

А
ПЗ7

*

На правах рукописи



Платонов Илья Вячеславович

Оценка надземной
фитомассы сосны обыкновенной:
географический и методологический анализ

Специальности 06. 03. 02. – лесоустройство и лесная таксация;
06. 03. 03. - лесоведение, лесоводство;
лесные пожары и борьба с ними;

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург 2006

Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете.

Научный руководитель - доктор сельскохозяйственных наук, профессор В. А. Усольцев


Официальные оппоненты – доктор биологических наук, профессор С.А. Шавнин;
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Н.А. Кряжевских

Ведущая организация – Оренбургский государственный агроуниверситет

Защита состоится 15 июня 2006 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 36.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета.

Факс: (343)254-62-25

Автореферат разослан 12 мая 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор сельскохозяйственных наук, профессор  Л. И. Аткина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. По мере развертывания экосистемных исследований, стимулированных Международной биологической программой (МБП), потребовались детальные исследования аллометрических зависимостей для массы крон, стволов и корней деревьев с целью количественной оценки газообмена в кроне, изучения потоков веществ и энергии, связанных с ростом и отпадом компонентов дерева, и параметризации правил распределения ассимилятов в имитационных моделях роста (Wirth et al., 2004).

После завершения МБП наступил 30-летний период относительного «затишья» в исследованиях биопродуктивности лесов, пока в 1997 году в Киото мировое сообщество не взяло на себя обязательства по снижению выбросов CO₂. Протокол Киото требует измерения углеродного баланса как составной части оценки возможной компенсации парниковых газов. Одним из способов количественной оценки углеродного обмена в лесу является определение изменений в запасах его фитомассы и углерода со временем.

Разработка системы региональных аллометрических моделей фитомассы для всех древесных пород – очень трудо- и времязатратная процедура. Поэтому в региональных оценках фитомассы изыскиваются возможности использования так называемых «всеобщих» регрессионных моделей (Pastor et al., 1984). Вопросам повышения точности регрессионных моделей фитомассы, изучению возможностей их унификации без ущерба для точности, а также применимости моделей фитомассы деревьев разного уровня обобщения в локальных условиях посвящена настоящая работа.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы – изучение возможностей повышения точности регрессионного определения фитомассы деревьев и древостоев и применения ее унифицированных моделей разного уровня обобщения в локальных экологических условиях разных природных подзон.

В связи с поставленной целью конкретными задачами исследования были:

- получить экспериментальные данные надземной фитомассы в культурах сосны двух природных подзон – предлесостепи и сухой степи;
- разработать регрессионные модели и нормативы для оценки фитомассы деревьев и древостоев в культурах сосны двух природных подзон;
- изучить влияние структуры модели фитомассы деревьев и количества введенных в нее переменных на точность оценки фитомассы;
- выполнить региональные сопоставления моделей фитомассы деревьев разного уровня сложности;

- проанализировать применимость моделей разного уровня обобщения в локальных условиях.

Перечисленные положения выносятся на защиту.

Научная новизна. Впервые выполнена оценка фракционной структуры фитомассы культур сосны в условиях предлесостепи Зауралья и сухой степи Тургайского прогиба в связи с возрастом насаждений и составлены таблицы для оценки фитомассы на уровнях дерева и древостоя. Сформирована база данных о фитомассе деревьев в культурах сосны и естественных древостоях разных географических регионов в количестве 1260 определений. Впервые выполнены региональные сопоставления моделей фитомассы деревьев разного уровня сложности и проанализирована применимость моделей разного уровня обобщения в локальных условиях.

Практическая значимость работы состоит в разработке нормативов, необходимых при расчетах углеродного бюджета лесных экосистем, при реализации систем лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности и комплексного освоения искусственных сосновых насаждений.

Разработанные нормативы используются Свердловской лесоохранительной экспедицией (имеется справка о внедрении) при инвентаризации культур сосны.

Обоснованность выводов и предложений. Использование обширного экспериментального материала и современных методов статистического анализа, системный подход при содержательном анализе фактических материалов и интерпретации полученных результатов, реализация поставленных задач на уровне многофакторных регрессионных моделей определяют обоснованность приведенных в диссертации выводов и предложений.

Личное участие автора. Все виды работ по теме диссертации от сбора экспериментального материала до анализа и обработки полученных результатов осуществлены автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты исследований изложены на Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса», Вологда, 2003; 5-й Международной научно-технической конференции «Лес-2004», Брянск, 2004; 4-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса», Брянск, 2004; Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Екатеринбург, 2004; Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса», Екатеринбург, 2004; 6-й Международной научно-технической конференции «Лес-2005», Брянск, 2005.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 10 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения и 9 приложений. Список использованной литературы включает 240 наименований, в том числе 140 иностранных. Текст содержит 42 таблиц и 45 рисунков.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Наибольшее внимание исследователей фитомассы деревьев традиционно уделяется естественным лесам. Биологическая продуктивность культур изучена слабее, хотя они связывают атмосферный углерод более интенсивно в сравнении с естественными насаждениями (Brown, 1996).

Анализ литературы выявляет общую закономерность перехода от формы подачи материала в исходном состоянии либо с графическим выравниванием (Данилов, 1953; Иевинь, Дикельсон, 1962; Молчанов, 1971; Смирнов, 1971), к выявлению парной связи фитомассы с одним ведущим фактором (Kittredge, 1944; Ильюшенко, 1968; Усольцев, 1972) и к объяснению изменчивости показателей фитомассы на основе многофакторного подхода, при котором в качестве определяющих факторов (независимых переменных) используются морфометрические признаки дерева и его возраст (Attiwill, 1962; Горбатенко, 1971; Карманова, 1976; Усольцев, Усольцева, 1977; Кричун, Усольцев, 1979; Биологическая продуктивность..., 1982; Wirth et al., 1999).

Определения фитомассы имеют ошибку. Рассматриваются четыре составных части ошибки модели фитомассы дерева (Cunia, 1987; Yang, Cunia, 1990) (1) ошибка выборки, (2) ошибка измерения, (3) ошибка структуры статистической модели фитомассы и (4) ошибка применения модели – связана с расхождением между истинными аллометрическими соотношениями в генеральной совокупности деревьев, для которой рассчитаны параметры модели, и теми соотношениями, которые имеют место в генеральной совокупности, к которой модель применяется в данный момент. Наибольший вклад в совокупную ошибку вносят два ее последних источника – структура модели и применение модели. Поэтому выбору оптимальной структуры модели и возможностям применения «всеобщих» моделей фитомассы деревьев уделяется наибольшее внимание.

Признано, что наиболее информативной переменной при оценке фитомассы дерева P является диаметр ствола на высоте груди D , а лучшей формой их связи – аллометрическая (степенная) функция, имеющая биологическое обоснование (Кофман, 1986). Путем логарифмирования она приводится к линейному виду:

$$\ln P = a + b \ln D. \quad (1)$$

Несмотря на очевидные преимущества в точности и логике многофакторного регрессионного моделирования фитомассы, в литературе имеются многочисленные попытки обосновать правомерность зависимости (1) в качестве «всеобщей» модели. Например, для нескольких десятков видов древесных, кустарниковых и травянистых растений модель (1) рекомендуется для применения на региональном уровне, поскольку модель объясняла 99,7 % изменчивости надземной фитомассы (Freedman, 1984). Но та же зависимость (1) лишь для одного вида - сосны обыкновенной, произрастающей в Финляндии и Испании, дает 8-кратное расхождение (Lehtonen, Vayred, 2002).

Выводы исследователей о возможности построения «всеобщих» моделей фитомассы, применимых на региональном уровне, противоречивы и неопределенны независимо от того, включена в модель одна независимая переменная – *D* (Kittredge, 1944; Shinozaki et al., 1964; Усольцев, 1972, 1973; Bickelhaupt et al., 1973; Crow, 1978, 1983; Koerper, Richardson, 1980; Tritton, Hornbeck, 1981; Schmitt, Grigal, 1981; Pastor et al., 1984; Grigal, Kernik, 1984; Singh, 1986; Ares, Fownes, 2000; Son et al., 2001; Jenkins et al., 2004) или таких переменных несколько – диаметр и высота ствола, возраст, длина кроны и др. (Wiant, 1979; Ker, 1980, 1984; Alemdag, 1981; Jacobs, Monteith, 1981; Alban, Laidly, 1982; Schlaegel, 1982; Quellet, 1983; Methven, 1983; Evert, 1984; Grigal, Kernik, 1984; Petráš et al., 1985; Marklund, 1987, 1988; Saldarriaga et al., 1988; Perala, Alban, 1993; Ben Brahim et al., 2000; Wirth et al., 2004; Lehtonen, 2005).

В целом можно сделать вывод, что для суждения о возможности или невозможности использования модели фитомассы деревьев в качестве «всеобщей», наличия высокого коэффициента детерминации недостаточно. Модель должна быть верифицирована на уровне не только деревьев, но и конкретных древостоев в локальных условиях.

ГЛАВА 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сухоложский лесхоз Агентства лесного хозяйства по Свердловской области расположен на территории Сухоложского и Богдановичского административных районов в 120 км к востоку от Екатеринбурга (57° с.ш., 62° в.д.). Территория лесхоза относится к сосново-березовому предлесостепному округу Зауральской равнинной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области (Колесников и др., 1974) и находится в зоне воздействия крупнейшей в стране Рефтинской ГРЭС, работающей на многозольных экибастузских углях. Содержащиеся в зольных выбросах микроэлементы и раскисление почв привели к повышению почвенного плодородия, в результа-

те чего класс бонитета сосновых древостоев повысился за последние 30 лет на 30% (Терин, 2004). Лесные культуры занимают площадь около 10 тыс. га (из них 90 % площадей приходится на сосну), что составляет 12 % от лесопокрытой. Приведена характеристика лесного фонда. В целом, климатические условия и плодородие почв района исследований благоприятны для произрастания сосновых насаждений сравнительно высокой производительности.

Объектами исследований служили культуры сосны обыкновенной, относящиеся к разнотравному типу леса. Посадка осуществлялась в борозды под меч Колесова. Шаг посадки в ряду 0,7-1,0 м, ширина междурядий 3,0-4,0 м. Таксационная характеристика пробных площадей дана в табл. 1.

Таблица 1
Таксационные показатели культур сосны разного возраста по данным перечетов на пробных площадях Сухоложского лесхоза

№ пробной площади	Состав	Возраст, лет	Средние		Густота, экз/га	Площадь сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
			Высота, м	Диаметр, см				
1	10С	15	5,55	7,2	3200	13,03	34,8	I
2	10С	18	7,71	7,4	6045	26,33	106,9	I
3	10С	26	8,60	10,0	3396	26,55	166,3	II
4	9С1Б	29	12,2	12,1	2733	31,58	206,6	I
5	10С	32	16,6	12,5	3944	48,41	452,3	Ia

В Тургайском прогибе (Семиозерный лесхоз в Аман-Карагайском бору) объектами исследований служили культуры сосны на плоских и волнистых равнинах (Маланьин, 1984). Пробные площади заложены на дерново-боровых и темно-каштановых почвах с доступным для корней уровнем грунтовых вод – 1,5-2,0 м (I класс бонитета). Культуры на пробных площадях с более глубоким уровнем залегания грунтовых вод – 3,5-4,5 м характеризуются III классом бонитета. Шаг посадки в ряду 0,7-1,0 м, ширина междурядий 1,5-2,0 м. Таксационная характеристика пробных площадей дана в табл. 2.

Фитомасса в абсолютно сухом состоянии получена у 38 и 108 модельных деревьев соответственно в Сухоложском и Семиозерном лесхозах.

Для географического и методологического анализа оценок фитомассы сосны собственных данных автора недостаточно и привлечены материалы других исследователей, в том числе полученные в других природных зонах. В частности, привлечены данные Н.С. Ненашева (2005), с которыми количество модельных деревьев в культурах сосны Аман-Карагайского бора достигло 206 на 21 пробной площади. В сформированную сводку данных вошли также

Таблица 2

Таксационные показатели культур сосны по двум возрастным и одному густотному рядам по данным перерасчетов на пробных площадях Аман-Карагайского бора

№ пробной площади	Состав	Возраст, лет	Средние		Густота, тыс. экз. на 1 га	Площадь сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
			Диаметр, см	Высота, м				
Возрастной ряд для I класса бонитета, влажный бор								
1	10С	10	3,3	4,0	18,87	16,1	52,3	I
2	10С	19	9,0	9,5	7,000	44,5	234	Ia
3	10С	23	11,0	10,2	3,830	36,4	203	I
4	10С	26	8,8	9,9	6,080	37,0	195	I
Возрастной ряд для III класса бонитета, сухой бор								
10	10С	11	3,0	2,8	10,46	7,4	43,3	III
11	10С	14	3,8	3,3	9,730	11,0	33,0	III
12	10С	15	4,1	3,7	8,440	10,9	51,7	III
13	10С	25	7,0	7,5	8,640	33,3	177	III
Густотный ряд для возраста 22 года, I класс бонитета								
19	10С	22	12,0	10,2	2,610	29,5	108	I
20	10С	22	9,6	9,2	4,240	30,7	170	I
21	10С	22	9,4	9,3	5,210	36,2	178	I

материалы 71 дерева на 9 пробных площадях Н. С. Ненашева (2005) по лесостепи Омской области (Саргатский лесхоз); 119 деревьев на 12 пробных площадях, заложенных в естественных сосняках В.В. Терентьевым (2006) в Аман-Карагайском бору; 140 деревьев на 14 пробных площадях и 89 деревьев на 5 пробных площадях соответственно в Ара-Карагайском бору Тургайского прогиба и Казахском мелкосопочнике, заложенных в естественных сосняках В.А. Усольцевым (1988); 255 деревьев на 8 пробных площадях, заложенных М.Г. Семечкиной (1978) в естественных сосняках Красноярско-Канской лесостепи; 163 дерева на 19 пробных площадях, заложенных А.А. Молчановым (1971) в естественных сосняках Архангельской области, северная тайга; 60 деревьев на 7 пробных площадях, заложенных в Подмосковье, в подзоне хвойно-широколиственных лесов А.А. Молчановым (1974) и 113 деревьев на 7 пробных площадях в Южной Карелии (средняя тайга), заложенных Н.И. Казимировым с соавторами (1977). Всего в сводку вошли данные 1260 деревьев по 107 пробным площадям.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробные площади заложены согласно ОСТ 56-69-83. После перечета измеряли высоты у 15-20 растущих деревьев и строили графики высот. Модельные деревья в количестве 9-10 на пробной площади отбирались средними по диаметру, высоте и размерам кроны для ступени толщины в пределах диапазона варьирования их диаметров. После рубки измерялись длина дерева, протяженность бессучковой части, диаметр ствола у основания кроны. Ствол делили на секции длиной, равной 1/10 высоты дерева. На середине секций и на высоте груди определяли диаметры ствола в коре. В каждом сечении выпиливали диск, измеряли его толщину и диаметры в коре и без коры в двух направлениях с целью определения объема. Затем отделяли кору, взвешивали с точностью до 0,1 г отдельно древесину и кору до и после сушки при температуре 100–105 °С до постоянного веса. Рассчитывали базисную (условную) плотность древесины и коры дисков и по полученным результатам переводили показатели ствола из объемных единиц в весовые.

После валки дерева обрубали последовательно каждую мутовку в направлении от нижней части кроны к верхней. Взвешивали мутовку целиком, а затем отбирали среднюю ветвь, взвешивали с точностью 5 г и удаляли всю хвою. По навескам хвои и ветвей, взятым в средней части каждой трети кроны, и взвешенным до и после сушки до постоянного веса, рассчитывалась доля хвои в массе каждой мутовки и определялась масса хвои всего дерева и скелета кроны. Экспериментальные значения фитомассы на пробных площадях в расчете на 1 га определены регрессионным методом.

ГЛАВА 4. ФИТОМАССА КУЛЬТУР СОСНЫ В ПРЕДЕСОСТЕПИ И СУХОЙ СТЕПИ И НОРМАТИВЫ ЕЕ ОЦЕНКИ

При расчете моделей для оценки фитомассы деревьев принята структура регрессионной модели (Усольцев, 1988):

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln D + a_3 \ln H + a_4 (\ln H)^2, \quad (2)$$

где P_i - масса фракции дерева (ствол, листва, ветви) в абсолютно сухом состоянии, кг; A - возраст дерева, лет; H и D - соответственно его высота (м) и диаметр на высоте груди (см).

Чтобы выявить различия культур сосны двух регионов - предлесостепи Зауралья и сухой степи Тургайского прогиба по структуре фитомассы или отметить их отсутствие, регионы закодированы бинарной переменной X , которая введена в (2) как дополнительная независимая переменная. Ее значимость оказалась статистически достоверной: для массы стволов ($t_{\text{факт}} = 4,2 > t_{0,5}$

=2,0), для массы ветвей ($t_{\text{факт}} = 2,4 > t_{05} = 2,0$) и для массы хвои ($t_{\text{факт}} = 3,0 > t_{05} = 2,0$). Однако это различие не однозначно: знак при фиктивной переменной X положительный в уравнении для массы стволов и отрицательный – в уравнениях для массы ветвей и хвои. Это означает, что в культурах предлесостепи масса стволов деревьев меньше, чем в сухой степи, а масса ветвей и хвои – наоборот, выше. Причина этого явления – в существенно меньшей густоте культур предлесостепи, которые были заложены при большей ширине междурядий. В итоге этих противоположных тенденций два региона по надземной фитомассе достоверно не различаются ($t_{\text{факт}} = 0,1 < t_{05} = 2,0$). Согласно составленным трехходовым таблицам, фитомасса стволов в культурах предлесостепи ниже соответствующего показателя степи на 12%, а масса кроны, напротив, выше – по хвое на 28% и по ветвям на 27 % по сравнению с соответствующими показателями культур степи.

Фактические значения фитомассы на 1 га по регионам даны в табл. 3.

Таблица 3

Показатели фитомассы в абсолютно сухом состоянии культур сосны, произрастающих в предлесостепи Зауралья и в сухой степи Тургайского прогиба

№ п/п	А, лет	N, тыс. экз./га	M, м ³ /га	Фитомасса, т/га				
				Ствол		Ветви	Хвоя	Итого
				Всего	Кора			
Предлесостепь Зауралья								
Возрастной ряд для Ia-I классов бонитета								
1	15	2,592	34,8	11,5	2,2	6,5	6,0	24,0
2	18	6,045	107,0	36,8	6,1	8,1	10,6	55,5
3	26	3,396	166,0	42,8	5,7	12,8	10,4	66,0
4	29	2,733	207,0	71,1	7,2	10,7	8,5	90,3
5	32	3,944	452,0	147,2	13,5	18,1	9,4	174
Тургайский прогиб								
Возрастной ряд для I класса бонитета, влажный бор								
1	10	18,87	52,3	17,6	3,63	3,56	5,97	27,1
2	19	7,000	234	81,3	11,5	13,8	12,8	107
3	23	3,830	203	65,1	9,12	10,8	13,4	89,3
4	26	6,080	195	69,4	10,3	6,36	5,77	81,5
Возрастной ряд для III класса бонитета, сухой бор								
10	11	10,46	43,3	6,37	1,65	3,58	4,92	14,9
11	14	9,730	33,0	10,3	2,54	2,27	6,15	18,7
12	15	8,440	51,7	18,7	5,22	6,02	7,28	32,0
13	25	8,640	177	62,9	10,6	6,14	6,14	75,2
Густотный ряд для возраста 22 года, I класс бонитета								
19	22	2,610	108	36,28	4,31	9,88	7,45	53,6
20	22	4,240	170	59,32	6,78	14,57	10,57	84,5
21	22	5,210	178	62,17	8,93	7,86	8,54	78,6

Выполнен анализ изменения фитомассы на 1 га по возрастному и густотному градиентам во влажных условиях Аман-Карагайского бора (I класс бонитета, получена статистически достоверная зависимость от двух факторов и дана ее графическая интерпретация).

Анализ возрастной динамики фитомассы на 1 га выполнен в два этапа. На первом этапе выявлялись различия культур предлесостепи Зауралья и сухой степи Тургая по надземной фитомассе, произрастающих в одних и тех же условиях увлажнения, а именно во влажном типе (I класс бонитета). В уравнение зависимости фитомассы от возраста введена бинарная переменная региона, которая оказалась статистически не значимой: для массы стволов $t_{\text{факт}} = 1,0 < t_{05} = 2,0$, для массы ветвей $t_{\text{факт}} = 0,51 < t_{05} = 2,0$ и для массы хвои $t_{\text{факт}} = 0,68 < t_{05} = 2,0$. Поскольку культуры сосны двух регионов не различаются по надземной фитомассе, несмотря на то, что относятся к двум разным природным подзонам, имеют разную густоту посадки и разные уровни промышленного загрязнения, на втором этапе анализа пробные площади для культур предлесостепи и сухой степи, произрастающих в одинаковых эдафических условиях (I класс бонитета) объединены в одну группу и выполнено сопоставление фитомассы культур сосны во влажных (I класс бонитета) и сухих (III класс бонитета) условиях. Различие оказалось существенным, и для двух регионов с разными эдафическими условиями составлены отдельные таблицы возрастной динамики фитомассы (табл. 4).

Таким образом, различие фитомассы двух подзон может быть достоверным на уровне дерева, но недостоверным - на уровне древостоя. По-видимому, приемлемость региональной модели фитомассы для оценки ее у деревьев еще не означает приемлемости для оценки фитомассы древостоев, поскольку при переходе от уровня дерева к уровню древостоя существенное значение имеют различия морфоструктуры древостоев.

ГЛАВА 5. ОБОБЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ОШИБКИ

При выборе структуры сопоставляемых моделей фитомассы принято во внимание условие применимости той или иной структуры ко всем фракциям фитомассы, а не к отдельным из них. Например, пайп-модель оптимальна лишь для массы кроны, но неприемлема для массы ствола. То же самое относится к включению в модель фитомассы радиального прироста Z, приемлемого лишь при оценке фитомассы кроны, но теряющего информативность при оценке массы ствола (Усольцев, 1988, 1997).

Исходя из литературного анализа наиболее приемлемых структур моделей фитомассы, в наш расчет включены следующие варианты:

Таблицы возрастной динамики фитомассы культур сосны предлесостепи Зауралья и сухой степи Тургайского прогиба

Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Площадь сечений, м ² /га	Густота, экз./га	Запас, м ³ /га	Фитомасса				
						Ствол в коре	Кора ствола	Ветви	Хвоя	Итого
Предлесостепь Зауралья (I класс бонитета)										
15	6,51	6,88	24,3	6526	84,3	29,5	0,17	7,29	8,91	45,7
20	8,39	9,00	29,8	4674	136	46,8	0,14	9,45	9,59	65,8
25	10,5	10,4	34,9	4110	197	66,9	0,13	10,9	9,14	86,9
30	12,8	11,2	39,7	4027	267	89,5	0,11	11,9	8,21	109
35	15,4	11,6	44,3	4199	345	114	0,10	12,5	7,16	134
Сухая степь Тургайского прогиба (III класс бонитета)										
15	3,74	4,41	11,7	7671	53,6	14,0	0,23	4,26	6,47	24,7
20	5,33	6,18	18,4	6145	87,7	26,8	0,20	5,59	7,03	39,4
25	7,21	7,52	26,2	5894	128	44,2	0,17	6,53	6,76	57,5
30	9,40	8,47	34,9	6199	175	66,6	0,15	7,16	6,12	79,9
35	11,9	9,09	44,6	6865	228	94,2	0,14	7,55	5,36	107

$\ln P_{ABO} = a + b \ln D,$
 $\ln P_{ABO} = a + b \ln D_{0,1},$
 $\ln P_{ABO} = a + b \ln D^2 H,$
 $\ln P_{ABO} = a + b \ln D + c \ln H,$
 $\ln P_{ABO} = a + b \ln D + c \ln H + d \ln H,$
 $\ln P_{ABO} = a + b \ln D + c \ln H + d \ln D^2 + e (\ln H)^2 + f \ln CL,$

где P_{ABO} - надземная фитомасса, кг; CL - длина кроны, м; $D_{0,1}$ - диаметр ствола на высоте 0,3 м, см.

Получил подтверждение тем, что по мере увеличения числа независимых переменных в модели повышается ее "объяснительная" способность, характеризующая величину R^2 , которая увеличивается с 98,3% для (3) до 99,3% для (8). В последней константа при A оказалась незначимой. Хотя модели (3)-(8) почти 100-процентно объясняют изменчивость фитомассы, гораздо важнее знание смещений (т.е. систематических ошибок), которые дают модели регионального уровня (т.е. рассчитанные по тому или другому региональному массиву данных) по отношению к "всеобщей" (т.е. рассчитанной по всему массиву). Поскольку "всеобщие" модели, адаптированы к локальным (региональным) условиям роста деревьев, нами сделано предположение, что более сложные региональные модели дадут меньшие смещения по отношению к "всеобщей", чем однофакторные. Для проверки этой гипотезы выполнена коировка региональных массивов данных блоковыми переменными (Дрейпер, Смит, 1973) и в качестве "нулевого" блока приняты параметры "всеобщих" модели (3)-(8), которые закодированы нулями.

Оказалось, что несмотря на высокий R^2 (0,985-0,993) "всеобщих" модели (3)-(8), региональные смещения оценок надземной фитомассы деревьев колеблются в диапазоне от -14 до +21%. Наименьшая величина среднего смещения по модулю (т.е. без учета знака) оказалась при оценке фитомассы по наиболее простой модели (3) и составила 11,3%, далее следуют модели (5) и (8) - 14,0-4,8%, затем модель (7) 16,5% и, наконец, модели (4) и (6) - 18,3-8,6%.

Обычно полная информация для всех деревьев на пробной площадке имеется лишь по двум показателям: возраст A (и то лишь в разновозрастных древостоях) и диаметр ствола на высоте груди D (в виде пересечной ведомости деревьев). Другие показатели, такие как высота дерева H , длина кроны CL всех деревьев (а не только модельных) при закладке пробных площадей измеряются очень редко. С учетом возможностей применения моделей фитомассы деревьев для последующей ее оценки на единице площади дерево-стоя региональные сопоставления выполнялись для двух структур модели:

$$\ln P_i = a + b \ln D + cX + d(\ln D)X \quad (9)$$

$$\ln P_i = a + b \ln D + c \ln A + d(\ln D)^2 + e(\ln A)^2 + fX + g(\ln D)X, \quad (10)$$

где X – бинарная переменная, характеризующая принадлежность модели к тому или иному региону. Константа при X характеризует величину смещения свободного члена модели, а константа при $(\ln D)X$ – углового коэффициента.

Результаты расчета моделей (9) и (10) свидетельствуют о том, что по надземной фитомассе различия моделей достоверны по всем парам сравниваемых регионов и происхождений сосны, за исключением культур Сухоложского и Саргатского лесхозов, между которыми различия недостоверны по величине как свободного члена, так и углового коэффициента. Различия также достоверны по массе хвои по всем парам регионов и происхождений, кроме естественной сосны Северного Казахстана и остальных регионов. Подтверждается различие большинства регионов и происхождений на статистически достоверном уровне также по массе ствола и ветвей. По массе хвои достоверность различия моделей (10) подтверждается по меньшему количеству регионов и происхождений по сравнению с моделями (9), возможно, вследствие наличия в этих моделях второго фактора – возраста дерева.

Анализ степени приемлемости моделей разного уровня обобщения при локальных определениях фитомассы на 1 га выполнен по модифицированным моделям (9) и (10) с исключенными бинарными переменными, а именно:

$$\ln P_i = a + b \ln D \quad (11)$$

$$\ln P_i = a + b \ln D + c \ln A + d(\ln D)^2 + e(\ln A)^2. \quad (12)$$

Анализ применимости однофакторных моделей разного уровня обобщения в локальных условиях. Для расчета ошибок определения надземной фитомассы на 1 га с помощью моделей фитомассы деревьев (11) нами предварительно выделено несколько уровней обобщения. База экспериментальных данных подразделена на пять блоков и соответствующих уровней обобщения, с 1-го по 5-й, с нарастанием количества экспериментальных данных по мере повышения уровня обобщения, где первому уровню (109-206 деревьев) соответствует совокупность деревьев данного региона и происхождения, а пятому – вся совокупность 1260 деревьев. Шестой уровень представлен “компилированной” моделью, а седьмой – теоретической моделью Веста (West et al., 1999), которые требуют специального комментария.

По мнению многих зарубежных «математизированных» экологов, «живой мир управляется законами, основанными на фрактальной геометрии и размерах организмов», и хотя лес – очень сложная система, «в основе этой сложности лежат очень простые правила» (Whitfield, 2001. P. 342).

Теоретическая модель Веста представляет собой симбиоз теории фракталов и пайп-модели, и согласно модели Веста надземная фитомасса дерева связана с диаметром ствола по уравнению (1) при среднем значении $b = 8/3$ (или $\approx 2,67$), независимом от структурных и морфологических характеристик исследуемых деревьев.

По каждой из 107 пробных площадей мы получили модели (1), и их коэффициенты a и b связали, согласно Чейву (Chave et al., 2001), уравнением

$$a = -3,10 + 2,963 b - 1,116 b^2; \quad R^2 = 0,833. \quad (13)$$

Среднее значение коэффициентов b , полученных по 107 уравнениям, составило 2,34. Подставив его в (13), получили “компилированную” эмпирическую модель

$$\ln P = -2,278 + 2,34 \ln D, \quad (14)$$

а подставив в (13) значение $b = 2,67$, получили теоретическую модель Веста

$$\ln P = -3,145 + 2,67 \ln D. \quad (15)$$

Соответственно модели (14) и (15) включены в анализ в качестве 6-го и 7-го уровня обобщения.

По рядам распределения деревьев по диаметру для каждой пробной площади рассчитаны запасы фитомассы на 1 га с использованием моделей фитомассы (11) разного уровня обобщения. Полученные величины сопоставлены с фактическими запасами фитомассы на каждой пробной площади, определенными по взятым на ней 9-10 модельным деревьям, и рассчитаны стандартные ошибки определения фитомассы на 1 га по каждому из уровней обобщения относительно фактической фитомассы.

При анализе стандартной ошибки в связи с уровнем обобщения неожиданной оказалась ее меньшая величина (в среднем на 5%), полученная по теоретической модели Веста, по сравнению с “всеобщей”, рассчитанной по всему массиву 1260 определений. Модель Веста не имеет никакого отношения к нашей базе экспериментальных данных, но тем не менее в трех случаях из четырех дает меньшую стандартную ошибку по сравнению с “всеобщей” по 5-му уровню обобщения. Правда, это различие в ошибках статистически не достоверно ($t = 0,23 < t_{05} = 2,0$). Напротив, средняя ошибка определения надземной фитомассы на 1 га по модели Веста оказалась выше на 2,5% по сравнению с локальными моделями первого уровня, и это различие статистически достоверно ($t = 7,8 > t_{05} = 2,0$).

Анализ связи величины ошибки с уровнем обобщения (с 1-го по 6-й) моделей фитомассы, рассчитанных по базе данных (ошибки модели Веста не включены в этот анализ), показал наличие положительной зависимости, характеризующейся величиной коэффициента корреляции 0,59 (рис. 1а).

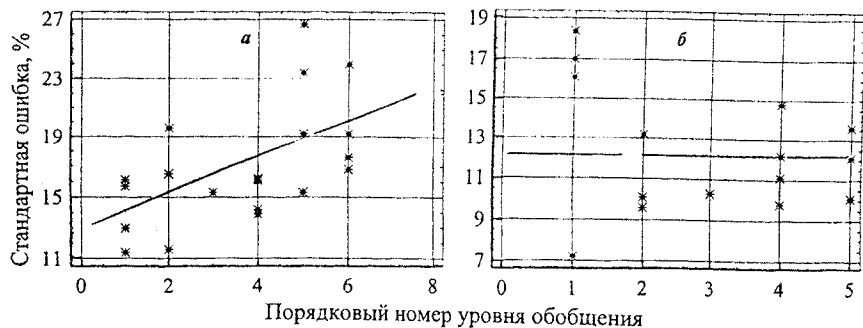


Рис. 1. Стандартная ошибка определения надземной фитомассы на 1 га по моделям (11) (а) и (12) (б) по отношению к значениям надземной фитомассы, полученным по модельным деревьям каждой пробной площади, в зависимости от уровня обобщения моделей (11) и (12).

Анализ применимости двухфакторных моделей разного уровня обобщения в локальных условиях. Для расчета ошибок определения надземной фитомассы на 1 га с помощью моделей фитомассы деревьев (12) использованы те же 5 уровней обобщения, что и в предыдущем варианте, с соответствующим разделением на блоки исходной базы данных, с тем же нарастанием количества экспериментальных данных по мере повышения уровня обобщения. При расчете фитомассы на 1 га с использованием моделей (12) и рядов распределения деревьев по ступеням толщины учтен возраст деревьев на каждой пробной площади.

В отличие от ошибок, полученных при оценке фитомассы по уровням обобщения согласно модели (11), в данном случае не выявлено какой-либо закономерности изменения ошибки определения фитомассы на 1 га в связи с уровнем обобщения ($t = 1,2 < t_{05} = 2,0$), и средняя ее величина составила 12 % (рис. 1б). Как и в первом случае, наименьшей ошибкой характеризуется оценка массы стволов и наибольшей – оценка массы кроны.

Таким образом, включение в модель фитомассы дерева дополнительно к диаметру ствола еще одного фактора – возраста дерева снизило уровень стандартной ошибки определения надземной фитомассы на 1 га. Если при использовании однофакторной модели (11) стандартная ошибка возрастала от 14% при первом уровне обобщения до 19-20 % при 5-6-м уровнях обобщения, то при использовании двухфакторной модели (12) ошибка, во-первых, снизилась до величины 12 % и, во-вторых, ее величина стала независимой от уровня обобщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В исследованиях углероддепонирующей способности лесов широко применяются регрессионные модели для оценки фитомассы деревьев по одному или нескольким легко измеряемым показателям деревьев, однако область применения подобных моделей и ошибки, связанные с их экстраполяцией на обширные лесные территории, в большинстве случаев неизвестны.

2. Получены новые материалы о надземной фитомассе культур сосны двух природных подзон – предлесостепи Зауралья и сухой степи Тургайского прогиба (Аман-Карагайский бор). Установлено, что многофакторные модели фитомассы деревьев двух подзон различаются на статистически достоверном уровне, и составлены отдельные таблицы для ее оценки по фракционному составу.

Различие надземной фитомассы на 1 га двух подзон, напротив, статистически не достоверно, по крайней мере в одинаковых лесорастительных условиях, характеризуемых I классом бонитета. Поэтому фитомасса этих культур двух подзон объединена в одну совокупность и сопоставлена с фитомассой культур сосны, произрастающих в сухих условиях Аман-Карагайского бора (III класс бонитета). Различие оказалось статистически достоверным, и составлены отдельные таблицы возрастной динамики фитомассы для I и III классов бонитета.

3. Для анализа приемлемости моделей фитомассы деревьев разных уровней сложности и степени обобщения в локальных оценках фитомассы на 1 га сформирована база данных о фитомассе 1260 деревьев на 107 пробных площадях, в которую кроме собственных материалов вошли литературные данные по естественным соснякам Северного Казахстана (Аман-Карагайский и Ара-Карагайский боры и Казахский мелкосопочник), Красноярско-Канской лесостепи, северной тайги Архангельской области, средней тайги Южной Карелии и смешанных лесов Московской области, а также по культурам сосны в лесостепи Омской области (Саргатский лесхоз).

4. Установлено, что “всеобщая” (т.е. рассчитанная по всему массиву 1260 определений) аллометрическая зависимость *надземная фитомасса* ~ *диаметр ствола* объясняет 98,5% изменчивости фитомассы, а включение в модель дополнительных переменных повышает объяснительную способность модели до 99,3%. Тем не менее, различия моделей фитомассы, рассчитанных для отдельных регионов и происхождений сосны, оказались статистически значимыми. Смещения их оценок фитомассы (систематические ошибки) относительно “всеобщей” модели колеблются от -14 до +21 %, а наименьшим

смешением по модулю характеризуется аллометрическая однофакторная модель.

5. Для оценки степени приемлемости моделей фитомассы деревьев разного уровня обобщения в локальных условиях база данных подразделена на пять уровней обобщения, где первому уровню (109-206 деревьев) соответствует совокупность деревьев данного региона и происхождения, а пятому – вся совокупность 1260 деревьев. По каждому уровню обобщения рассчитаны модели фитомассы деревьев двух структур, включающие в качестве независимых переменных в первом случае только диаметр ствола, а во втором - диаметр и возраст дерева. По рядам распределения деревьев по диаметру для каждой пробной площади рассчитаны запасы фитомассы на 1 га с использованием моделей фитомассы разного уровня обобщения в упомянутых двух вариантах. Полученные величины сопоставлены с фактическими запасами фитомассы на каждой пробной площади, определенными по взятым на ней 9-10 модельным деревьям, и рассчитаны стандартные ошибки определения фитомассы на 1 га по каждому из уровней обобщения относительно фактической фитомассы.

6. Установлено, что по мере повышения уровня обобщения с 1-го по 5-й ошибка определения фитомассы по однофакторным моделям возрастает с 14 до 20 % ($r = 0,59$).

7. Ошибка определения фитомассы на 1 га с использованием теоретической модели Веста (West et al., 1999), представляющей симбиоз теории фракталов и пайп-модели и не имеющей отношения к сформированной базе данных, оказалась достоверно более высокой по сравнению с соответствующей ошибкой модели 1-го уровня, но более низкой по сравнению с ошибкой «всеобщей» модели (5-й уровень обобщения).

8. При использовании в расчетах фитомассы на 1 га двухфакторных моделей фитомассы деревьев связь ошибки определения с уровнем обобщения статистически не достоверна ($t = 1,2 < t_{05} = 2,0$), а ее среднее значение (12%) оказалось ниже ошибки 1-го уровня обобщения, рассчитанной по однофакторной модели.

9. Определение фитомассы на 1 га соснового выдела с использованием перечетной ведомости деревьев и модели фитомассы деревьев, рассчитанной по их совокупности для данного региона и данного происхождения древо-стоя, характеризуется стандартной ошибкой 14% при учете в модели одного фактора и 12% - при учете двух факторов.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Усольцев В. А., Марковский В. И., Максимов С. В., Ефименко О. А., Петелина О. А., Щукин А. В., Платонов И. В., Белоусов Е. В.,

- Терентьев В.В. Распределение запасов органического углерода на территории Свердловской области // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23.- Екатеринбург: УГЛТУ, 2003.- С. 104-115.
2. Усольцев В. А., Петелина О. А., Аткина Л. И., **Платонов И. В.**, Белоусов Е. В., Терентьев В.В., Ненашев Н. С. Таблицы биопродуктивности естественных сосняков Северной Евразии и их географический анализ // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23.- Екатеринбург: УГЛТУ, 2003.- С. 122-134.
3. Усольцев В. А., Залесов С. В., Усольцева Ю. В., **Платонов И. В.**, Белоусов Е. В., Терентьев В.В., Кириллова В. В. Таблицы биопродуктивности естественных березняков Северной Евразии и их географический анализ // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23.- Екатеринбург: УГЛТУ, 2003.- С. 135-150.
4. Усольцев В. А., Филиппов А.В., Крапивина О.А., Белоусов Е.В., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., **Платонов И.В.**, Щукин А.В. Углероддепонирующая емкость лесных экосистем Уральского региона и ее оценка в Евразийском масштабе // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы Всероссийской н.-т. конференции. Вологда: ВолГТУ, 2004. С. 91-93.
5. Усольцев В.А., Филиппов А.В., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., Белоусов Е.В., **Платонов И.В.** Оценка некоторых методов определения первичной продукции ветвей деревьев // Актуальные проблемы лесного комплекса. Сб. научных трудов по итогам 5-й международной научно-технической конференции «Лес-2004». Вып. 8. Брянск: Ин-т экологии МИА, 2004. С. 65-67.
6. Усольцев В.А., Петелина О.А., Ефименко О.А., Крапивина О.А., Щукин А.В., **Платонов И.В.**, Терентьев В.В., Белоусов Е.В., Ненашев Н.С. Формирование базы данных о фитомассе лесов, нормальная и предельная продуктивность, ее география // Научные труды. Выпуск 3. Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. С. 12-16.
7. Усольцев В.А., Марковский В.И., Крапивина О.А., Щукин А.В., **Платонов И.В.**, Ненашев Н.С., Белоусов Е.В., Терентьев В.В. Оценка запасов углерода и углеродно-кислородного бюджета лесных экосистем Уральского региона // Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Результаты научных работ, полученные за 2003 г. Екатеринбург: Региональный научно-технический центр, 2004. С. 510-515.
8. Усольцев В.А., Белоусов Е.В., Терехов Г.Г. Терентьев В.В., **Платонов И.В.**, Терин А.А. Биологическая продуктивность культур сосны в Сухо-ложском лесхозе Свердловской области // Актуальные проблемы лесно-

- го комплекса. Сб. научных трудов. Вып. 9. Брянск: БГИТА, 2004. С. 57-60.
9. Ненашев Н.С., Белоусов Е.В., Терентьев В.В., **Платонов И.В.**, Усольцев В.А. Сравнительный анализ годичной продукции сосняков Урала и Западной Сибири // Матер. Всероссийской н.-т. конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. С.164-165.
 10. Усольцев В.А., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., Белоусов Е.В., **Платонов И.В.** Биологическая продуктивность сосняков естественного и искусственного происхождения в Тургайском прогибе // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 10. Брянск: БГИТА, 2005. С. 67-69.

1464-06

Подписано в печать 10.05.06. Заказ № 211. Тираж 100. Объем 1,0 п.л.
620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.
Уральский государственный лесотехнический университет.
Отдел оперативной полиграфии.