии. Для реализации поставленной цели из авторской базы данных о фитомассе [9] отобраны 4583 модельных деревьев 10 лесообразующих родов. Пять родов (подродов) представлены хвойными (*Pinus* L., *Picea* L., *Abies* Mill., *Haploxyton* или *Strobus*, *Larix* Mill.) и пять родов представлены лиственными (*Betula* L., *Populus* L., *Alnus* Gaertn., *Quercus* L., *Fagus* L.).

Исходные данные названных родов и подродов в их статистической обработке представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных модельных деревьев
лесообразующих родов (подродов)

Статистики ¹	Таксационные показатели деревьев хвойных родов ²			Таксационные показатели деревьев лиственных родов ²		
	<i>H</i>	<i>Dcr</i>	<i>D/H</i>	<i>H</i>	<i>Dcr</i>	<i>D/H</i>
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7
<i>Pinus</i> (двуххвойные сосны)				<i>Betula</i>		
Mean	11,70	2,31	1,06	15,8	2,95	0,80
Min	0,36	0,07	0,23	2,60	0,40	0,37
Max	36,60	13,9	3,15	27,8	13,40	1,72
SD	6,45	1,36	0,36	6,31	1,85	0,24
CV, %	55,40	58,7	33,7	39,9	62,50	29,00
n	1716	1716	1709	716	716	716
<i>Picea</i>				<i>Populus</i>		
Mean	11,20	2,68	1,06	15,40	3,09	0,80
Min	1,39	0,83	0,53	2,10	0,40	0,25
Max	42,80	8,80	1,73	28,80	11,00	1,82
SD	8,48	1,43	0,22	6,64	1,85	0,29
CV, %	75,90	53,10	20,40	43,10	59,90	36,60
n	541	541	541	296	296	296
<i>Abies</i>				<i>Alnus</i>		
Mean	18,80	3,65	1,16	17,00	2,77	0,88
Min	5,30	1,10	0,69	4,20	0,50	0,37
Max	28,70	8,90	2,05	27,80	8,40	1,67
SD	5,93	1,77	0,25	5,46	1,31	0,23
CV, %	31,50	48,6	21,1	32,20	47,40	26,50
n	93	93	93	414	414	414
<i>Haploxyton</i> (пятихвойные сосны)				<i>Quercus</i>		
Mean	7,90	2,39	1,27	15,0	4,14	1,05
Min	1,50	0,35	0,77	2,20	0,60	0,57
Max	26,8	7,70	2,50	32,60	15,50	1,77

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
SD	6,38	1,46	0,35	6,79	2,59	0,23
CV.%	80,70	60,90	27,40	45,30	62,70	22,20
n	93	93	93	352	352	352
<i>Larix</i>			<i>Fagus</i>			
Mean	12,80	3,23	1,10	14,5	2,84	0,81
Min	1,40	0,30	0,21	4,08	0,70	0,37
Max	34,00	13,00	2,21	39,30	12,3	2,04
SD	6,55	1,96	0,36	6,61	1,71	0,26
CV.%	51,20	60,7	32,80	45,50	60,30	32,60
n	139	139	139	223	223	223

¹ Mean, Min и Max – соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений;

² (D/H) – сбежистость ствола, см/м; H – высота дерева, м; D – диаметр ствола на высоте груди, см; Dcr – диаметр кроны, м.

Принята следующая структура аллометрической модели [4]:

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

Результаты расчета моделей (1) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика моделей (1)

Зависимая переменная ln(D/H) для родов	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных			adjR ² **	SE***
	a ₀ *	a ₁ lnD _{cr}	a ₂ lnH		
Хвойные					
<i>Pinus</i>	0,0789	0,5326	-0,1807	0,561	0,22
<i>Picea</i>	-0,0724	0,3546	-0,0857	0,327	0,16
<i>Abies</i>	0,0097	0,3410	-0,0898	0,612	0,12
<i>Нарлохylon</i>	0,2898	0,4604	-0,2245	0,378	0,18
<i>Larix</i>	-0,1650	0,4703	-0,0985	0,596	0,19
Лиственные					
<i>Betula</i>	-0,7603	0,3244	0,0811	0,639	0,17
<i>Populus</i>	-0,9428	0,4828	0,0743	0,732	0,16
<i>Alnus</i>	-1,1624	0,2585	0,2832	0,615	0,17
<i>Quercus</i>	-0,4903	0,1473	0,1338	0,401	0,17
<i>Fagus</i>	-0,7614	0,4506	0,0196	0,522	0,19

Примечание.

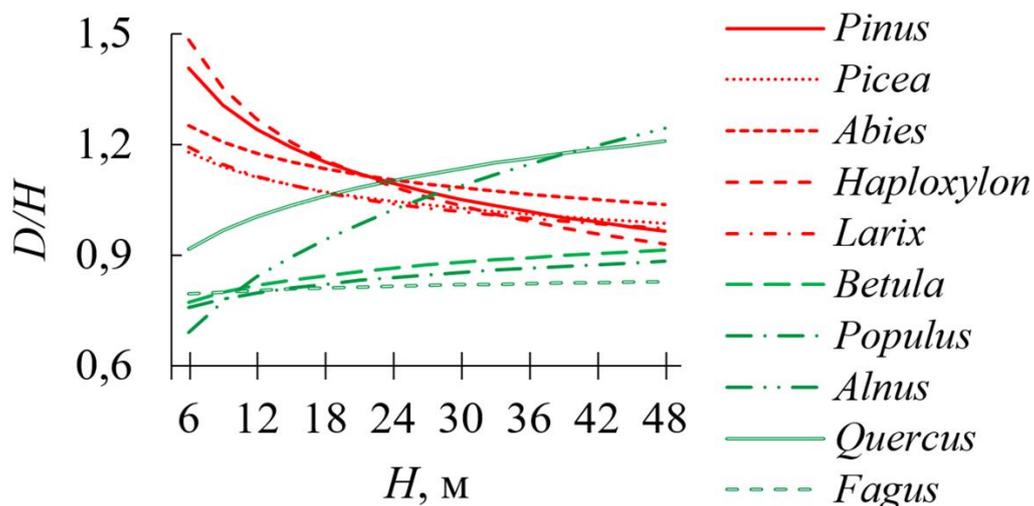
* Свободный член скорректирован на логарифмическое преобразование [10];

** Коэффициент детерминации adjR² скорректирован на количество переменных;

*** SE – стандартная ошибка модели (1).

Из табл. 2 следует, что модель (1) объясняет от 33 до 73 % изменчивости сбежистости ствола. Несмотря на относительно низкие показатели коэффициента детерминации для некоторых родов, все регрессионные коэффициенты моделей значимы на уровне вероятности $p < 0,05$, что свидетельствует о воспроизводимости закономерностей, описываемых моделью (1).

Из табл. 2 следует также, что при прочих равных условиях чем больше диаметр кроны, тем больше сбежистость ствола. В отношении влияния высоты дерева на сбежистость получен непредсказуемый результат: при увеличении высоты дерева, при неизменной ширине кроны, у хвойных сбежистость ствола снижается, а у лиственных – возрастает, что наглядно демонстрирует рис. ниже. Этот контринтуитивный результат не может быть связан, например, со степенью светолюбия разных родов, поскольку и для светолюбивых хвойных (сосна и лиственница), и для теневыносливых хвойных (ель и пихта) связь сбежистости ствола с высотой дерева одинаковая и имеет противоположный характер с аналогичной связью для лиственных.



Изменение сбежистости ствола у хвойных и лиственных при среднем значении диаметра кроны (3,0 м) согласно модели (1)

Таким образом, для пяти хвойных и пяти лиственных родов установлена положительная связь сбежистости ствола с диаметром кроны. Но связь сбежистости ствола с высотой дерева для хвойных и лиственных имеет противоположный характер: она отрицательная для хвойных и положительная для лиственных. Причины полученного парадоксального результата пока неизвестны. По мере наполнения базы данных дополнительными фактическими данными и по мере привлечения к анализу других хвойных и лиственных родов полученная противоречивая закономерность изменения сбежистости с высотой дерева для хвойных и лиственных может быть как подтверждена, так и опровергнута.

Список источников

1. 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. P. 638–652.
2. Above ground biomass estimation across forest types at different degradation levels in Central Kalimantan using LiDAR data / K. Kronseder [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. Vol. 18. P. 37–48.
3. 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.
4. Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии: сравнительный анализ / В. А. Усольцев [и др.] // *Сибирский лесной журнал*. 2016. № 4. С. 68–76.
5. Нагимов З. Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев : автореф. дис. ... д-р с.-х. наук / Зуфар Ягфарович Нагимов. Екатеринбург : УГЛТА, 2000. 40 с.
6. Model building of tree height, volume, their increments and stem profile with stochastic differential equations / P. Rupšys [et al.] // *ICFFI News*. 2012. Vol. 1 (14). P. 77–90.
7. Hjelm B. Empirical models for estimating volume and biomass of poplars on Farmland in Sweden. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 2015. 61 p.
8. Wang Y., Titus S. J., LeMay V. M. Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixed-wood forests // *Canadian Journal of Forest Research*. 1998. Vol. 28. P. 1171–1183.
9. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. 3-е изд., доп. Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451> (дата обращения: 08.12.2023).
10. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // *Canadian Journal of Forest Research*. 1972. Vol. 2 (1). P. 49–53.