

4. Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 04.12.2006 N 200-FZ.

5. Minnikhanov R.N. Strategiya ustoychivogo razvitiya lesnogo kompleksa Respubliki Tatarstan na osnove optimizatsii lesopolzovaniya ivosproizvodstva lesnykh resursov na primere Sabinskogo lesnichestva. – Kazan: Izd-vo KGAU, 2016. – 120 s.

6. Pravila zagotovki drevesiny: prikaz № 184 MPR RF ot 16.07.07. – M., 2007. – 18 s.

7. Tikhonov A.S. Lesovodstvennye osnovy razlichnykh sposobov rubki lesa dlya vozobnovleniya eli. – L.: Lesn. prom-st, 1979. – 248 s.

8. Bliss J.C. Public perceptions of clearcutting // Journal of Forestry. – 2000. – Vol. 98 (12). – P. 4-9.

9. Hansis R. The Social Acceptability of Clearcutting in the Pacific Northwest // Human Organization. – 1995. – Vol. 54 (1). – P. 95-101.

10. Kerr G. The use of silvicultural systems to enhance the biological diversity of plantation forests in Britain // Forestry. – 1999. – Vol. 72 (3). – P. 191-205.

11. Spellerberg I.F., Sawyer J.W.D. Standards for biodiversity: a proposal based on biodiversity standards for forest plantations // Biodiversity and Conservation. – 1996. – Vol. 5. – P. 447-459.

12. Iroume A., Mayen O., Huber A. Run-off and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile // Hydrological Processes. – 2006. – Vol. 20 (1). – P. 37-50.



УДК 630*231

В.А. Усольцев, К.В. Колчин, А.А. Маленко
V.A. Usoltsev, K.V. Kolchin, A.A. Malenko

СМЕЩЕНИЯ ВСЕОБЩИХ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ЛИСТВЕННИЦЫ

SIGN CHANGE IN GENERIC ALLOMETRIC MODELS IN LOCAL ESTIMATION OF LARCH BIOMASS

Ключевые слова: *Larix Mill.*, аллометрические модели, фитомасса дерева, пробные площади, региональные различия, стандартные и систематические ошибки.

Леса играют важную роль в снижении количества парниковых газов в атмосфере и предотвращении изменения климата. Одним из способов количественной оценки углеродного обмена в лесном покрове является определение изменений в запасах его фитомассы и углерода со временем. Запас фитомассы на единице площади начинается с определения его на уровне отдельных деревьев. Известно устойчивое аллометрическое соотношение между фитомассой дерева и его диаметром (простая аллометрия) или между фитомассой дерева и несколькими массообразующими показателями (многофакторная аллометрия). В настоящее время в разных странах и континентах проводятся интенсивные исследования применимости так называемых «всеобщих» аллометрических моделей (generic allometric models),

которые обеспечивали бы аллометрической модели приемлемую точность при оценке фитомассы насаждений. На основе сформированной базы данных о фитомассе деревьев *Larix* в количестве 420 определений построены аллометрические модели четырёх видов, включающие в себя фиктивные переменные, которые дают возможность дать региональные оценки их фитомассы по известным морфометрическим показателям (диаметр ствола и кроны, высота дерева). Предложенные аллометрические модели свидетельствуют об их адекватности фактическим данным (коэффициент детерминации от 0,819 до 0,988) и могут применяться при региональных оценках фитомассы деревьев лиственниц. Однако всеобщие аллометрические модели, построенные по всему массиву фактических данных, дают в экорегионах слишком большие стандартные ошибки (до 231%) и неприемлемые смещения обоих знаков (от +95 до -52%), что исключает возможность их применения на региональных уровнях.

Keywords: genus *Larix* (*Larix* Mill.), allometric models, tree biomass, sample plots, regional differences, standard errors, systematic error.

Forests play an important role in reducing the amount of greenhouse gases in the atmosphere and preventing climate change. A way to quantify carbon exchange in forest cover is estimating the changes in its biomass and carbon pools over time. Biomass estimation on an area unit starts with cutting sample trees and weighing their biomass. Stable relationship between tree biomass and its diameter (simple allometry), or between tree biomass and a number of morphometric indices (multi-factor allometry) are known. At present, in different countries the studies of the applicability of the so-called generic allometric models are intensified, that would give acceptable accuracy in estimating forest biomass. In

this study, based on the compiled database of tree biomass of genus *Larix* (420 trees), allometric models of four modifications are designed; those include the block of independent dummy variables. These models enable to give regional estimates of tree biomass when using some known indices (stem and crown diameter and tree height). The proposed allometric models are indicative of their adequacy to the actual data (coefficients of determination are 0.819 to 0.988) and may be applied in regional estimation of larch tree biomass. However, generic allometric models built using the total quantity of actual data in different eco-regions give too large standard errors (up to 231%) and unacceptable changes of both signs (from +95 to -52%) that excludes any possibility of their application at regional levels.

Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., проф., Засл. лесовод России, Уральский государственный лесотехнический университет; гл. н.с., Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург. Тел.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Колчин Кирилл Владимирович, аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Маленко Александр Анатольевич, д.с.-х.н., зав. каф. лесного хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru

Usoltsev Vladimir Andreyevich, Dr. Agr. Sci., Prof., Ural State Forestry Engineering University; Chief Staff Scientist, Botanical Garden, Ural Branch, Rus. Acad. of Sci., Yekaterinburg. Ph.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Kolchin Kirill Vladimirovich, post-graduate student, Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Malenko Aleksandr Anatolyevich, Dr. Agr. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Forestry, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

Леса играют важную роль в снижении количества парниковых газов в атмосфере и предотвращении изменения климата. Одним из способов количественной оценки углеродного обмена в лесном покрове является определение изменений в запасах его фитомассы и углерода со временем. Запас фитомассы на единице площади начинается с определения его на уровне отдельных деревьев. Известно строгое и устойчивое аллометрическое соотношение между фитомассой дерева и его диаметром (простая аллометрия) или между фитомассой дерева и несколькими массообразующими (морфометрическими) показателями (многофакторная аллометрия). В настоящее время в разных странах и континентах проводятся интенсивные исследования применимости так называемых «всеобщих» аллометрических моделей (generic, generalized, common models), которые обеспечивали бы аллометрической модели приемлемую точность при оценке фитомассы насаждений. Хотя применяемые всеобщие уравнения характеризуются высокими показателями адекватности, их использование при расчете фитомассы на

единице площади данного региона или конкретного древостоя не гарантирует приемлемую точность оценки. В предыдущей работе [1] было показано, что с целью минимизации затрат при максимуме точности оценок необходим анализ смещений, обусловленных применением той или иной всеобщей аллометрической модели в локальных географических регионах.

Цель и методика исследований

В исследовании мы ограничиваемся анализом смещений всеобщих аллометрических уравнений при локальной оценке фитомассы деревьев лиственницы (*Larix* Mill.). В качестве одного из методических подходов к анализу названных смещений нами принят метод фиктивных переменных [2, 3]. Фактические данные фитомассы деревьев лиственницы (420 определений) после извлечения их из базы данных [4] объединены по 4 экорегионам Евразии (рис. 1) и обозначены, соответственно, четырьмя фиктивными переменными от X_1 до X_4 . В качестве нулевого варианта принят весь массив данных (табл. 1).

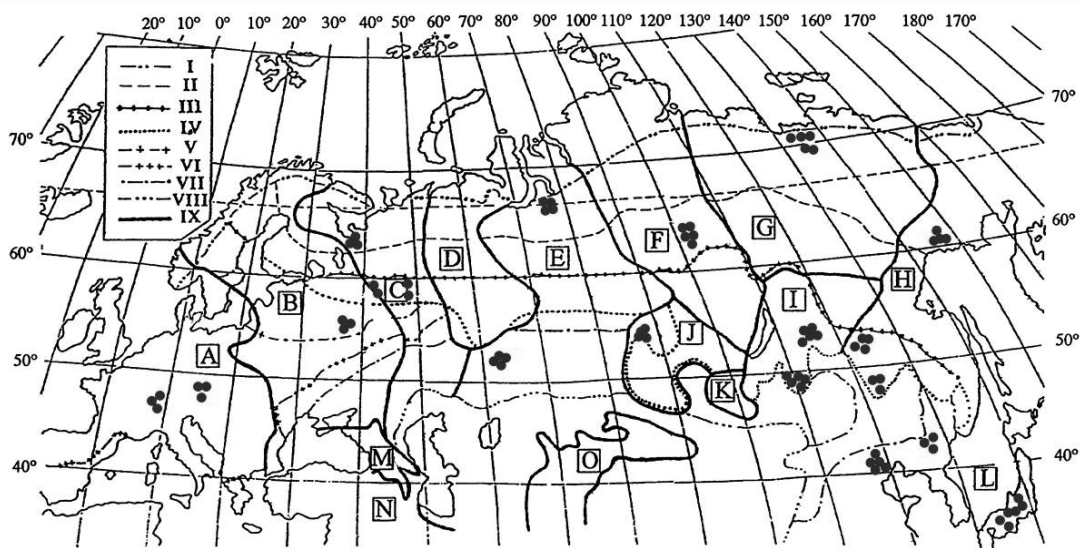


Рис. 1. География фактических данных о фитомассе деревьев лиственниц:
 I – южная граница тундры; II – южная граница подзоны северной тайги;
 III – южная граница подзоны средней тайги; IV – южная граница подзоны южной тайги;
 V – южная граница хвойно-широколиственных лесов;
 VI – юго-восточная граница широколиственных лесов; VII – южная граница лесостепи;
 VIII – южная граница степи [5]; IX – границы лесохозяйственных провинций Сибири.
 Выделены провинции [6-8]: A – Средне-Европейская;
 B – Скандинавско-Русская (включая юг Русской равнины);
 C – Восток Русской равнины (включая Западно-Казахстанскую провинцию на юге);
 D – Уральская; E – Западно-Сибирская (включая Восточно-Казахстанскую провинцию на юге);
 F – Средне-Сибирская; G – Восточно-Сибирская; H – Дальний Восток;
 I – Забайкальская горная; J – Алтае-Саянская горная; K – Центрально-Хангайская;
 L – Японские острова; M – Причерноморская; N – Кавказско-Малоазиатская;
 O – Памиро-Тяньшаньская. Каждая точка на схеме соответствует одной или нескольким территориально сближенным пробным площадям

Таблица 1

Схема кодирования региональных и нулевого (общего) массива фактических данных фитомассы деревьев лиственницы

Регионы	Вид рода <i>Larix</i> Mill.	Блок фиктивных переменных				Число наблюдений
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Все регионы	-	0	0	0	0	420
в том числе:						
Европа	<i>L. decidua</i> Mill., <i>L. sukaczewii</i> N. Dyl.	1	0	0	0	44
Сибирь	<i>L. sibirica</i> L., <i>L. cajanderi</i> Mayr., <i>L. gmelinii</i> (Rupr.) Rupr.	0	1	0	0	260
Дальний Восток, северная тайга	<i>L. cajanderi</i> Mayr.	0	0	1	0	43
Японские острова	<i>L. leptolepis</i> Gord.	0	0	0	1	73

В качестве базовой модели принята аллометрическая зависимость надземной фитомассы (P_a , кг) дерева в четырёх вариантах: (1) от диаметра ствола на высоте груди (D , см), (2) от диаметра ствола и высоты дерева (H , м), (3) от диаметра (ширины) кроны (D_{cr} , м) и (4) от диаметра кроны и высоты дерева. Анализ аллометрических моделей по последним двум вариантам обусловлен развитием техники дистанционного зондирования Земли, позволяющей определять морфометрические пара-

метры деревьев более точно, чем наземным методом [9], в связи с чем происходит смещение ее приоритетов от наземных методов в пользу дистанционных.

Результаты исследований

За основу регрессионного анализа фактических данных фитомассы деревьев, упомянутых в таблице 1, взята аллометрическая модель, структурированная в соответствии с нашей схемой кодирования фиктивных переменных (табл. 1). В результате

получены четыре уравнения, характеристика которых дана в таблице 2. Все константы уравнений значимы на уровне вероятности $P_{0,5}$, и уравнения адекватны фактическим данным. Произведения переменных $(\ln D)(\ln H)$ и $(\ln D_{cr})(\ln H)$ в уравнениях, соответственно (2) и (4) (табл. 2), характеризуют совместное действие диаметра ствола $(\ln D)$ и высоты дерева $(\ln H)$ в первом случае и диаметра кроны $(\ln D_{cr})$ и высоты дерева $(\ln H)$ во втором.

Соотношение расчётных и фактических данных по уравнению (2) без учёта и с учётом синергизма $(\ln D)(\ln H)$ показано на рисунке 2. Очевидна неоднородность её дисперсии остатков [10], вследствие которой расчётные значения фитомассы у мелких деревьев занижаются. Причина такого смещения в том, что при высоте дерева менее 7-10 м диаметр на высоте груди смещается в область кроны, (а у дерева, например, высотой 1,35-1,30 м – это диаметр осевого побега последнего года),

нарушая тем самым аллометрическое соотношение.

Необходимо выяснить, насколько применимы всеобщие аллометрические модели при оценке фитомассы деревьев лиственных в локальных условиях экорегионов. После исключения региональных фиктивных переменных всеобщие модели (1)-(4) получили вид

$$\ln(Pa) = -1,940 + 2,258 (\ln D); \quad (5)$$

$$\ln(Pa) = -1,490 + 1,603(\ln D) - 0,0083 (\ln H) + 0,189 (\ln D)(\ln H); \quad (6)$$

$$\ln(Pa) = 0,748 + 2,855(\ln D_{cr}); \quad (7)$$

$$\ln(Pa) = -3,093 + 1,179(\ln D_{cr}) + 2,401(\ln H) - 0,0908(\ln D_{cr})(\ln H). \quad (8)$$

Путём табулирования (5)-(8) по фактическим данным деревьев каждого экорегиона получены расчётные показатели фитомассы, и сопоставлением последних с фактическими рассчитаны стандартные ошибки при оценке фитомассы в регионах с помощью всеобщих моделей, а также соответствующие смещения (табл. 3).

Таблица 2

Характеристика аллометрических моделей (1)-(4)

Независимая переменная	Номер уравнения	Константы уравнений при их независимых переменных					
		a_0	$a_1 X_1$	$a_2 X_2$	$a_3 X_3$	$a_4 X_4$	$a_5 (\ln D)$
$\ln(Pa)$	(1)	-1,940	0,0607	0,00264	0,0346	-0,0659	2,258
	(2)	-1,490	-0,0209	0,00795	0,0237	-0,0740	1,604
	(3)	0,748	0,865	-0,0970	-0,116	-0,140	-
	(4)	-3,093	-0,138	0,0105	0,111	-0,0961	-

Продолжение табл. 2

Независимая переменная	Номер уравнения	Константы уравнений при их независимых переменных				R^2	SE*
		$a_6 (\ln H)$	$a_7 (\ln D_{cr})$	$a_8 (\ln D)(\ln H)$	$a_9 (\ln D_{cr})(\ln H)$		
$\ln(Pa)$	(1)	-	-	-	-	0,980	0,25
	(2)	-0,0083	-	0,189	-	0,988	0,20
	(3)	-	2,855	-	-	0,819	0,88
	(4)	2,401	1,179	-	-0,0908	0,972	0,35

Примечание. * R^2 – коэффициент детерминации; SE – стандартная ошибка уравнения.

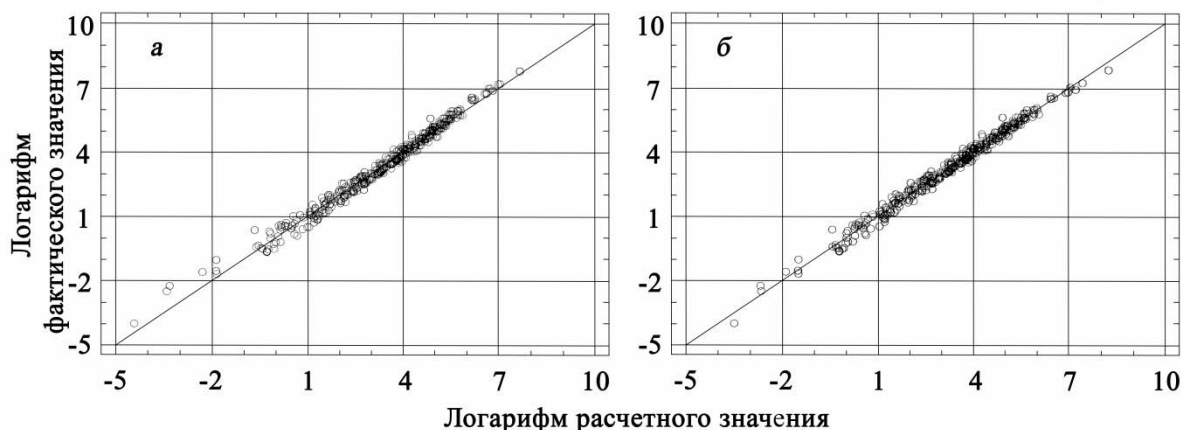


Рис. 2. Графическое визуальное подтверждение неоднородности дисперсии остатков (а) и её отсутствия после введения в уравнение (2) синергизма $(\ln D)(\ln H)$ (б)

Ошибки определения фитомассы деревьев лиственницы в экорегионах по всеобщим моделям (5)-(8)

Экорегион	Номер уравнения	Независимые численные переменные	Ошибка, %	
			стандартная	систематическая
Европа	(1)	<i>D</i>	27,9	-2,0
	(2)	<i>D, H</i>	27,5	5,5
	(3)	<i>Dcr</i>	60,5	-52,1
	(4)	<i>Dcr, H</i>	43,3	20,0
Сибирь	(1)	<i>D</i>	24,2	-2,7
	(2)	<i>D, H</i>	20,2	-1,2
	(3)	<i>Dcr</i>	231,0	94,8
	(4)	<i>Dcr, H</i>	38,1	-4,6
Дальний Восток	(1)	<i>D</i>	63,9	-9,2
	(2)	<i>D, H</i>	42,1	-5,3
	(3)	<i>Dcr</i>	112,8	46,8
	(4)	<i>Dcr, H</i>	39,0	-4,7
Япония	(1)	<i>D</i>	22,4	8,0
	(2)	<i>D, H</i>	15,7	8,5
	(3)	<i>Dcr</i>	161,6	43,7
	(4)	<i>Dcr, H</i>	33,2	13,6

Заключение

Аллометрические модели, полученные на основе фактических данных о фитомассе деревьев лиственницы и включающие в себя фиктивные переменные, дают возможность выполнить региональные оценки их фитомассы по известным морфометрическим показателям (диаметр ствола и кроны, высота дерева). Коэффициент детерминации в зависимости (1) существенно выше, чем в зависимости (3) ($0,980 > 0,819$), он существенно выше также в двухфакторной модели (2) по сравнению с (4) ($0,988 > 0,972$). Все полученные аллометрические модели свидетельствуют об их адекватности фактическим данным и могут применяться при региональных оценках фитомассы деревьев лиственницы.

Применение двухфакторных всеобщих моделей вида (2) и (4) в экорегионах даёт меньшие стандартные ошибки (в среднем, соответственно, 26 и 38%) по сравнению с простыми уравнениями вида (1) и (3) (в среднем, соответственно, 35 и 141%). Однако вследствие наличия больших стандартных ошибок (до 231%) и неприемлемых региональных смещений обоих знаков (от +95 до -52%) применение всеобщих аллометрических моделей четырёх исследованных видов на региональных уровнях неприемлемо.

С другой стороны, аллометрические модели фитомассы вида (4) при более высоких стандартных ошибках определения (в среднем 38%) в сравнении с моделями (2)

(в среднем 26%) компенсируют этот недостаток преимуществом бортового лазерного зондирования – несопоставимой с наземной таксацией скоростью измерения диаметров кроны и высот деревьев, а также скоростью совмещения их с аллометрическими моделями в режиме реального времени.

Библиографический список

1. Усольцев В.А., Колчин К.В., Маленко А.А. О необходимости построения и анализа аллометрических моделей фитомассы лесных деревьев как основы корректной оценки углерододепонирующей функции лесов (аналитический обзор) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (149). – С. 78-87.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
3. Усольцев В.А., Колчин К.В., Воронцов М.П. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea L.*) // Эко-потенциал. – 2017. – № 1. – С. 22-39.
4. Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. – 336 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).

5. Базилевич Н.И., Родин Л.Е. Картосхемы продуктивности и биологического круговорота главнейших типов растительности суши // Изв. ВГО. – 1967. – Т. 99. – № 3. – С. 190-194.

6. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. – М.: Наука, 1973. – 203 с.

7. Смагин В.Н., Семечкин И.В., Поликарпов Н.П., Тетенькин А.Е., Бузыкин А.И. Лесохозяйственное районирование Сибири // Лесные растительные ресурсы Сибири. – Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1978. – С. 5-23.

8. Коротков И.А. Закономерности распределения лесов в Монгольской народной республике (География и типология) // Леса Монгольской народной республики. – М.: Наука, 1978. – Т. 11. – С. 36-46.

9. Njssset E., Okland T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 79 (1). – P. 105-115.

References

1. Usoltsev V.A., Kolchin K.V., Malenko A.A. О необходимости построения и анализа аллометрических моделей фитомассы лесных деревьев как основы корректной оценки углероддепонировывающей функции лесов (аналитический обзор) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (149). – С. 78-87.

2. Dreyper N., Smit G. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.

3. Usoltsev V.A., Kolchin K.V., Voronov M.P. Fiktivnye peremennye i smeshcheniya vseobshchikh allometricheskikh modeley pri lokalnoy otsenke fitomassy derevev (na primere Picea L.) // Eko-potentsial. – 2017. – № 1. – С. 22-39.

4. Usoltsev V.A. Fitomassa modelnykh derevev lesoobrazuyushchikh porod Evrazii: baza dannykh, klimaticheski obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy. – Ekaterinburg: Ural.gos. lesotekhn. un-t, 2016. – 336 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).

5. Bazilevich N.I., Rodin L.E. Kartoskhemy produktivnosti i biologicheskogo krugovorota glavneyshikh tipov rastitelnosti sushi // Izv. VGO. – 1967. – Т. 99. – № 3. – С. 190-194.

6. Kurnaev S.F. Lesorastitelnoe rayonirovanie SSSR. – М.: Nauka, 1973. – 203 с.

7. Smagin V.N., Semechkin I.V., Polikarpov N.P., Tetenkin A.E., Buzykin A.I. Lesokhozyaystvennoe rayonirovanie Sibiri // Lesnye rastitelnye resursy Sibiri. – Krasnoyarsk: ILiD SO AN SSSR, 1978. – С. 5-23.

8. Korotkov I.A. Zakonomernosti raspredeleniya lesov v Mongolskoy narodnoy respublike (Geografiya i tipologiya) // Lesa Mongolskoy narodnoy respubliki. Т. 11. – М.: Nauka, 1978. – С. 36-46.

9. Njssset E., Okland T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 79 (1). – P. 105-115.

