

РАНЖИРОВАНИЕ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ РОДОВ ЕВРАЗИИ ПО СБЕЖИСТОСТИ (ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЫСОТЕ) СТВОЛА*

В. А. Усольцев^{1,2}, И. С. Цепордей^{2,3}, Д. В. Норитин⁴

¹Уральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

²Ботанический сад УрО РАН

Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

⁴ПАО «Сбербанк», Центр компетенций аналитики

Российская Федерация, 620026, г. Екатеринбург, ул. Гоголя, 44

Относительная высота дерева, как отношение его высоты к диаметру на высоте груди, является одной из важнейших характеристик морфоструктуры дерева и древостоя. В начале XX века было установлено, что она связана с видовой принадлежностью, добротностью местопроизрастания, возрастом и полнотой насаждения. Многочисленными исследованиями показано, что относительная высота дерева увеличивается прямо пропорционально степени его угнетенности в пологе и обратно пропорционально относительной длине кроны. На уровне древостоя относительная высота увеличивается по мере повышения густоты древостоя и описывается выпуклой кривой с выходом на плато. В практическом приложении относительная высота используется в качестве показателя устойчивости при ветровых и снеговых нагрузках и показателя, влияющего на механические свойства древесины ствола, а в теоретическом плане играет важную роль в теории формообразования древесных стволов. Целью нашего исследования было выполнить ранжирование лесообразующих родов (подродов) Евразии по величине относительной высоты. По материалам 5858 модельных деревьев и 5175 древостоев для 11 древесных родов (подродов), произрастающих на территории Евразии, впервые установлено влияние таксационных показателей на относительную высоту соответственно деревьев и древостоев лесообразующих родов и выполнено их ранжирование по величине относительной высоты при фиксированных таксационных показателях деревьев и древостоев. Все регрессионные коэффициенты построенных моделей значимы на уровне $p < 0,001$, что обеспечивает воспроизводимость полученных результатов. Показано, что последовательность родов в направлении снижения относительной высоты их деревьев и древостоев не отражает последовательности снижения их светолюбия, по Я. С. Медведеву (1910), в сопоставлении с имеющимися шкалами светолюбия европейских видов.

Ключевые слова: лесообразующие роды и подроды, объем ствола и относительная длина кроны, густота и запас древостоя, относительная высота дерева и древостоя, теневыносливость видов, модель смешанного типа, метод фиктивных переменных.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 2, P. 175–184

RANKING OF THE FOREST-FORMING GENERA OF EURASIA BY THE SLENDERNESS (RELATIVE HEIGHT) OF THE STEM

V. A. Usoltsev^{1,2}, I. S. Tsepordey^{2,3}, D. V. Noritsin⁴

¹Ural State Forest Engineering University

37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

202a, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

³Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

19, Mira str., Yekaterinburg, , 620002, Russian Federation

⁴Sberbank PJSC, Analytics Competence Center

44, Gogol Str., Yekaterinburg, 620026, Russian Federation

The relative height (slenderness) of a tree, as the ratio of its height to diameter at breast height, is one of the most important characteristics of the morphological structure of a tree and a stand. At the beginning of the twentieth century, it was found that it is associated with species, the site quality, age and tree density. Numerous studies have shown that

* Работа выполнена в рамках Госзадания FEUZ-2023-0023.

the relative height of a tree increases in direct relation to the degree of its depression in the canopy and is inversely proportional to the relative length of the crown. At the level of a stand, the relative height increases as the density of a stand increases and is described by a convex curve with access to the plateau. In practical application, relative height is used as an indicator of stability under wind and snow loads and as an indicator that affects the mechanical properties of the stem wood, and theoretically plays an important role in the theory of stem shape development. The purpose of our study was to perform a ranking of forest-forming genera (subgenera) of Eurasia by relative height. Based on the materials of 5858 model trees and 5175 stands for 11 tree genera (subgenera) growing on the territory of Eurasia, the influence of taxation indicators on the relative height of trees and stands of forest-forming genera, respectively, was established for the first time and their ranking by relative height was performed with fixed taxation indicators of trees and stands. All regression coefficients of the constructed models are significant at the level of $p < 0.001$, which ensures reproducibility of the results obtained. It is shown that the sequence of genera in the direction of decreasing the relative height of their trees and stands does not reflect the sequence of decreasing their light-requiring, by Ya. S. Medvedev (1910), in comparison with the available scales of light-requiring of European species.

Keywords: forest-forming genera and subgenera, stem volume and relative crown length, stand density and volume stock, relative height of tree and stand, shade tolerance and light-requiring of species, mixed type model, method of dummy variables.

ВВЕДЕНИЕ

Относительная высота дерева, как отношение его высоты к диаметру на высоте груди, является одной из важнейших характеристик морфоструктуры дерева и древостоя. Термин «относительная высота дерева» введен в оборот в русскоязычной литературе, по-видимому, Я. С. Медведевым [5]. Им было установлено, что относительная высота связана с видовой принадлежностью, добротностью местопроизрастания, возрастом и полнотой насаждения. У сосны обыкновенной в спелом возрасте, выросшей на свободе и в условиях максимальной сомкнутости, относительная высота составляет (при одной и той же размерности высоты и диаметра) соответственно 25 и 126 [5]. В 18-летних сосняках редких, средней густоты, густых и очень густых она изменяется в последовательности соответственно 76, 88, 105 и 124 [12]. С густотой связана также относительная длина кроны как отношение длины кроны к высоте дерева, но величина коэффициента корреляции между относительной длиной кроны и относительной высотой зависит от густоты древостоя. В 18-летних сосняках редких, средней густоты, густых и очень густых названный коэффициент корреляции изменяется в последовательности соответственно $-0,28$; $-0,47$; $-0,48$ и $-0,62$ [12]. Относительная высота увеличивается прямо пропорционально степени угнетенности дерева в пологе и обратно пропорционально относительной длине кроны у дугласии, ели европейской и ели ситхинской в Ирландии [23]. Повышение степени угнетенности деревьев сопровождается снижением уровня освещенности крон. В дубовых насаждениях на юге Мексики была выявлена отрицательная связь относительной высоты подроста ликвидамбара (*Liquidambar styraciflua* L.) со степенью освещенности в окне полога ($R^2 = 0,27$) [24].

Относительная высота уменьшается как с ухудшением класса бонитета при одном и том же возрасте, так и с повышением возраста в пределах одного класса бонитета, но произведение относительной высоты и суммы площадей сечений древостоя является величиной постоянной, не зависящей ни от возраста, ни от класса бонитета [2]. Относительная высота отражает степень освещенности, при которой выросли деревья,

изменяясь в обратном отношении с количеством получаемого ими света. Теневыносливые деревья имеют более низкие, а светолюбивые – напротив, более высокие относительные высоты. Установив закономерность снижения относительной высоты по мере увеличения теневыносливости видов, Я. С. Медведев [5] выполнил ранжирование видов по степени теневыносливости в порядке ее увеличения в следующей последовательности: береза, сосна, ясень, осина, дуб, липа, граб, ель, бук, пихта, тис.

Известно, что на начальном этапе роста связь роста в высоту и по диаметру дерева близка к линейной [11; 29; 35], но связь относительной высоты с густотой линейной не является. Причина в том, что средний диаметр в первые годы снижается с густотой быстрее, чем средняя высота, но, начиная с 20-30-летнего возраста, рост в толщину деревьев идет относительно энергичнее, чем рост в высоту [8; 9]. Анализ изменения относительной высоты сосняков естественного и искусственного происхождения второго класса возраста в Красноярском крае в диапазоне густот соответственно от 1826 до 33381 и от 239 до 34336 экз./га показал, что высокая скорость изменения относительной густоты наблюдается при густотах до 7–10 тыс. экз./га, а при дальнейшем увеличении густоты скорость изменения замедляется и выходит на плато. Соответствующая зависимость описана степенной функцией с коэффициентами детерминации для естественных сосняков и культур соответственно 0,37 и 0,99. На всем диапазоне густоты относительная высота в естественных древостоях была существенно выше, чем в культурах, причем это различие сокращалось по мере роста густоты [9]. Похожий результат получен в США, где относительная высота деревьев в культурах дугласовой пихты была проанализирована в связи с густотой и верхней высотой древостоя, и было показано, что при одной и той же верхней высоте относительная высота возрастает по мере увеличения густоты [35].

Вследствие тесной связи относительной высоты с густотой показатель относительной густоты использован при оценке биомассы крон деревьев сосны обыкновенной наряду с возрастом и объемом ствола, и полученное трехфакторное уравнение объяснило 96 % изменчивости биомассы крон [7]. В практиче-

ском приложении относительная высота используется в качестве показателя устойчивости при ветровых и снеговых нагрузках [33; 35], а в теоретическом плане играет важную роль в теории формообразования древесных стволов [3].

Форма и сбег стволов деревьев изучаются уже более 100 лет. Сбег – это скорость изменения диаметра с увеличением высоты вдоль ствола дерева [20]. Уравнение сбega представляет математическое выражение изменения диаметра ствола в связи с «текущей» высотой ствола, зависящее от вида деревьев, возраста древостоя, его густоты и факторов, влияющих на качество местообитания [10; 25]. Путем интегрирования уравнения сбega получают величину объема ствола, а умножением на базисную плотность – его биомассу [21].

В течение последних десятилетий относительная высота (slenderness) используется в качестве одного из факторов, определяющих механические свойства древесины ствола [27]. В экспериментах с сосной замечательной (*Pinus radiata* D. Don) в Новой Зеландии относительная высота объяснила в одном случае 59 % [33] и в другом – 49 % [32], но в древостоях сосны раскидистой (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham) на юге Африки лишь 18 % изменчивости модуля упругости Юнга [14]. Аналогичная положительная связь относительной высоты как с густотой, так и со скоростью прохождения звукового сигнала, тесно коррелирующей с модулем Юнга, была показана в древостоях сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) в США [26]. В древостоях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в Чехии была выявлена отрицательная связь относительной высоты с базисной плотностью древесины и с возрастом дерева [18].

Фенотипический отбор плюсовых деревьев в Швеции способствовал снижению относительной высоты у ели европейской и ее увеличению у сосны обыкновенной по сравнению с соседними деревьями. Аналогичный результат был получен также в исследовании потомств, которое показало, что генетика сыграла заметную роль в фенотипическом облике деревьев. По сравнению с потомством соседних деревьев, потомство плюсовых деревьев ели европейской имело на 5,3 % меньшую относительную высоту, в то время как потомство плюсовых деревьев сосны обыкновенной имело на 1,5 % большую относительную высоту, что указывает на возможность изменения относительной высоты деревьев путем селекции [13].

Целью нашего исследования было

- выявить влияние таксационных показателей на относительную высоту деревьев и древостоев различных лесообразующих родов (подродов) Евразии;

- выполнить их ранжирование по величине относительной высоты при фиксированных таксационных показателях деревьев и древостоев;

- проверить положение Я. С. Медведева [5] о связи относительной высоты со степенью светолюбия деревьев и древостоев на уровне лесообразующих родов Евразии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации поставленной цели исследования использованы две авторские базы данных для лесов Ев-

разии, одна из которых составлена для деревьев в количестве 15390 определений [30], а вторая – для древостоев в количестве 8475 определений [31]. Для нашего анализа из первой из них взяты данные 5858 модельных деревьев и из второй – данные 5175 древостоев.

Поскольку исходные данные как обмеров модельных деревьев, так и инструментальной таксации древостоев, представлены в базах данных несколькими викарирующими видами в пределах того или иного рода Евразии, наш анализ выполнен на уровне родов и подродов. Двухвойные сосны (подрод *Pinus* L.) представлены в основном сосной обыкновенной и в небольшом количестве сосной черной, густоцветной и ладанной; род *Picea* A. Dietr. – елью европейской и сибирской и в небольшом количестве елью аянской; род *Abies* Mill. – пихтой европейской, сибирской и в небольшом количестве пихтой белокорой и Вича; пятивойные сосны (подрод *Haploxydon* (Koehe) Pilg.) – кедром сибирским и корейским; род *Larix* Mill. – лиственницей европейской, сибирской, Сукачева, Гмелина, Каяндера; род *Betula* L. – березой пушистой и повислой; род *Populus* L. – осиною обыкновенной и в небольшом количестве осиною Давида и тополем волосистоплодным; род *Alnus* Gaertn. – ольхой серой и черной, род *Quercus* L. – дубом черешчатым, скальным и монгольским и в небольшом количестве дубом пильчатым; род *Fagus* L. – буком европейским и городчатым; род *Tilia* L. – липой мелколистной и в небольшом количестве липой амурской и маньчжурской.

Исходные данные названных родов в их статистической обработке представлены в табл. 1. Базы данных для деревьев и древостоев составлены независимо одна от другой и, как правило, никак не соотносятся между собой по основным показателям, т. е. многие пробные площади, на которых обмерялись модельные деревья, не вошли в число пробных площадей с инструментальной таксацией древостоев и наоборот.

Судя по табл. 1, разные роды и подроды представлены в широком диапазоне исходных данных – от 2250 пробных площадей для двухвойных сосен до 120–130 – для пятивойных сосен и ольхи. Мы поставили одной из задач выявление зависимости относительной высоты деревьев или древостоев от наиболее информативных таксационных показателей, зная о неизбежной их взаимной корреляции. При большом массиве данных (например, 2250 определений) вероятность ортогональности таксационных показателей намного выше, чем при небольшом массиве (в нашем случае 130 определений). Под ортогональностью признаков мы имеем в виду наличие в исходном материале при одном и том же возрасте максимального диапазона густоты, при фиксированной густоте – максимального диапазона среднего диаметра, при фиксированном среднем диаметре – максимального диапазона запаса древостоев. В случае несоблюдения данного условия таксационные показатели сильно коррелируют, что означает низкую устойчивость результирующей модели. Вследствие разной степени ортогональности таксационных показателей

у разных родов, объясненное варьирование относительной высоты у одних будет представлено одним сочетанием таксационных показателей, а у других – совершенно другим. Например, в нашем случае предварительный регрессионный анализ показал, что в модели для двухвойных сосен запас древостоя будет обеспечивать наибольшую долю варьирования относительной высоты ($t = 22,3 > t_{999} = 3,29$), а в модели

для ольхи запас оказывается статистически не значимым ($t = 0,56 < t_{95} = 1,96$) так же, как и для осины ($t = 1,74 < t_{95} = 1,96$), и подлежит исключению из дальнейшего анализа. Тем самым, не обеспечивается единообразное сочетание таксационных показателей, объясняющих изменчивость относительной высоты, и сопоставление последней по родам не будет обеспечено сопоставимостью «фоновых» условий.

Таблица 1
Характеристика данных измерений модельных деревьев и перечислительной таксации пробных площадей лесообразующих родов

Статистики ⁽¹⁾	Таксационные показатели модельных деревьев ⁽²⁾					Таксационные показатели древостоев пробных площадей ⁽²⁾				
	<i>At</i>	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>Lcr</i>	<i>V</i>	<i>As</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
<i>Pinus</i>										
Mean	44	14,3	13,4	5,9	227,4	54	14,9	13,8	200,2	3,6
Min	8	0,5	1,5	0,7	0,1	5	1,4	1,2	1,4	0,1
Max	387	55,0	36,6	21,4	3985,0	280	60,0	35,7	700,0	83,6
SD	34,8	9,7	7,1	3,1	397,4	38,5	8,9	7,1	135,2	6,1
CV.%	79,0	67,9	53,0	52,0	174,7	71,5	59,7	51,3	67,5	170,0
n	2093	2094	2094	2094	2094	2250	2250	2250	2250	2250
<i>Picea</i>										
Mean	44	13,8	12,6	7,8	295,3	75	19,9	18,0	317,5	2,0
Min	10	0,7	1,4	1,1	0,1	3	0,4	0,3	0,005	0,2
Max	250	67,6	42,8	24,6	6839,0	270	48,9	38,6	1000,0	34,8
SD	31,5	11,5	9,0	4,7	655,0	46,3	10,0	8,0	204,1	2,9
CV.%	71,3	83,0	71,4	60,4	221,8	62,1	50,1	44,5	64,3	142,6
n	712	712	712	711	712	582	582	582	582	582
<i>Abies</i>										
Mean	53	18,2	15,0	9,5	433,4	80	21,1	17,9	310,4	2,0
Min	8	0,8	1,7	1,3	0,3	16	1,6	2,2	21,0	0,1
Max	180	65,5	32,7	22,2	5031,0	200	74,0	45,0	1294,0	54,1
SD	33,7	12,5	8,1	4,5	653,7	35,2	9,6	6,7	222,3	4,4
CV.%	64,0	68,5	53,9	47,3	150,8	43,8	45,3	37,4	71,6	222,3
n	260	260	260	260	260	228	228	228	228	228
<i>Haploxyton</i>										
Mean	43	9,9	8,4	5,7	92,7	152	29,1	19,9	326,6	1,1
Min	15	1,5	1,7	1,5	0,7	28	2,0	2,4	27,9	0,1
Max	157	30,5	24,0	14,1	769,0	380	62,8	31,0	656,0	16,2
SD	37,4	6,9	5,6	2,9	172,9	63,8	10,5	5,5	157,8	1,6
CV.%	87,1	70,1	66,9	51,7	186,5	42,0	36,1	27,4	48,3	146,3
n	80	80	80	80	80	120	120	120	120	120
<i>Larix</i>										
Mean	78	14,6	12,9	7,1	214,3	127	17,2	15,3	154,9	2,3
Min	14	0,5	1,5	1,1	0,1	14	1,0	1,8	0,5	0,01
Max	424	72,9	34,0	21,8	6276,0	380	72,9	35,0	612,0	112,0
SD	71,7	9,2	5,6	3,4	480,7	70,8	10,2	7,2	137,8	8,1
CV.%	92,2	63,1	43,3	48,5	224,3	56,0	58,9	47,2	89,0	359,7
n	255	256	256	256	256	236	235	236	236	235
<i>Betula</i>										
Mean	40	14,4	15,8	7,7	183,4	45	13,4	15,1	167,9	5,4
Min	6	1,1	2,3	1,3	0,2	5	1,0	1,5	0,5	0,2
Max	126	41,8	34,5	17,8	1294,7	240	48,2	30,3	484,0	116,0
SD	19,0	7,6	5,9	3,0	208,0	27,7	7,8	6,6	103,1	13,3
CV.%	48,1	53,0	37,1	38,4	113,4	61,8	57,7	43,5	61,4	246,7
n	934	934	934	934	934	482	482	482	481	482

Окончание таблицы 1

Статистики ⁽¹⁾	Таксационные показатели модельных деревьев ⁽²⁾					Таксационные показатели древостоев пробных площадей ⁽²⁾				
	<i>At</i>	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>Lcr</i>	<i>V</i>	<i>As</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
<i>Populus</i>										
Mean	27	15,1	15,3	6,6	243,2	32	14,2	15,3	203,2	5,8
Min	6	1,1	2,7	1,4	1,0	2	1,1	2,2	3,1	0,2
Max	57	42,8	28,8	15,0	1572,0	140	38,3	31,0	772,0	131,4
SD	13,1	9,8	5,9	2,8	334,7	22,5	8,8	6,8	133,0	13,8
CV.%	47,6	64,9	38,3	42,3	137,6	71,2	62,1	44,6	65,5	239,4
n	343	343	343	343	343	242	242	242	242	242
<i>Alnus</i>										
Mean	35	16,3	17,3	7,1	272,3	36	14,8	16,2	229,6	4,9
Min	6	2,2	4,9	1,5	1,6	5	1,2	2,7	18,9	0,3
Max	95	42,1	27,8	18,0	1508,0	93	32,0	28,0	558,0	96,2
SD	19,9	8,3	5,4	2,7	322,4	18,1	7,3	5,7	124,9	12,0
CV.%	57,0	51,1	31,2	38,7	118,4	51,0	49,6	35,2	54,4	246,9
n	397	397	397	397	397	134	134	134	134	134
<i>Quercus</i>										
Mean	41	16,1	14,6	6,1	285,4	67	21,5	17,2	220,5	2,0
Min	6	1,5	2,2	0,6	0,8	8	1,5	2,2	5,8	0,1
Max	166	55,9	32,6	18,7	3812,0	250	74,0	34,1	614,0	41,2
SD	24,3	9,8	6,8	3,8	418,1	47,2	13,5	7,4	141,7	3,4
CV.%	59,9	61,2	46,7	63,3	146,5	70,7	62,8	43,3	64,3	167,1
n	365	365	365	365	365	448	448	448	448	448
<i>Fagus</i>										
Mean	34	11,6	14,0	6,9	166,4	77	22,9	19,1	305,6	1,9
Min	8	1,1	2,8	2,1	0,3	8	1,5	2,5	18,0	0,1
Max	172	60,5	39,3	24,2	5877,5	400	52,8	39,0	754,0	51,8
SD	23,0	8,0	6,4	3,1	504,0	46,4	12,3	7,6	151,2	4,5
CV.%	67,1	68,4	45,6	44,5	302,9	60,2	53,7	39,6	49,5	233,5
n	229	229	229	229	229	207	204	203	206	205
<i>Tilia</i>										
Mean	56	19,0	17,8	11,2	320,9	74	22,6	17,7	240,2	1,7
Min	21	4,0	7,5	2,6	5,0	5	1,5	1,7	15,0	0,1
Max	115	38,6	24,8	19,6	1093,0	150	44,3	28,0	619,0	52,0
SD	18,7	7,7	4,0	4,2	266,3	42,9	10,5	6,0	135,2	4,2
CV.%	33,6	40,3	22,7	37,4	83,0	57,8	46,6	34,0	56,3	243,4
n	188	188	188	188	188	249	249	249	249	249

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

⁽²⁾*At* – возраст дерева, лет; *d* – диаметр ствола дерева, см; *h* – высота дерева, м; *Lcr* – длина кроны, м; *V* – объем ствола дерева, дм³; *As* – средний возраст деревьев в древостое, лет; *D* – средний диаметр древостоя на высоте груди, см; *H* – средняя высота древостоя, м; *M* – запас, м³/га; *N* – густота древостоя, тыс. экз./га.

Однако современные возможности регрессионного анализа позволяют включать в расчет многофакторных зависимостей результаты подобного неравновесного количества исходных данных по разным родам (подродам), используя метод так называемых фиктивных переменных (*dummy variables*). Проблема неравновесных данных (в дисперсионном анализе – это неравномерный комплекс) снимается применением систем уравнений, взаимно «синхронизированных» блоком фиктивных переменных [1]. Каждый блок фиктивных переменных, для наших 11 родов, обозначенных последовательностью $X_0 \dots X_{10}$, представляет группу модельных деревьев или пробных площадей, принадлежащую на данный род, и повторяется в исходной матрице экспериментальных данных согласно количеству модель-

ных деревьев или пробных площадей для данного рода. За исходный (нулевой) блок в нашем случае приняты данные для подрода двухвойных сосен, наиболее представленных в базе данных, хотя выбор рода для нулевого блока или его замена другим никак не влияет на получаемые результаты. Этот блок закодирован нулями для всех родов. Каждый из остальных 10 родов имеет в блоке одну единицу (табл. 2).

Далее мы рассчитываем модели так называемого смешанного типа (*mixed models*), включающие в качестве независимых переменных как численные переменные (таксационные показатели), так и блок фиктивных переменных [15]. Поскольку базы данных на уровнях дерева и древостоя не связаны между собой, поставленные задачи исследования мы выполняем для них порознь.

Таблица 2

Схема кодирования блоком фиктивных переменных принадлежности исходных данных к разным родам

Род (подрод)	Блок фиктивных переменных									
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
<i>Pinus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Picea</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Abies</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Haploxyton</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Larix</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Betula</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Populus</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Alnus</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Quercus</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Fagus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Tilia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

(а) Моделирование относительной высоты деревьев

Для ранжирования родов по величине относительной высоты необходимо выявить структуру модели, т. е. выполнить анализ информативности таксационных показателей дерева в объяснении изменчивости искомого показателя. На предварительном этапе для каждого рода отдельно рассчитывали зависимость относительной высоты от основных таксационных показателей дерева:

$$\ln(h/d) = a_0 + a_1 \ln At + a_2 (\ln At)^2 + a_3 \ln V + a_4 (\ln At)(\ln V) + a_5 \ln(Lcr/H) + \sum_{bi} X_i, \quad (1)$$

где h/d – относительная высота дерева, м/см; $(\ln At)(\ln V)$ – комбинированная переменная учитывающая совместное действие возраста и объема ствола; Lcr/h – относительная длина кроны, м/м; $\sum_{bi} X_i$ – блок фиктивных переменных.

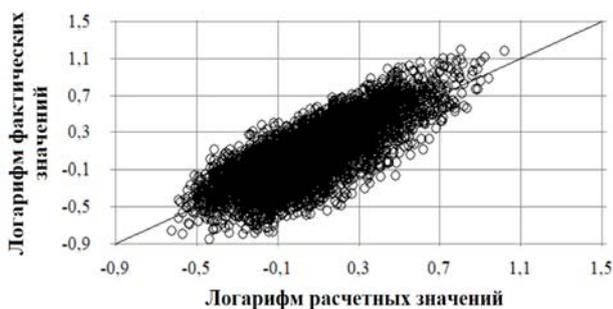


Рис. 1. Соотношение фактических и расчетных по модели (5) значений h/d

Зависимость относительной высоты от возраста в логарифмических координатах введена в модель в виде полинома второго порядка, поскольку с возрастом названная зависимость выходит на плато. В процессе регрессионного анализа выяснилось, что регрессионный коэффициент a_5 при переменной $\ln(Lcr/H)$ статистически значим, и этот факт подтверждает ранее установленную исследователями обратную

пропорциональную связь относительной длины кроны и относительной высоты дерева. Но включив относительную длину кроны в модель в качестве одной из независимых переменных, мы при табулировании модели по средним значениям независимых переменных выравняем все роды не только по возрасту и объему ствола, но и по величине относительной длины кроны, тогда как она не может быть стабильной при родовой изменчивости относительной высоты.

В итоге была получена следующая модель:

$$\begin{aligned} \ln(h/d) = & -0,8781 + 0,8052 \ln A - 0,1099 (\ln A)^2 - \\ & - 0,2098 \ln V + 0,0229 (\ln A)(\ln V) - 0,1070 X_1 - \\ & - 0,0842 X_2 - 0,2959 \\ & X_3 - 0,0681 X_4 + 0,1847 X_5 + 0,2122 X_6 + \\ & + 0,2479 X_7 + 0,0152 X_8 + 0,2243 X_9 + 0,0845 X_{10}; \\ \text{adj}R^2 = & 0,464; \text{SE} = 0,23. \end{aligned} \quad (5)$$

В модели (5) и далее: $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE = стандартная ошибка модели; свободный член модели скорректирован на логарифмическое преобразование. Регрессионные коэффициенты при численных переменных модели (5) достоверны на уровне $p < 0,001$. Вклады переменных возраста, объема ствола и блока фиктивных переменных в объясняемую ими изменчивость составили соответственно 22, 12 и 66 %, что означает, что таксационные показатели и межродовая изменчивость относительной высоты объясняют соответственно 34 и 66 % изменчивости искомого показателя. Соотношение фактических и расчетных значений h/d показано на рис. 1.

Различия коэффициентов при фиктивных переменных, кодирующих принадлежность данных к тому или иному роду, означают величину сдвига их h/d вдоль по оси ординат. Подставив в модель (5) средние значения возраста и объема стволов, приведенные в табл. 1 для каждого рода, мы получаем возможность названные сдвиги использовать для ранжирования родов по величине h/d в их убывающей последовательности (рис. 2).

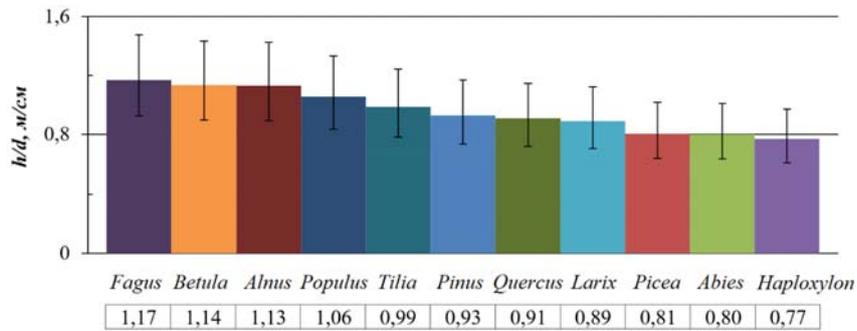


Рис. 2. Диаграмма распределения 11 лесобразующих родов Евразии по величине относительной высоты деревьев

(б) Моделирование относительной высоты древостоев

На предварительном этапе для каждого рода отдельно рассчитывали зависимость относительной высоты древостоев от их основных таксационных показателей:

$$\ln(H/D) = a_0 + a_1 \ln A_s + a_2 \ln N + a_3 (\ln A_s)(\ln N) + a_4 \ln M, \quad (6)$$

где H/D – относительная высота древостоя, м/см; $(\ln A_s)(\ln N)$ – комбинированная переменная, учитывающая совместное влияние возраста и густоты на искомый показатель. В результате расчета модели (6) по каждому роду установлено, что регрессионный коэффициент a_3 при переменной $(\ln A_s)(\ln N)$ статистически значим лишь для древостоев 3 из 11 родов, а именно, сосны, ели и березы ($t = 4,9-9,8 > t_{999} = 3,29$). Поэтому переменная $(\ln A_s)(\ln N)$ исключена из структуры модели (6), и последующий анализ выполнен согласно следующей модели:

$$\ln(H/D) = a_0 + a_1 \ln A_s + a_2 \ln N + a_3 \ln M + \sum b_i X_i. \quad (7)$$

Регрессионные коэффициенты при численных переменных модели (7) достоверны на уровне $p < 0,001$, кроме коэффициента a_1 при переменной $\ln A_s$ ($t = 1,0 < t_{95} = 1,96$). Поэтому мы исключаем ее из числа независимых переменных, и получаем окончательную модель:

$$\begin{aligned} \ln(H/D) = & -0,5084 + 0,1757 \ln N + 0,0731 \ln M + \\ & + 0,0093 X_1 - 0,0149 X_2 - 0,1857 X_3 + 0,1415 X_4 + \\ & + 0,2385 X_5 + 0,2057 X_6 + 0,1916 X_7 + 0,0308 X_8 + \\ & + 0,0273 X_9 - 0,0115 X_{10}; \\ \text{adj}R^2 = & 0,591; \text{SE} = 0,17. \end{aligned} \quad (8)$$

Регрессионные коэффициенты при численных переменных модели (8) достоверны на уровне $p < 0,001$. Вклады переменных $\ln N$, $\ln M$ и блока фиктивных переменных в объясненную изменчивость составили соответственно 37, 14 и 49 %, что означает, что таксационные показатели и межродовая изменчивость относительной высоты объясняют соответственно 51 и 49 % изменчивости искомого показателя, что несколько отличается от соответствующих показателей модели (5). Соотношение фактических и расчетных по модели (8) значений H/D показано на рис. 3.

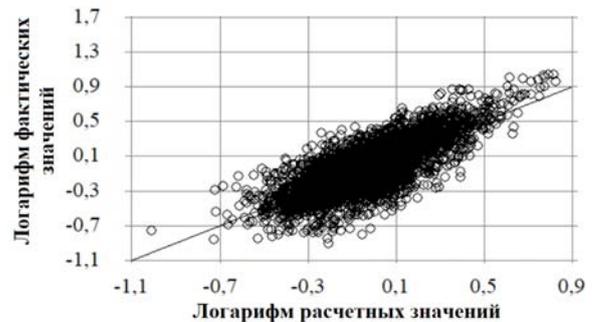


Рис. 3. Соотношение фактических и расчетных по модели (8) значений H/D

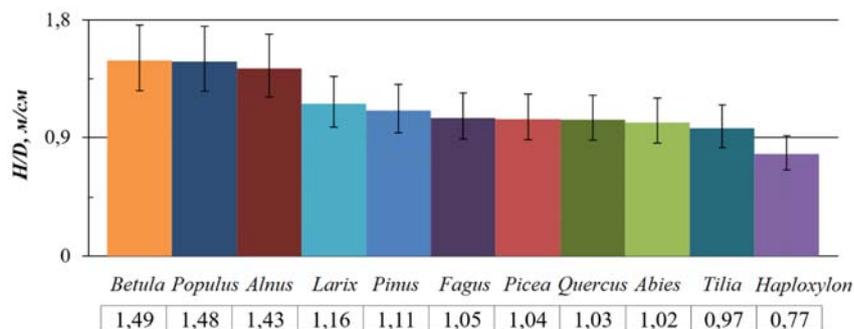


Рис. 4. Диаграмма распределения 11 лесобразующих родов Евразии по величине относительной высоты древостоев

Таблица 3
Коэффициенты ранговой корреляции согласно зависимостям (9), (10) и (11)

Зависимость	Источник и соответствующая независимая переменная							В среднем
	[5] (Y)	[17] (S ₁)	[22] (S ₂)	[16] (S ₃)	[10] (S ₄)	[4] (S ₅)	[34] (S ₆)	
(9)	–	0,91	0,83	0,98	0,99	0,93	0,96	0,93
(10)	0,41	0,30	0,13	0,21	0,15	0,19	0,42	0,26
(11)	0,71	0,76	0,51	0,61	0,66	0,63	0,58	0,72

Подставив в модель (8) средние значения густоты и запаса, приведенные в табл. 1 для каждого рода, мы получаем диаграмму распределения 11 лесообразующих родов Евразии по величине относительной высоты древостоев H/D (рис. 4).

(в) Проверка положения Я. С. Медведева [5] о связи относительной высоты со степенью светолюбия дерева на уровне лесообразующих родов Евразии

Отношение древесных видов к свету Н.С. Нестеров [8] называет краеугольным камнем лесоведения. Он приводит основные известные классификации древесных видов по степени светолюбия (теневыносливости) и отдает предпочтение методу Я. С. Медведева [5] как наиболее объективному, построенному на количественной основе. Поэтому, используя технику рангового корреляционного анализа [6], вначале попытаемся соотнести ранее предложенные классификации [4; 10; 16; 17; 22; 34] с классификацией Я. С. Медведева [5]. Для этого ранги (порядковые номера) древесных видов его классификации (Y) последовательно коррелируем с рангами тех же видов в классификациях предыдущих исследователей (S₁, S₂, ... S₆) согласно зависимостям

$$Y = f(S_1); Y = f(S_2); \dots Y = f(S_6). \quad (9)$$

Рассчитав уровни корреляции рангов по Я. С. Медведеву с рангами классификаций его предшественников, выполненных на уровне видов, на втором этапе мы попытаемся выяснить уровни корреляции между рангами (Z), полученными на рис. 1 в порядке снижения h/d вдоль по оси абсцисс (что должно соответствовать повышению теневыносливости, или снижению светолюбия, анализируемых древесных родов), и рангами классификаций всех предшествующих исследователей, выполненных на уровне древесных видов, согласно зависимостям

$$Z = f(Y); Z = f(S_1); Z = f(S_2); \dots Z = f(S_6). \quad (10)$$

Результаты последовательных расчетов зависимостей (9) и (10), показанные в табл. 3, свидетельствуют о существенном различии корреляций рангов светолюбия между видами (9) с корреляциями рангов светолюбия, полученных нами на уровне родов и рангов светолюбия видов, по методу Я. С. Медведева [5].

Ранжирование древостоев по степени светолюбия родов (см. рис. 4) использовано далее для сопоставления его с ранжированиями деревьев по степени светолюбия видов. Для этого зависимости (10) модифицированы к виду (11) с тем отличием, что ранжирование деревьев (Z) заменено ранжированием древостоев (J):

$$J = f(Y); Z = f(S_1); Z = f(S_2); \dots Z = f(S_6). \quad (11)$$

Как видим (см. табл. 3), ранжирование видов по светолюбию, предложенное Я. С. Медведевым, хорошо согласуется ($r = 0,93$) с ранжированиями видов, полученными другими исследователями. Но наше ранжирование, выполненное по методу Я. С. Медведева на уровне родов, а не видов, согласуется с остальными ранжированиями хуже, а именно для деревьев $r = 0,26$ и для древостоев $r = 0,72$.

Первые исследователи светолюбия европейских видов отмечали существенные различия по светолюбию березы пушистой и березы повислой, а сосна обыкновенная и черная были отнесены соответственно к светолюбивым и теневыносливым видам [17]. Существенные различия по светолюбию были показаны для сосен обыкновенной, черной и веймутовой [16]. Различия по светолюбию между ольхой черной и серой, а также между сосной обыкновенной и крымской были установлены М. К. Турским [10]. Таким образом, при объединении видов в роды на трансконтинентальном уровне неучтенное нами межвидовое варьирование на уровне родов [28] привело к смещениям в их ранжировании по отношению к ранжированию видов, что и выразилось в менее тесных корреляциях (0,26 и 0,72 против 0,93).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по материалам 5858 модельных деревьев и 5175 древостоев для основных древесных родов (подродов), произрастающих на территории Евразии, впервые установлено влияние таксационных показателей на относительную высоту деревьев и древостоев различных лесообразующих родов и выполнено их ранжирование по величине относительной высоты при фиксированных таксационных показателях. Все регрессионные коэффициенты построенных моделей значимы на уровне $p < 0,001$, что обеспечивает воспроизводимость полученных результатов. Распределение родов по относительной высоте рассмотрено в качестве характеристики их светолюбия. Ранговый корреляционный анализ показал высокую корреляцию рангов европейских видов по светолюбию (около 0,93) в семи известных шкалах, но корреляция между рангами по светолюбию древесных родов и соответствующими рангами европейских видов оказалась существенно ниже (0,26 и 0,72), по-видимому, вследствие неучтенного межвидового варьирования изменчивости светолюбия деревьев и древостоев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М. : Статистика, 1973. 392 с.
2. Керн Э. Э. Основы лесоводства. М. : Новая деревня, 1924. 307 с.
3. Кофман Г. Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск : Наука. Сиб. отд., 1986. 211 с.

4. Любименко В. Н. О чувствительности хлорофиллоносного аппарата светолюбивых и теневыносливых растений. С-Петербург : тип. СПб. градоначальства, 1905. 27 с.
5. Медведев Я. С. Опыт исследования гущины леса // Лесной журнал. 1910. Вып. 4-5. С. 432–438.
6. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М. : Наука, 1971. 576 с.
7. Нагимов З. Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. 06.03.03. Екатеринбург : УГЛТА, 2000. 40 с.
8. Нестеров Н. С. Очерки по лесоведению. М. : Госсельхозиздат, 1960. 485 с.
9. Собачкин Д. С., Бенькова В. Е., Собачкин П. С., Бузыкин А. И. Влияние густоты на таксационные показатели сосновых молодяков естественного и искусственного происхождения // Лесоведение. 2000. № 2. С. 3–9.
10. Турский М. К. Лесоводство. М. : Изд. В. Н. Маракуева, 1892. 356 с.
11. Усольцев В. А. О закономерностях роста березы порослевого и семенного происхождения // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1978. № 6. С. 87–93.
12. Эйтинген Г. Р. Влияние густоты древостоя на рост насаждений // Лесной журнал. 1918. № 6-8. С. 241–276.
13. Egbäck S., Karlsson B., Högberg K.-A. et al. Effects of phenotypic selection on height-diameter ratio of Norway spruce and Scots pine in Sweden // *Silva Fennica*. 2018. Vol. 52(2). Article id7738.
14. Erasmus J., Kunneke A., Drew D. M., Wessels C. B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density // *Forestry*. 2018. Vol. 91. P. 247–258.
15. Fu L. Y., Zeng W. S., Tang S. Z. et al. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China // *Journal of Forest Science*. 2012. Vol. 58. N. 3. P. 101–115.
16. Gayer K. Der gemischte Wald, seine Begründung und Pflege, insbesondere durch Horst- und Gruppenwirtschaft. Berlin: Verlag P. Parey, 1886. 168 p.
17. Geyer G. Lehrbuch der forstlichen Bodenkunde und Klimatologie. Erlangen: Verlag von F. Enke, 1856. 569 p.
18. Giagli K., Vavrčík H., Fajstavr M. et al. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region // *Wood Research*. 2019. Vol. 64(6). P. 1011–1022.
19. Gomat H. Y., Deleporte P., Moukini R. et al. What factors influence the stem taper of *Eucalyptus*: growth, environmental conditions, or genetics? // *Annals of Forest Science*. 2011. Vol. 68(1). P. 109–120.
20. Gray H. R. The form and taper of forest-tree stems. Oxford Univ., Imp. For. Inst. Paper 32, 1956. 74 p.
21. Jiang L., Brooks J.R. Taper, volume, and weight equations for red pine in West Virginia // *Northern Journal of Applied Forestry*. 2008. Vol. 25(3). P. 151–153.
22. Kraft G. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth's Verlag, 1884. 147 p.
23. Krajnc L., Farrelly N., Harte A. M. The influence of crown and stem characteristics on timber quality in softwoods // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 435. P. 8–17.
24. Méndez-Dewar G., González-Espinosa M., Equihua M. Spatial heterogeneity of light and tree sapling responses in the understory of disturbed montane forests // *iForest*. 2014. Vol. 8. P. 448–455.
25. Pang L., Ma Y., Sharma R. P. et al. Developing an improved parameter estimation method for the segmented taper equation through combination of constrained two-dimensional optimum seeking and least square regression // *Forests*. 2016. Vol. 7. Article 194.
26. Roth B. E., Li X., Huber D. A., Peter G. F. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the south-eastern USA // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 246. P. 155–162.
27. Sharma R. K. Comparison of development of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) clones in monoclonal and clonal mixture plots. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Forestry in the University of Canterbury, 2008. 241 p.
28. Tang Q., Huang Y., Ding Y., Zang R. Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests // *Biodiversity Science*. 2016. Vol. 24(3). P. 262–270.
29. Tumenbayeva A. R., Sarsekova D. N., Malek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2018. Vol. 60(3). P. 137–142.
30. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020a. Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9647>.
31. Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020b. Available at: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx.
32. Waghorn M. J., Watt M. S., Mason E. G. Influence of tree morphology, genetics, and initial stand density on outerwood modulus of elasticity on 17-year-old *Pinus radiata* // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 244. P. 86–92.
33. Watt M. S., Moore J. R., Facon J.-P. et al. Modelling environmental variation in Young's modulus for *Pinus radiata* and implications for determination of critical buckling height // *Annals of Botany*. 2006. Vol. 98. P. 765–775.
34. Wiesner J. Der Lichtgenuss der Pflanzen: photometrische und physiologische Untersuchungen mit besonderer Rücksichtnahme auf Lebensweise, geographische Verbreitung und Kultur der Pflanzen. Leipzig: Verlag von W. Engelmann, 1907. 322 p.
35. Wilson J. S., Oliver C. D. Stability and density management in Douglas-fir plantations // *Canadian Journal of Forest Research*. 2011. Vol. 30(6). P. 910–920.

REFERENCES

1. Dreyper N., Smit G. Prikladnoy regressionnyy analiz. M. : Statistika, 1973. 392 s.
2. Kern E. E. Osnovy lesovodstva. M. : Novaya derevnya, 1924. 307 s.
3. Kofman G. B. Rost i forma derevyev. Novosibirsk : Nauka. Sib. otd., 1986. 211 s.

4. Lyubimenko V. N. O chuvstvitel'nosti khlorofilononogo apparata svetolyubivyykh i tenevynoslivyykh rasteniy. S-Peterburg : tip. SPb. gradonachal'stva, 1905. 27 s.
5. Medvedev YA. S. Opyt issledovaniya gushchiny lesa // Lesnoy zhurnal. 1910. Vyp. 4-5. S. 432–438.
6. Mitropol'skiy A. K. Tekhnika statisticheskikh vychisleniy. M. : Nauka, 1971. 576 s.
7. Nagimov Z. Ya. Zakonomernosti rosta i formirovaniya nadzemnoy fitomassy sosnovykh drevostoyev : avtoref. dis. ... d-ra s.-kh. nauk. 06.03.03. Yekaterinburg : UGLTA, 2000. 40 s.
8. Nesterov N. S. Ocherki po lesovedeniyu. M. : Gossel'khozizdat, 1960. 485 s.
9. Sobachkin D. S., Ben'kova V. Ye., Sobachkin R. S., Buzykin A. I. Vliyaniye gustoty na taksatsionnyye pokazateli sosnovykh molodnyakov yestestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya // Lesovedeniye. 2000. № 2. S. 3–9.
10. Turskiy M. K. Lesovodstvo. M. : Izd. V. N. Marakuyeva, 1892. 356 c.
11. Usol'tsev V. A. O zakonomernostyakh rosta berezy poroslevogo i semennogo proiskhozhdeniya // Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki Kazakhstana. 1978. № 6. S. 87–93.
12. Eyttingen G. R. Vliyaniye gustoty drevostoya na rost nasazhdeniy // Lesnoy zhurnal. 1918. № 6-8. S. 241–276.
13. Egbäck S., Karlsson B., Högborg K.-A. et al. Effects of phenotypic selection on height-diameter ratio of Norway spruce and Scots pine in Sweden // *Silva Fennica*. 2018. Vol. 52(2). Article id7738.
14. Erasmus J., Kunneke A., Drew D. M., Wessels C. B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density // *Forestry*. 2018. Vol. 91. P. 247–258.
15. Fu L. Y., Zeng W. S., Tang S. Z. et al. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China // *Journal of Forest Science*. 2012. Vol. 58. N. 3. P. 101–115.
16. Gayer K. Der gemischte Wald, seine Begründung und Pflege, insbesondere durch Horst- und Gruppenwirtschaft. Berlin: Verlag P. Parey, 1886. 168 p.
17. Geyer G. Lehrbuch der forstlichen Bodenkunde und Klimatologie. Erlangen: Verlag von F. Enke, 1856. 569 p.
18. Giagli K., Vavrčík H., Fajstavr M. et al. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region // *Wood Research*. 2019. Vol. 64(6). P. 1011–1022.
19. Gomat H. Y., Deleporte P., Moukini R. et al. What factors influence the stem taper of *Eucalyptus*: growth, environmental conditions, or genetics? // *Annals of Forest Science*. 2011. Vol. 68(1). P. 109–120.
20. Gray H. R. The form and taper of forest-tree stems. Oxford Univ., Imp. For. Inst. Paper 32, 1956. 74 p.
21. Jiang L., Brooks J.R. Taper, volume, and weight equations for red pine in West Virginia // *Northern Journal of Applied Forestry*. 2008. Vol. 25(3). P. 151–153.
22. Kraft G. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth's Verlag, 1884. 147 p.
23. Krajnc L, Farrelly N., Harte A. M. The influence of crown and stem characteristics on timber quality in softwoods // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 435. P. 8–17.
24. Méndez-Dewar G., González-Espinosa M., Equihua M. Spatial heterogeneity of light and tree sapling responses in the understory of disturbed montane forests // *iForest*. 2014. Vol. 8. P. 448–455.
25. Pang L., Ma Y., Sharma R. P. et al. Developing an improved parameter estimation method for the segmented taper equation through combination of constrained two-dimensional optimum seeking and least square regression // *Forests*. 2016. Vol. 7. Article 194.
26. Roth B. E., Li X., Huber D. A., Peter G. F. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the south-eastern USA // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 246. P. 155–162.
27. Sharma R. K. Comparison of development of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) clones in monoclonal and clonal mixture plots. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Forestry in the University of Canterbury, 2008. 241 p.
28. Tang Q., Huang Y., Ding Y., Zang R. Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests // *Biodiversity Science*. 2016. Vol. 24(3). P. 262–270.
29. Tumenbayeva A. R., Sarsekova D. N., Malek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2018. Vol. 60(3). P. 137–142.
30. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020a. Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9647>.
31. Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020b. Available at: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx.
32. Waghorn M. J., Watt M. S., Mason E. G. Influence of tree morphology, genetics, and initial stand density on outerwood modulus of elasticity on 17-year-old *Pinus radiata* // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 244. P. 86–92.
33. Watt M. S., Moore J. R., Facon J.-P. et al. Modelling environmental variation in Young's modulus for *Pinus radiata* and implications for determination of critical buckling height // *Annals of Botany*. 2006. Vol. 98. P. 765–775.
34. Wiesner J. Der Lichtgenuss der Pflanzen: photometrische und physiologische Untersuchungen mit besonderer Rücksichtnahme auf Lebensweise, geographische Verbreitung und Kultur der Pflanzen. Leipzig: Verlag von W. Engelmann, 1907. 322 p.
35. Wilson J. S., Oliver C. D. Stability and density management in Douglas-fir plantations // *Canadian Journal of Forest Research*. 2011. Vol. 30(6). P. 910–920.

© Усольцев В. А., Цепордей И. С.,
Норицин Д. В., 2023