

УДК 574.45

АЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НАЗЕМНОЙ ТАКСАЦИИ УГЛЕРОДНОГО ПУЛА В ЛЕСАХ ЕВРАЗИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В. А. Усольцев^{1,2}, В. П. Часовских², Ю. В. Норицина¹, Д. В. Норрицин²

¹ Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, u2007u@ya.ru, Juzllnorce@inbox.ru, norritsin@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2016 г.

Для основных древесных видов Северной Америки, Европы и Японии опубликованы тысячи аллометрических уравнений для оценки фитомассы в основном по высоте дерева и диаметру ствола на высоте груди, предназначенных для наземной таксации. Однако принципиально новый лазерно-локационный метод съемки лесного полога позволяет в режиме реального времени обрабатывать огромные массивы морфологических показателей деревьев, совмещать их с аллометрическими моделями фитомассы и оценивать углеродные пулы лесов. Впервые для лесов Евразии сформирована база данных о фитомассе деревьев 28 древесных и кустарниковых видов в количестве 2.4 тыс. определений, и на ее основе разработаны трансконтинентальные аллометрические модели фракционной структуры фитомассы двух типов и двойного назначения. Первые включают в качестве регрессоров диаметр кроны и высоту дерева и предназначены для их лазерной таксации с бортовых носителей, а вторые имеют традиционное назначение для наземной таксации фитомассы по высоте и диаметру ствола дерева. Те и другие объясняют в большинстве случаев более 90 % изменчивости фитомассы. Скорость обработки данных лазерной локации, не сопоставимая с наземной таксацией, дает возможность оценивать изменение углеродного пула лесных фитоценозов на той или иной территории в ходе ее периодических облетов. Предложенная информация может быть полезна при осуществлении мероприятий по стабилизации климата, а также при валидации результатов имитационных экспериментов по оценке углерододепонирующей способности лесов.

Ключевые слова: аллометрические уравнения, лазерная таксация, структура фитомассы деревьев, морфологические показатели, углеродный пул насаждений.

DOI: 10.15372/SJFS20160407

ВВЕДЕНИЕ

На климатическом саммите ООН в Париже в декабре 2015 г. 196 стран приняли на себя обязательства сократить выбросы углекислого газа и не допустить повышения среднегодовой температуры более чем на 2 градуса к концу века. Лесным экосистемам, как поглотителям атмосферного углерода, отводится в названной перспективе важная роль. В этой связи активно совершенствуются технологии оценки углерододепонирующей функции лесного покрова и разработано множество ее эмпирических и

имитационных моделей с сопряженным использованием данных наземной инвентаризации лесов и методов дистанционного зондирования (Päivinen et al., 2001; Zheng et al., 2007; Лежнин и др., 2010).

Лазерное зондирование (локация) лесного полога сегодня является составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии и по многим показателям превосходит не только другие дистанционные методы изучения и измерения параметров лесного полога (Данилин, 2003; Lim, Treitz, 2004; Maltamo et al., 2004; Stone et al.,

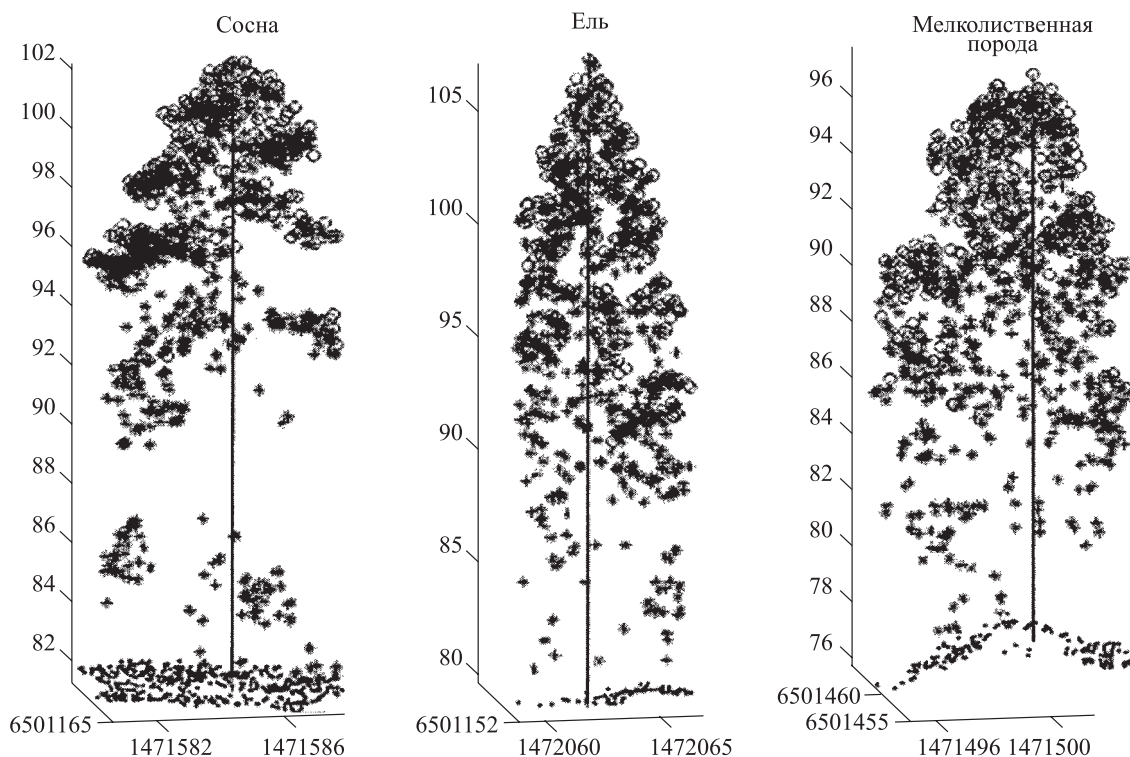


Рис. 1. Множественная регистрация бортовым носителем отраженных лазерных импульсов (laser points) формирует вертикальный профиль деревьев на примере трех древесных пород (Næsset et al., 2004).

2012), но и методы наземной таксации (Naeset, 2002; Naeset et al., 2004). В последние годы появился принципиально новый лазерно-локационный метод съемки лесного полога, позволяющий обрабатывать огромные массивы данных (сотни гигабайт) лазерного зондирования в режиме реального времени практически одновременно с выполнением измерений, причем не только обезличенного лесного покрова, но и отдельных деревьев (Данилин, 2003; Медведев и др., 2007).

Поскольку деревья разных древесных пород обладают специфичной конфигурацией вертикального профиля, эта специфика сегодня распознается с помощью лазерных локаторов (лидаров), размещаемых на бортовых носителях. При множественной регистрации лидаром отраженных лазерных импульсов по характеру группировки точек профиля (point clouds) и его очертанию можно с точностью 95 % различать сосну, ель и мелколиственные породы (рис. 1).

Сосна отличается от мелколиственной березы характерными сгущениями точек, а ель от прочих – формой кроны (Holmgren, Persson, 2004; Naeset et al., 2004).

Еще в 1960–70-е гг. методы аэрофотосъемки позволяли определять такие параметры деревь-

ев, как высота, диаметр кроны и площадь ее проекции с большей точностью, чем при наземных работах (Weaver, 1977; Сеницын, Сухих, 1979). В открытых лесных сообществах пустынной зоны Средней Азии, представленных саксаульниками (род *Haloxylon* Bunge), диаметр кроны обладает диагностической функцией, присущей диаметру ствола на высоте груди в лесной зоне, что дало возможность разработать регрессионные модели для оценки их фитомассы по высоте и диаметру кроны, используемые как при наземной таксации, так и при аэрофотосъемке (Вейсов, Каплин, 1976; Усольцев, 1988). До последнего времени подобный подход к оценке фитомассы деревьев лесной зоны не применялся вследствие высокой горизонтальной и вертикальной сомкнутости полога. Современный лазерно-локационный метод позволяет регистрировать не только видимые, но и «спрятанные» под верхним пологом деревья (рис. 2).

Изложенные преимущества дистанционной локации многократно усиливаются благодаря той скорости обработки данных, которую обеспечивает упомянутый лазерно-локационный метод.

Цель настоящего исследования – разработать регрессионные (аллометрические) модели

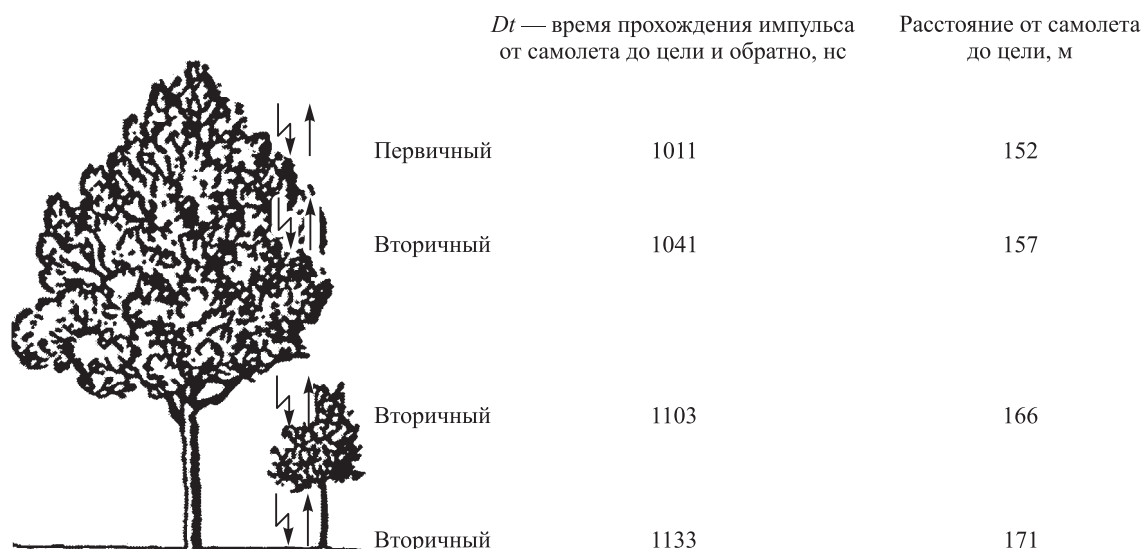


Рис. 2. Схема множественного отражения лазерного импульса от лесного полога высотой 18 м (Nelson et al., 1988).

для оценки фракционной структуры фитомассы деревьев основных древесных и кустарниковых видов Евразии и депонирования ими атмосферного углерода двух типов и двойного назначения: для лазерной локации и традиционной наземной таксации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для осуществления поставленной цели нами по литературным источникам сформирована база данных о структуре фитомассы, сопряженной с основными морфометрическими показателями модельных деревьев, взятых на пробных площадях при оценке биологической продуктивности лесов, на территории от Великобритании до Китая и Японии. Около 87 % данных взято из русскоязычной литературы бывшего СССР (табл. 1).

Основные таксационные показатели, определяющие фитомассу дерева и включенные в сформированную базу данных, — это возраст, диаметр ствола и высота дерева, длина и диаметр кроны, а также густота древостоя, в котором определена фитомасса деревьев. Кроме того, показаны объемы стволов и приведены координаты пробных площадей, необходимые при географическом анализе подеревных данных фитомассы.

Сегодня для основных древесных видов Северной Америки, Европы и Японии имеется соответственно около 2600, 800 и 1000 аллометрических уравнений для оценки фитомассы в основном по высоте дерева и диаметру ствола на высоте груди (Jenkins et al., 2004; Muukkonen,

Mäkiräjä, 2006; Hosoda, Iehara, 2010). Все они предназначены лишь для наземной таксации.

Сформированная нами база данных дала возможность разработать для древесных и кустарниковых видов трансконтинентальные аллометрические модели фракционной структуры фитомассы, включающие в качестве регрессоров диаметр кроны и высоту дерева:

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

и сопоставить их объяснительную способность с традиционной аллометрической моделью:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln DBH, \quad (2)$$

где P_i — фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои (листья), надземной части и корней (соответственно Pst , Pbr , Pf , Pa и Pr), кг; H — высота дерева, м; D_{cr} — диаметр кроны, м; DBH — диаметр ствола на высоте груди, см.

К сожалению, при обработке модельных деревьев на пробной площади исследователи обычно учитывали их возраст, высоту и диаметр ствола на высоте груди, поскольку при наземной таксации их совокупность объясняла 90–99 % изменчивости той или иной фракции фитомассы. Иногда измерялась также длина кроны, но редко — ее диаметр. Считалось, что последний морфометрический показатель не вносит существенного вклада в объяснение изменчивости фитомассы дерева, обеспечиваемое выше-названными показателями. К тому же вследствие неправильной формы проекции кроны точность измерения ее диаметра была сомнительной, во

Таблица 1. Распределение количества модельных деревьев с определениями фитомассы (кг) по видам (родам, подродам) и странам

| Род (подрод, вид) | Систематическое название | Страна | Количество модельных деревьев* |
|-----------------------|---|--|--------------------------------|
| Сосна | Подрод <i>Pinus</i> L. | Россия, Казахстан, Великобритания, Чехия, Болгария, Китай, Япония, Швейцария, Белоруссия, Словакия, Латвия, Ирак | 2684/2568/1006 |
| Ель | Род <i>Picea</i> A. Dietr. | Россия, Германия, Чехия, Болгария, Швейцария, Латвия, Бельгия, Швеция, Италия | 1072/651/478 |
| Пихта | Род <i>Abies</i> Mill. | Россия, Чехия, Япония | 173/143/96 |
| Лиственница | Род <i>Larix</i> Mill. | Россия, Япония, Китай, Чехия, Швейцария, Казахстан, Монголия | 522/354/139 |
| Кедр | Подрод <i>Haploxydon</i> (Koehne) Pilg. | Россия | 170/170/93 |
| Криптомерия | Род <i>Cryptomeria</i> D. Don | Япония | 29/–/29 |
| Кипарисовик | Род <i>Chamaecyparis</i> Spach | >> | 10/–/10 |
| Псевдотсуга | Род <i>Pseudotsuga</i> Carr. | Бельгия, Болгария | 13/–/6 |
| Береза | Род <i>Betula</i> L. | Россия, Казахстан, Япония, Монголия, Китай, Великобритания, Франция, Бельгия, Финляндия, Азербайджан | 1277/1215/170 |
| Осина и тополи | Род <i>Populus</i> L. | Россия, Казахстан, Монголия | 513/512/39 |
| Липа | Род <i>Tilia</i> L. | Россия, Чехия, Болгария | 402/399/138 |
| Ольха | Род <i>Alnus</i> Mill. | Россия | 24/24/16 |
| Дуб | Род <i>Quercus</i> L. | Россия, Болгария, Япония, Чехия, Швейцария, Венгрия | 130/43/18 |
| Бук | Род <i>Fagus</i> L. | Франция, Германия, Чехия, Италия, Швеция, Дания | 56/–/33 |
| Ясень | Род <i>Fraxinus</i> L. | Россия, Чехия, Китай | 31/24/13 |
| Граб | Род <i>Carpinus</i> Decne | Болгария | 15/–/– |
| Робиния псевдоакация | Вид <i>Robinia pseudoacacia</i> L. | Словакия, Болгария | 24/–/18 |
| Ива | Род <i>Salix</i> L. | Россия, Швеция | 23/22/10 |
| Клен | Род <i>Acer</i> L. | Россия, Болгария | 27/26/14 |
| Ильм, вяз | Род <i>Ulmus</i> L. | Россия | 9/9/7 |
| Чозения | Род <i>Chosenia</i> Nakai | >> | 17/17/8 |
| Лещина | Род <i>Corylus</i> L. | Россия, Украина | 9/9/– |
| Рябина | Род <i>Sorbus</i> L. | Россия | 20/20/– |
| Боярышник | Род <i>Crataegus</i> L. | >> | 8/8/6 |
| Черемуха обыкновенная | Вид <i>Prunus padus</i> L. | >> | 8/8/6 |
| Орех маньчжурский | Вид <i>Juglans mandshurica</i> Maxim. | >> | 7/7/7 |
| Маакия амурская | Вид <i>Maackia amurensis</i> Rupr. | >> | 7/7/7 |
| Бархат амурский | Вид <i>Phellodendron amurense</i> Rupr. | >> | 7/7/7 |
| | | Итого | 7287/6243/2374 |

Примечание. * Первая цифра – общее количество, вторая – количество определений, взятых из русскоязычной литературы бывшего СССР, и третья – количество определений с измеренным диаметром кроны.

всяком случае, гораздо более низкой, чем точность измерения диаметра ствола. Поэтому при расчете моделей (1) мы использовали лишь часть сформированной базы данных – только деревья с измеренным диаметром кроны. Их доля в общем объеме данных составила 33 % (см. табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета констант уравнений (1) и (2) сведены в табл. 2. Густота древостоя при оценке фитомассы дерева в большинстве случаев была статистически не значима, поскольку она коррелирует с диаметром кроны. Для обеспечения сопоставимости объяснительной способности моделей (1) и (2) расчет последней

выполнен по тому же объему исходных данных, что и модель (1) (см. табл. 2).

Все полученные уравнения адекватны исходным данным и объясняют за некоторыми исключениями более 90 % изменчивости фракций фитомассы. Результаты сравнительного анализа показали, что объяснительная способность уравнений (1) по отношению к (2) для листвы, ветвей и корней ниже соответственно на 3, 4 и 7 %, однако это различие статистически не значимо. Ошибка уравнений *SE* для упомянутых фракций выше, но и это различие статистически не значимо. Для надземной и общей массы ствола объяснительная способность уравнений (1) по отношению к (2) также ниже в среднем на 4 %, но это различие статистически значимо.

Таблица 2. Характеристика уравнений (1) и (2)

| Род (подрод, вид) | Фракция фитомассы | Константы уравнения (1) | | | Константы уравнения (2) | | | R^2 для уравнений* | | SE для уравнений* | |
|-------------------|-------------------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|---------|--------|----------------------|-------|---------------------|------|
| | | a_0 | a_1 | a_2 | a_0 | a_1 | a_2 | (1) | (2) | (1) | (2) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Сосна | <i>Pst</i> | -3.2484 | 2.3927 | 0.7586 | -3.5919 | 1.1437 | 1.6275 | 0.976 | 0.988 | 0.47 | 0.32 |
| | <i>Pbr</i> | -3.5496 | 1.3197 | 1.7788 | -4.9291 | -0.4181 | 2.8385 | 0.940 | 0.938 | 0.75 | 0.76 |
| | <i>Pf</i> | -2.6645 | 0.8007 | 1.7480 | -4.1273 | -0.7283 | 2.6522 | 0.906 | 0.897 | 0.81 | 0.84 |
| | <i>Pa</i> | -2.3633 | 2.0420 | 1.0193 | -3.0475 | 0.7693 | 1.8662 | 0.968 | 0.981 | 0.52 | 0.41 |
| | <i>Pr</i> | -3.9142 | 1.9909 | 0.9533 | -4.9370 | 0.8402 | 1.9803 | 0.951 | 0.944 | 0.64 | 0.69 |
| Ель | <i>Pst</i> | -2.9575 | 2.4913 | 0.2392 | -3.0336 | 2.0299 | 0.5797 | 0.971 | 0.974 | 0.44 | 0.41 |
| | <i>Pbr</i> | -2.9723 | 1.4858 | 1.2800 | -3.3940 | 1.8760 | 0.3123 | 0.924 | 0.896 | 0.62 | 0.73 |
| | <i>Pf</i> | -2.4413 | 1.3898 | 0.7690 | -2.6957 | 0.9877 | 0.8100 | 0.869 | 0.868 | 0.69 | 0.70 |
| | <i>Pa</i> | -1.8450 | 2.1185 | 0.4739 | -2.0031 | 1.7948 | 0.5743 | 0.960 | 0.961 | 0.47 | 0.47 |
| | <i>Pr</i> | -2.8998 | 1.7198 | 0.9085 | -3.4488 | 1.4058 | 0.9185 | 0.952 | 0.954 | 0.61 | 0.60 |
| Пихта | <i>Pst</i> | -2.9575 | 2.4913 | 0.2392 | -3.0336 | 2.0299 | 0.5797 | 0.971 | 0.974 | 0.44 | 0.41 |
| | <i>Pbr</i> | -2.9723 | 1.4858 | 1.2800 | -3.3940 | 1.8760 | 0.3123 | 0.924 | 0.896 | 0.62 | 0.73 |
| | <i>Pf</i> | -2.4413 | 1.3898 | 0.7690 | -2.6957 | 0.9877 | 0.8100 | 0.869 | 0.868 | 0.69 | 0.70 |
| | <i>Pa</i> | -1.8450 | 2.1185 | 0.4739 | -2.0031 | 1.7948 | 0.5743 | 0.960 | 0.961 | 0.47 | 0.47 |
| | <i>Pr</i> | -2.8998 | 1.7198 | 0.9085 | -3.4488 | 1.4058 | 0.9185 | 0.952 | 0.954 | 0.61 | 0.60 |
| Лиственница | <i>Pst</i> | -3.6559 | 2.5903 | 0.8256 | -3.3289 | 1.3845 | 1.3905 | 0.969 | 0.987 | 0.38 | 0.24 |
| | <i>Pbr</i> | -3.0706 | 1.1133 | 1.9212 | -3.2205 | -0.1917 | 2.1326 | 0.932 | 0.911 | 0.51 | 0.59 |
| | <i>Pf</i> | -3.3507 | 0.7475 | 1.7233 | -3.4786 | -0.4339 | 1.9208 | 0.876 | 0.853 | 0.58 | 0.64 |
| | <i>Pa</i> | -2.8487 | 2.2658 | 1.0182 | -2.6044 | 1.0407 | 1.5224 | 0.969 | 0.986 | 0.36 | 0.24 |
| | <i>Pr</i> | -0.5821 | 0.5916 | 1.8637 | -1.6042 | -0.8031 | 2.5524 | 0.700 | 0.721 | 0.69 | 0.67 |
| Кедр** | <i>Pst</i> | -2.5579 | 1.9903 | 1.1096 | -3.2653 | 0.9483 | 1.6857 | 0.958 | 0.977 | 0.40 | 0.30 |
| | <i>Pbr</i> | -2.5847 | 1.1642 | 1.7494 | -3.6546 | -0.1458 | 2.3366 | 0.880 | 0.906 | 0.62 | 0.55 |
| | <i>Pf</i> | -1.9251 | 0.5159 | 1.9816 | -3.1356 | -0.9572 | 2.6364 | 0.848 | 0.894 | 0.58 | 0.49 |
| | <i>Pa</i> | -1.4480 | 1.6119 | 1.3220 | -2.2795 | 0.4535 | 1.9284 | 0.945 | 0.971 | 0.43 | 0.31 |
| Криптомерия | <i>Pst</i> | -2.8535 | 2.2423 | 1.1368 | -3.6249 | 1.3787 | 1.4366 | 0.984 | 0.984 | 0.14 | 0.14 |
| | <i>Pbr</i> | -3.3491 | 0.9538 | 2.5647 | -5.0212 | -0.7818 | 3.0229 | 0.945 | 0.909 | 0.24 | 0.31 |
| | <i>Pf</i> | -0.7733 | 0.5665 | 1.8165 | -2.0782 | -1.0398 | 2.5276 | 0.885 | 0.947 | 0.24 | 0.16 |
| | <i>Pa</i> | -1.6639 | 1.7995 | 1.3790 | -2.5883 | 0.7874 | 1.7063 | 0.983 | 0.980 | 0.13 | 0.14 |
| | <i>Pr</i> | -2.6137 | 1.6386 | 1.5098 | -3.6513 | 0.4502 | 1.9504 | 0.973 | 0.978 | 0.16 | 0.15 |

Продолжение табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------------------|------------|----------|---------|---------|----------|---------|--------|-------|-------|------|------|
| Кипари- совик | <i>Pst</i> | -1.7860 | 2.0776 | 0.4186 | -3.5791 | 0.6996 | 2.1071 | 0.928 | 0.994 | 0.31 | 0.09 |
| | <i>Pbr</i> | -0.8541 | 0.5023 | 1.4036 | -4.2802 | -1.3786 | 3.5915 | 0.762 | 0.972 | 0.42 | 0.15 |
| | <i>Pf</i> | -0.0928 | 0.7522 | 0.1031 | -1.6284 | -0.7460 | 1.9883 | 0.553 | 0.878 | 0.34 | 0.19 |
| | <i>Pa</i> | -0.4506 | 1.5907 | 0.5523 | -2.5020 | 0.1055 | 2.3579 | 0.886 | 0.993 | 0.33 | 0.08 |
| | <i>Pr</i> | -1.3824 | 1.5122 | 0.5027 | -3.5027 | -0.1076 | 2.4860 | 0.854 | 0.990 | 0.36 | 0.10 |
| Дугласия** | <i>Pst</i> | -13.188 | 5.6405 | -0.0777 | -7.1015 | 3.0918 | 0.7693 | 0.958 | 0.988 | 0.13 | 0.07 |
| | <i>Pbr</i> | -25.9695 | 8.0538 | 0.4335 | -19.6165 | 5.0765 | 1.4082 | 0.862 | 0.889 | 0.43 | 0.39 |
| | <i>Pf</i> | -14.2118 | 4.6197 | 0.2943 | -8.1481 | 1.8516 | 1.2036 | 0.728 | 0.780 | 0.38 | 0.35 |
| | <i>Pa</i> | -13.4656 | 5.7169 | -0.0431 | -7.3811 | 3.1478 | 0.8097 | 0.955 | 0.988 | 0.14 | 0.07 |
| Береза | <i>Pst</i> | -4.8045 | 2.9127 | 0.6253 | -3.4725 | 1.1568 | 1.6545 | 0.955 | 0.986 | 0.41 | 0.23 |
| | <i>Pbr</i> | -5.7668 | 2.2617 | 1.2545 | -4.1172 | -0.2623 | 2.6566 | 0.876 | 0.938 | 0.73 | 0.51 |
| | <i>Pf</i> | -4.9498 | 1.5025 | 1.1359 | -3.7883 | -0.3629 | 2.0858 | 0.851 | 0.902 | 0.61 | 0.49 |
| | <i>Pa</i> | -4.4832 | 2.7961 | 0.7577 | -3.0891 | 0.8755 | 1.8703 | 0.943 | 0.980 | 0.47 | 0.27 |
| | <i>Pr</i> | -3.7279 | 2.3956 | 0.2353 | -3.3319 | 0.3981 | 2.0299 | 0.821 | 0.984 | 0.67 | 0.15 |
| Осина и тополи** | <i>Pst</i> | -4.0075 | 2.0536 | 1.6066 | -3.7752 | 1.0645 | 1.7992 | 0.938 | 0.991 | 0.30 | 0.12 |
| | <i>Pbr</i> | -3.7558 | 0.4156 | 3.1638 | -2.9323 | -1.6573 | 3.5480 | 0.846 | 0.943 | 0.60 | 0.37 |
| | <i>Pf</i> | -3.9394 | 0.2241 | 2.6885 | -3.2324 | -1.6842 | 3.1602 | 0.791 | 0.967 | 0.60 | 0.24 |
| | <i>Pa</i> | -3.5324 | 1.8460 | 1.7906 | -3.1864 | 0.7054 | 2.0151 | 0.926 | 0.988 | 0.34 | 0.14 |
| Липа** | <i>Pst</i> | -4.8754 | 3.1643 | 0.3170 | -4.2273 | 1.2493 | 1.7973 | 0.890 | 0.989 | 0.44 | 0.14 |
| | <i>Pbr</i> | -3.7502 | 1.9167 | 0.6814 | -3.0828 | -0.8215 | 2.7557 | 0.660 | 0.885 | 0.72 | 0.42 |
| | <i>Pf</i> | -4.3079 | 1.4374 | 0.6879 | -4.1730 | -0.3150 | 1.9702 | 0.600 | 0.683 | 0.69 | 0.62 |
| | <i>Pa</i> | -4.0476 | 2.9120 | 0.3724 | -3.4196 | 0.9134 | 1.9099 | 0.867 | 0.983 | 0.46 | 0.16 |
| Ольха** | <i>Pst</i> | -5.2688 | 2.5164 | 1.3219 | -3.6405 | 0.7795 | 1.9666 | 0.963 | 0.996 | 0.24 | 0.07 |
| | <i>Pbr</i> | -7.4280 | 1.4468 | 3.2791 | -4.4308 | -1.4914 | 3.8172 | 0.921 | 0.928 | 0.42 | 0.40 |
| | <i>Pf</i> | -7.4051 | 1.3924 | 2.4827 | -5.1805 | -0.7736 | 2.8447 | 0.909 | 0.909 | 0.37 | 0.37 |
| | <i>Pa</i> | -5.0977 | 2.3968 | 1.5236 | -3.3182 | 0.5227 | 2.1676 | 0.960 | 0.994 | 0.25 | 0.09 |
| Дуб** | <i>Pst</i> | -4.8897 | 2.9380 | 0.9356 | -3.5782 | 1.2025 | 1.7416 | 0.983 | 0.996 | 0.27 | 0.14 |
| | <i>Pbr</i> | -5.3653 | 1.6865 | 2.4446 | -2.3860 | -2.2777 | 4.1539 | 0.931 | 0.958 | 0.62 | 0.49 |
| | <i>Pf</i> | -4.3817 | 0.9144 | 1.8570 | -2.1543 | -2.0512 | 3.1237 | 0.903 | 0.930 | 0.51 | 0.43 |
| | <i>Pa</i> | -3.6444 | 2.2244 | 1.5306 | -1.9734 | -0.0097 | 2.4285 | 0.920 | 0.920 | 0.60 | 0.60 |
| Бук | <i>Pst</i> | -7.0424 | 3.6349 | 0.9830 | -3.4630 | 0.9143 | 2.0178 | 0.981 | 0.998 | 0.28 | 0.09 |
| | <i>Pbr</i> | -8.3692 | 2.9395 | 1.9533 | -4.1988 | -0.4831 | 3.0181 | 0.948 | 0.955 | 0.53 | 0.50 |
| | <i>Pf</i> | -6.0540 | 1.7314 | 1.4092 | -0.3418 | -2.5603 | 3.0884 | 0.890 | 0.963 | 0.52 | 0.30 |
| | <i>Pa</i> | -6.6188 | 3.4798 | 1.1162 | -2.8717 | 0.6046 | 2.1842 | 0.980 | 0.998 | 0.28 | 0.08 |
| | <i>Pr</i> | -9.4846 | 4.0811 | 0.5825 | -2.3883 | -0.8150 | 2.8319 | 0.873 | 0.987 | 0.45 | 0.15 |
| Ясень | <i>Pst</i> | -5.5052 | 3.2511 | 0.6154 | -3.4031 | 0.9774 | 1.8969 | 0.951 | 0.993 | 0.37 | 0.14 |
| | <i>Pbr</i> | -8.8510 | 3.3211 | 1.4418 | -5.7736 | 0.2357 | 2.8483 | 0.911 | 0.952 | 0.61 | 0.45 |
| | <i>Pf</i> | -5.9419 | 2.2613 | 0.3642 | -3.7172 | -0.2742 | 1.9697 | 0.737 | 0.826 | 0.67 | 0.55 |
| | <i>Pa</i> | -5.1055 | 3.1186 | 0.7713 | -2.9158 | 0.8088 | 1.9931 | 0.948 | 0.990 | 0.38 | 0.17 |
| | <i>Pr</i> | -6.4246 | 2.4717 | 1.6552 | -3.7186 | 0.7230 | 1.7707 | 0.974 | 0.951 | 0.18 | 0.25 |
| Робиния псевдо- акация | <i>Pst</i> | -6.0674 | 3.5274 | 0.2219 | -4.0203 | 1.3945 | 1.6113 | 0.986 | 0.997 | 0.26 | 0.13 |
| | <i>Pbr</i> | -8.7106 | 3.4521 | 1.0172 | -5.3541 | 0.0784 | 2.8013 | 0.952 | 0.959 | 0.55 | 0.51 |
| | <i>Pf</i> | -6.2924 | 2.1115 | 0.7108 | -3.0734 | -1.1741 | 2.6220 | 0.909 | 0.944 | 0.48 | 0.38 |
| | <i>Pa</i> | -5.8507 | 3.4556 | 0.3645 | -3.5336 | 1.0627 | 1.8515 | 0.984 | 0.996 | 0.28 | 0.14 |
| Ива** | <i>Pst</i> | -6.1719 | 3.0281 | 0.3662 | -4.1722 | 0.9728 | 1.6105 | 0.973 | 0.983 | 0.33 | 0.26 |
| | <i>Pst</i> | -3.5616 | 1.6770 | 1.9024 | -4.1950 | 1.3580 | 1.6113 | 0.990 | 0.995 | 0.21 | 0.13 |
| | <i>Pbr</i> | 0.1060 | -1.8624 | 4.6239 | -3.4979 | -1.0773 | 3.1376 | 0.982 | 0.846 | 0.30 | 0.85 |
| | <i>Pf</i> | -0.3589 | -1.4312 | 3.2192 | -2.7032 | -1.0801 | 2.2967 | 0.964 | 0.774 | 0.29 | 0.72 |
| | <i>Pa</i> | -1.6450 | 0.6277 | 2.6254 | -3.0553 | 0.6430 | 1.9808 | 0.993 | 0.993 | 0.17 | 0.15 |

Окончание табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------------|------------|----------|---------|--------|---------|---------|--------|-------|-------|------|------|
| Клен** | <i>Pst</i> | -6.9681 | 3.8389 | 0.5222 | -3.1350 | 0.7518 | 2.0143 | 0.940 | 0.980 | 0.30 | 0.18 |
| | <i>Pbr</i> | -7.7613 | 2.5504 | 2.0788 | -2.5050 | -1.4429 | 3.4399 | 0.938 | 0.926 | 0.36 | 0.39 |
| | <i>Pf</i> | -7.4901 | 2.1207 | 1.4187 | -3.8551 | -0.6443 | 2.3695 | 0.941 | 0.933 | 0.26 | 0.28 |
| | <i>Pa</i> | -6.6197 | 3.6755 | 0.7345 | -2.4794 | 0.3710 | 2.2604 | 0.950 | 0.991 | 0.28 | 0.12 |
| Ильм** | <i>Pst</i> | -5.2602 | 2.7644 | 1.2447 | -3.5246 | 1.0983 | 1.7758 | 0.952 | 0.987 | 0.33 | 0.17 |
| | <i>Pbr</i> | -7.0314 | 2.1650 | 2.4414 | -4.1727 | 0.4877 | 2.1442 | 0.974 | 0.947 | 0.24 | 0.34 |
| | <i>Pf</i> | -6.7861 | 1.8773 | 1.4925 | -5.5365 | 2.3035 | 0.0889 | 0.966 | 0.887 | 0.21 | 0.39 |
| | <i>Pa</i> | -4.8141 | 2.6275 | 1.4102 | -2.9604 | 1.0683 | 1.7356 | 0.963 | 0.987 | 0.28 | 0.17 |
| Чозения** | <i>Pst</i> | -7.4048 | 3.8444 | 0.4270 | -4.4928 | 1.4131 | 1.6960 | 0.940 | 0.996 | 0.38 | 0.09 |
| | <i>Pbr</i> | -4.5895 | 1.8236 | 0.8807 | -0.5952 | -3.2605 | 4.3129 | 0.907 | 0.891 | 0.95 | 0.54 |
| | <i>Pf</i> | -4.7792 | 1.6765 | 0.4596 | -2.5934 | -1.7183 | 2.9793 | 0.933 | 0.944 | 0.67 | 0.30 |
| | <i>Pa</i> | -7.1133 | 3.6925 | 0.6273 | -3.3965 | 0.7574 | 2.0369 | 0.920 | 0.998 | 0.43 | 0.07 |
| Боярышник** | <i>Pst</i> | -1.2292 | -0.4783 | 2.8221 | -2.0545 | 0.4938 | 1.1043 | 0.890 | 0.987 | 0.18 | 0.13 |
| | <i>Pbr</i> | -8.7548 | 3.7923 | 4.2467 | -1.4592 | -1.6520 | 3.0043 | 0.878 | 0.909 | 0.53 | 0.51 |
| | <i>Pf</i> | -4.8641 | 0.0136 | 4.8245 | -2.0072 | -1.7531 | 2.5305 | 0.850 | 0.980 | 0.41 | 0.17 |
| | <i>Pa</i> | -2.7379 | 0.6191 | 3.7607 | -0.8835 | -0.4459 | 1.8918 | 0.908 | 0.994 | 0.27 | 0.10 |
| Черемуха** | <i>Pst</i> | -3.4531 | 1.1458 | 2.8662 | -5.0460 | 3.2890 | 0.5714 | 0.997 | 0.989 | 0.10 | 0.19 |
| | <i>Pbr</i> | -3.1006 | -0.1337 | 4.0271 | -0.1911 | -2.4202 | 2.6795 | 0.931 | 0.995 | 0.56 | 0.14 |
| | <i>Pf</i> | -4.4110 | 1.2171 | 1.7441 | -4.0550 | 1.0991 | 0.8809 | 0.974 | 0.997 | 0.22 | 0.07 |
| | <i>Pa</i> | -2.7375 | 1.0709 | 2.8082 | -2.6197 | 1.4371 | 1.1765 | 0.987 | 0.996 | 0.21 | 0.12 |
| Орех маньчжурский** | <i>Pst</i> | -10.6826 | 3.0941 | 3.2584 | -3.8442 | 0.9762 | 2.0147 | 0.947 | 0.996 | 0.38 | 0.11 |
| | <i>Pbr</i> | -10.5211 | 1.7032 | 4.2788 | -3.5582 | 0.5692 | 1.7373 | 0.969 | 0.949 | 0.24 | 0.31 |
| | <i>Pf</i> | -7.9702 | 0.9044 | 3.4339 | -2.4775 | 0.0720 | 1.3514 | 0.981 | 0.945 | 0.13 | 0.22 |
| | <i>Pa</i> | -9.8508 | 2.7308 | 3.4642 | -2.9247 | 0.7603 | 1.9869 | 0.954 | 0.997 | 0.34 | 0.08 |
| Маакия амурская** | <i>Pst</i> | -4.3112 | 0.6069 | 3.8326 | -1.3446 | 0.0631 | 1.9938 | 0.920 | 0.972 | 0.41 | 0.24 |
| | <i>Pbr</i> | -3.9659 | -0.4487 | 4.5136 | -0.9784 | -0.6933 | 2.1472 | 0.904 | 0.917 | 0.43 | 0.40 |
| | <i>Pf</i> | -2.9007 | -0.7695 | 3.3428 | -0.4107 | -1.1676 | 1.7003 | 0.903 | 0.978 | 0.29 | 0.14 |
| | <i>Pa</i> | -3.4548 | 0.3118 | 3.9561 | -0.5073 | -0.1598 | 2.0125 | 0.917 | 0.963 | 0.40 | 0.27 |
| Бархат амурский** | <i>Pst</i> | -6.4711 | 2.6980 | 1.7243 | -2.8523 | 0.7836 | 1.7956 | 0.947 | 0.992 | 0.39 | 0.15 |
| | <i>Pbr</i> | -8.6881 | 1.1436 | 4.2409 | -1.2428 | -1.8452 | 3.2566 | 0.935 | 0.993 | 0.42 | 0.14 |
| | <i>Pf</i> | -1.5768 | 0.2913 | 0.9945 | -0.0339 | -0.1695 | 0.6018 | 0.943 | 0.901 | 0.09 | 0.12 |
| | <i>Pa</i> | -5.8167 | 2.3121 | 2.0624 | -1.7361 | 0.3150 | 1.9503 | 0.946 | 0.995 | 0.37 | 0.11 |

Примечание. * R^2 – коэффициент детерминации, SE – стандартная ошибка уравнения. ** Данные о массе корней отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для лесов Евразии сформирована база данных о фитомассе деревьев в количестве более 7.3 тыс. определений. Третья часть ее, имеющая данные измерений диаметра кроны деревьев, использована для сравнительного анализа объяснительной способности аллометрических моделей, предназначенных для поперечного определения структуры фитомассы лазерно-локационным методом с использованием двух наиболее информативных морфометрических показателей деревьев – высоты и диаметра кроны, и традиционных аллометрических моделей,

предназначенных для наземной таксации фитомассы с использованием таких морфометрических показателей, как высота дерева и диаметр ствола на высоте груди. Впервые разработана система аллометрических моделей для дистанционной оценки структуры фитомассы деревьев и кустарников в лесах Евразии лазерно-локационным методом. Установлено, что оценка фитомассы листвы, ветвей и корней деревьев по двум упомянутым моделям выполняется примерно с одинаковой точностью, но надземная и общая масса ствола по второй модели оценивается на 4 % точнее, чем по первой. Однако эта более низкая объяснительная способность первой модели

компенсируется возможностью получения массовых измерений в результате вышеупомянутого преимущества дистанционной локации – не сопоставимой с наземной таксацией скоростью обработки данных в режиме реального времени, которую обеспечивает упомянутый лазерно-локационный метод. Это дает возможность оценивать изменение углеродного пула лесных фитоценозов на той или иной территории в ходе ее периодических облетов.

Предложенная информация может быть полезна при осуществлении мероприятий по стабилизации климата, а также при валидации результатов имитационных экспериментов по оценке углерододепонирующей способности лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вейсов С., Каплин В. Г. К методике определения наземной фитомассы белого саксаула в Восточных Каракумах // Проблемы освоения пустынь. 1976. № 1. С. 60–64.
- Данилин И. М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск: СибГТУ, 2003. 35 с.
- Лежнин С. А., Незамаев С. А., Новокионова Е. В., Комарова И. В. Оценка фитомассы молодняков березы Заволжской песчаной низменности по спутниковым снимкам // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: мат-лы Междунар. конф. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 168–173.
- Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса. Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геолидар, Геокосмос; Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. 229 с.
- Синицын С. Г., Сухих В. И. Использование материалов многозональных и космических съемок в интересах лесного хозяйства // Аэрокосмические исследования Земли. М.: Наука, 1979. С. 86–101.
- Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 253 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>
- Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanning // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 90. P. 415–423.
- Hosoda K., Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // J. For. Res. 2010. V. 15. N. 5. P. 299–306. DOI 10.1007/s10310-010-0192-y
- Jenkins J. C., Chojnacky D. C., Heath L. S., Birdsey R. A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species // USDA For. Serv. Northeastern Res. Stat. Gen. Tech. Rep. NE-319. 2004. 45 p.
- Lim K. S., Treitz P. M. Estimation of aboveground biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators // Scand. J. For. Res. 2004. V. 19. N. 6. P. 558–570.
- Maltamo M., Eerikäinen K., Pitkänen J., Hyypä J., Vehmas M. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 90. N. 3. P. 319–330.
- Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // Silva Fenn. 2006. V. 40. N. 4. P. 763–773.
- Naesset E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 80. N. 1. P. 88–99.
- Naesset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyypä H., Hyypä J., Maltamo M., Nilsson M., Olsson H., Persson Å., Söderman U. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // Scand. J. For. Res. 2004. V. 19. P. 482–489.
- Nelson R. F., Swift R. N., Krabill W. B. Using airborne lasers to estimate forest canopy and stand characteristics // J. Forestry. 1988. V. 86. N. 10. P. 31–38.
- Päivinen R., Lehikoinen M., Schuck A., Häme T., Väättäinen S., Kennedy P., Folving S. Combining earth observation data and forest statistics. Europ. For. Inst., JRC, Italy, 2001. 101 p.
- Stone C., Penman T., Turner R. Determining an optimal model for processing lidar data at the plot level: results for a *Pinus radiata* plantation in New South Wales, Australia // New Zeal. J. For. Sci. 2012. V. 42. P. 191–205. <http://www.scionresearch.com/general/publications/nzjfs>
- Weaver T. Area-mass relationships for common Montana shrubs // Proc. Montana Acad. Sci. 1977. V. 37. P. 54–58.
- Zheng D., Heath L. S., Ducey M. J. Forest biomass estimated from MODIS and FIA data in the Lake States: MN, WI, and MI, USA // Forestry. 2007. V. 80. P. 265–278.

ALLOMETRIC MODELS OF TREE BIOMASS FOR AIRBORNE LASER SCANNING AND GROUND INVENTORY OF CARBON POOL IN THE FORESTS OF EURASIA: COMPARATIVE ANALYSIS

V. A. Usoltsev^{1,2}, V. P. Chasovskikh², Yu. V. Noritsina¹, D. V. Noritsin²

¹ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirskii trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

E-mail: Usoltsev50@mail.ru, u2007u@ya.ru, Juzllnorice@inbox.ru, norritsin@mail.ru

For the main tree species in North America, Europe and Japan, a number of thousands of allometric equations for single-tree biomass estimation using mostly tree height and stem diameter at breast height are designed that are intended for terrestrial forest mensuration. However, an innovative airborne laser method of the forest canopy sensing allows processing of on-line a number of morphological indices of trees, to combine them with the biomass allometric models and to evaluate the forest carbon pools. The database of 28 wood and shrub species containing 2.4 thousand definitions is compiled for the first time in the forests of Eurasia, and on its basis, the allometric transcontinental models of fractional structure of biomass of two types and dual use are developed. The first of them include as regressors the tree height and crown diameter and are intended for airborne laser location, while the latter have a traditional appointment for terrestrial forest biomass taxation using tree height and stem diameter. Those and others explain, in most cases, more than 90 % of tree biomass variability. Processing speed of laser location, incommensurable with the terrestrial mensuration, gives the possibility of assessing the change of carbon pool of forests on some territories during periodic overflights. The proposed information can be useful when implementing activities on climate stabilization, as well as in the validation of the simulation results when evaluating the carbon depositing capacity of forests.

Keywords: *allometric equations, laser forest inventory, structure of tree phytomass, morphological indicators, forest carbon pool.*

How to cite: *Usoltsev V. A., Chasovskikh V. P., Noritsina Yu. V., Noritsin D. V. Allometric models of tree biomass for airborne laser scanning and ground inventory of carbon pool in the forests of Eurasia: Comparative analysis // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2016. N. 4: 68–76 (in Russian with English abstract).*