

УДК 630.* 526.1+630* 524. 39

В. А. Усольцев, Н. Н. Чернов, В. В. Кириллова, С. В. Тепикин
(Уральская государственная лесотехническая академия)

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ И ТАБЛИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ ДЕРЕВЬЕВ ПИХТЫ СИБИРСКОЙ

По данным 537 модельных деревьев пихты, взятых в черневой тайге горного Алтая (неопубликованные материалы Е. А. Ефимовича и К. Е. Никитина, 1934) и 139 деревьев, взятых в сложном пихтовом насаждении Среднего Урала, построены многомерные регрессионные модели и составлены приемлемые для лесохозяйственной практики таблицы массы древесной зелени. Установлено, что при равных таксационных показателях дерева и древостоя запасы древесной зелени в пихтарниках Урала существенно выше. Использование биологически обусловленных взаимосвязей позволяет снизить трудоемкость построения многофакторных моделей и таблиц для оценки запасов древесной зелени в пихтарниках.

Пихта сибирская — одна из основных лесообразующих пород — имеет большое экономическое и средообразующее значение. Первые попытки составления таблиц фитомассы крон пихты имели чисто утилитарную, прикладную направленность, поскольку пихта — порода специфическая, содержащая в хвое и коре уникальные по составу эфирные масла (Чернов, 1988).

В 1931-1932 гг. таксационно-фитопатологической партией Казлеспрома при устройстве лесов Зырянковского и Катон-Карагайского леспромхозов Казахстанского Алтая был собран обширный экспериментальный материал по выходу древесной зелени (ДЗ). На его основе научными сотрудниками Казахской лесной опытной станции ВАСХНИЛ-ВНИЛАМИ Е. А. Ефимовичем и К. Е. Никитиным (1934) были впервые составлены таблицы для таксации ДЗ (охвобенные ветви длиной 15-20 см) на уровне дерева и древостоя. На период исследований площадь пихтовых лесов Казахстанского Алтая составляла 400 тыс. га. Это были чистые пихтарники без примеси ели, иногда с примесью лиственных пород (черневая тайга). В этих древостоях было срублено 537 модельных деревьев, распределение которых по классам бонитета и ступеням толщины приведено в табл. 1.

Полнота древостоев пробных площадей была в пределах от 0,3 до 0,8. Распределение модельных деревьев в этом диапазоне полнот составило соответственно 2, 28, 45, 6, 9 и 10%, т. е. 73% модельных деревьев взято при преобладающей полноте 0,4-0,5. Распределение модельных деревь-

Таблица 1

**Распределение модельных деревьев по классам бонитета
и ступеням толщины**

Класс бонитета	Ступени толщины											Итого
	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	
I	1	2	6	9	10	10	16	11	10	4	2	81
II	6	8	17	16	21	18	14	23	7	2	1	133
III	16	19	19	21	41	39	22	19	6	1	1	204
IV	18	18	12	11	14	8	4	6	1	1	1	68
V	9	6	6	1	2	—	—	2	—	—	—	26
Всего	50	53	60	58	88	75	56	60	24	8	5	537

ев с III по VIII классы возраста составляло соответственно 16, 28, 26, 9 и 3% и у 6% деревьев возраст не определен из-за напенной гнили. Почти 60% экспериментального материала получено в приспевающих и спелых древостоях. ДЗ учитывалась в единицах массы и объема. Последний определен в складочной (путем укладки в ящик размером 1,0x0,5x0,5 м) и плотный (путем километирования) мерах.

Таким образом, был получен обширный экспериментальный материал, на основе которого с использованием аналитического выравнивания парных связей разработаны уникальные по тому времени нормативы. В 1953 г. Е. А. Ефимович и К. Е. Никитин представили в Гослесбумиздат рукопись монографии «Выход пихтовой лапки в лесах Алтая Казахстана и производство пихтового масла» объемом 5 печатных листов, включающую три главы:

- 1) общие сведения об эфирных маслах;
- 2) производство пихтового масла;
- 3) выход пихтовой лапки.

Лесохимическим отделом Управления лесопромышленной кооперации при СМ РСФСР на рукопись было дано заключение, отрицательное по части технологии производства пихтового масла. В результате рукопись была отклонена, хотя таблицы выхода ДЗ получили в отзыве самую высокую оценку. В 1964 г. Украинская сельскохозяйственная академия предложила рукопись Казахскому лесоустроительному предприятию для использования в производстве и для опубликования ее в Казахстане. Однако таблицы выхода ДЗ, составленные на уровнях дерева и древостоя, так и не были опубликованы.

Одна из причин этого, возможно, состояла в нетрадиционном подходе авторов к отнесению деревьев к тому или иному классу бонитета. Е. А. Ефимович и К. Е. Никитин (1934) отмечают, что класс бонитета определялся для каждой модели отдельно по соотношению возраста и высоты, вследствие чего приходилось сталкиваться с неизбежными противоречи-

ями при бонитировании: довольно часто попадались модели, взятые в одном древостое, одинаковые по диаметру и высоте, но вследствие расхождения в возрасте на 10-15 лет их приходилось относить к разным классам бонитета.

Поскольку исходный экспериментальный материал по выходу ДЗ не сохранился, мы предприняли попытку модифицировать таблицы Е. А. Ефимовича и К. Е. Никитина с целью:

- устранить неточность, связанную с установлением класса бонитета,
- привести таблицы к сравнимому виду путем регрессионного моделирования,
- выявить различия в запасах ДЗ пихтарников горного Алтая и Среднего Урала.

Прежде всего, табличную форму материала необходимо было заменить аналитической путем расчета четырехфакторной регрессионной модели. С этой целью цифровой материал таблиц был подвергнут содержательному анализу с использованием метода последовательного сокращения размерности (Усольцев, 1985). При этом важно было установить вид зависимости массы ДЗ ($P_{дз}$) дерева от диаметра на высоте груди (D).

Е. А. Ефимович и К. Е. Никитин строили для каждого класса бонитета обобщенную матрицу распределения числа деревьев по ступеням толщины и массе (объему) ДЗ (табл. 2) и рассчитывали коэффициенты корреляции и корреляционные отношения (табл. 3). По соотношению коэффициента корреляции и корреляционного отношения рассчитывалась мера линейности (табл. 3), которая во всех случаях была существенно ниже 3. На этом основании Е. А. Ефимович и К. Е. Никитин аппроксимировали соотношение $P_{дз} = f(D)$ линейной функцией, хотя названная взаимосвязь фактически имеет нелинейный характер. Об этом свидетельствуют систематическое превышение корреляционных отношений над коэффициентами корреляции (табл. 3), а также анализ остатков линейной функции. Последняя дает заниженные значения объема ДЗ при минимальных и максимальных ступенях D и не проходит через начало координат. Здесь вновь проявляется противоречие между двумя статистическими критериями, уже обсуждавшееся ранее (Усольцев, 1985), — мерой линейности и критерием Дарбина-Уотсона. За основу нами была принята не линейная, а аллометрическая функция аппроксимации, имеющая биологическое обоснование (Кофман, 1986):

$$\ln P_{дз} = a_0 + a_1 \ln D, \quad (1)$$

где $P_{дз}$ — масса ДЗ дерева в свежесрубленном состоянии, кг; D — диаметр на высоте груди, см.

Соотношение $P_{дз} = f(D)$ в таблицах Е. А. Ефимовича и К. Е. Никитина является исходным, оно повторяется по пяти градациям полноты (0,3-0,7), образуя двухходовый блок. Последний, в свою очередь, повторяется по шести классам возраста (50-150 лет), образуя трехходовый блок. Наконец, повторение трехходового блока по пяти классам бонитета (I-V)

Таблица 2

**Распределение числа деревьев по градациям объема ДЗ и ступеням толщины
стволов, см, для III класса бонитета**

D, см	Градации объема ДЗ одного дерева, в складочных м ³ х100														Итого			
	4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100	108		116	124	132
12	7	7	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16
16	6	10	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19
20	1	5	4	4	1	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19
24	—	—	1	5	6	2	4	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	21
28	—	—	3	5	9	5	7	7	4	1	—	—	—	—	—	—	—	41
32	—	—	—	2	9	6	7	4	7	3	1	—	—	—	—	—	—	39
36	—	—	—	—	1	7	1	2	3	5	3	—	—	—	—	—	—	22
40	—	—	—	—	1	1	2	1	2	9	1	—	1	—	1	—	—	19
44	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	1	—	—	—	2	—	1	6
48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	1
52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1
Всего	14	22	10	19	27	23	23	17	18	19	5	1	2	—	3	—	1	204

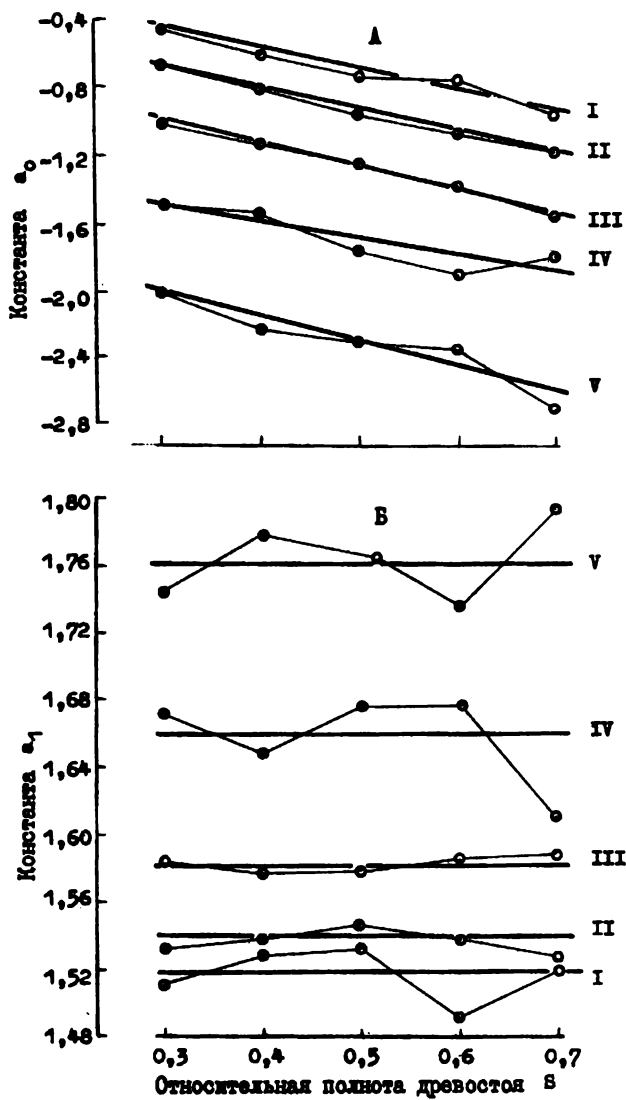


Рис. 1. Зависимость констант $a_0(A)$ и $a_1(B)$ уравнения (1) от полноты древостоя. I, II, V — классы бонитета

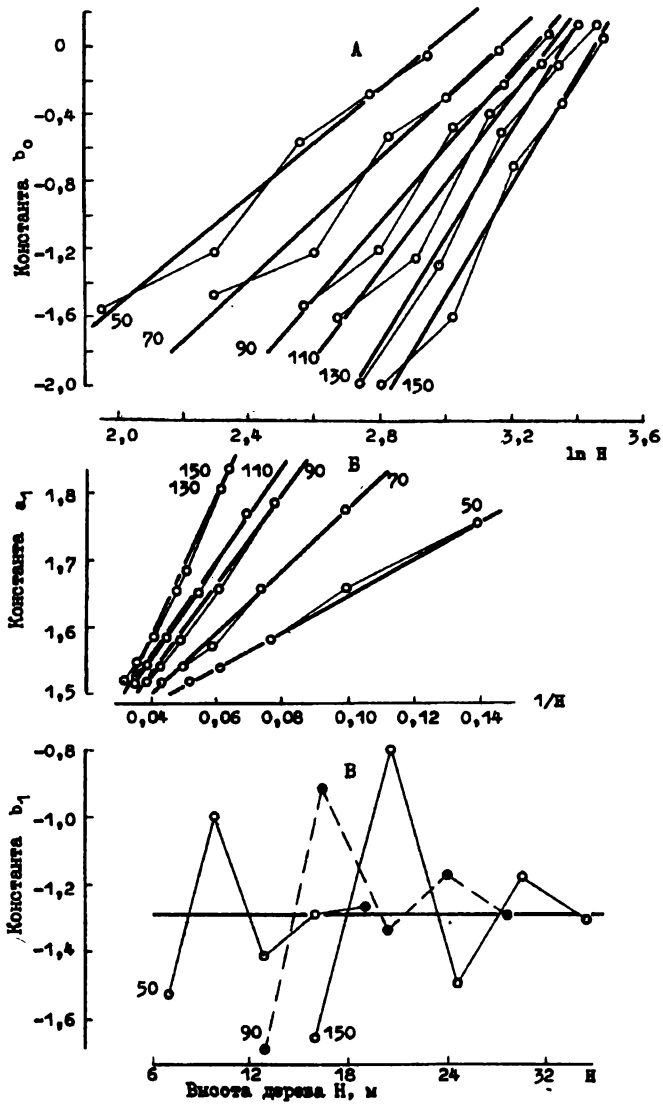


Рис. 2. Зависимость констант b_0 (А), a_1 (Б) и b_1 (В) уравнения (3) от высоты дерева. Цифрами обозначен возраст дерева, лет

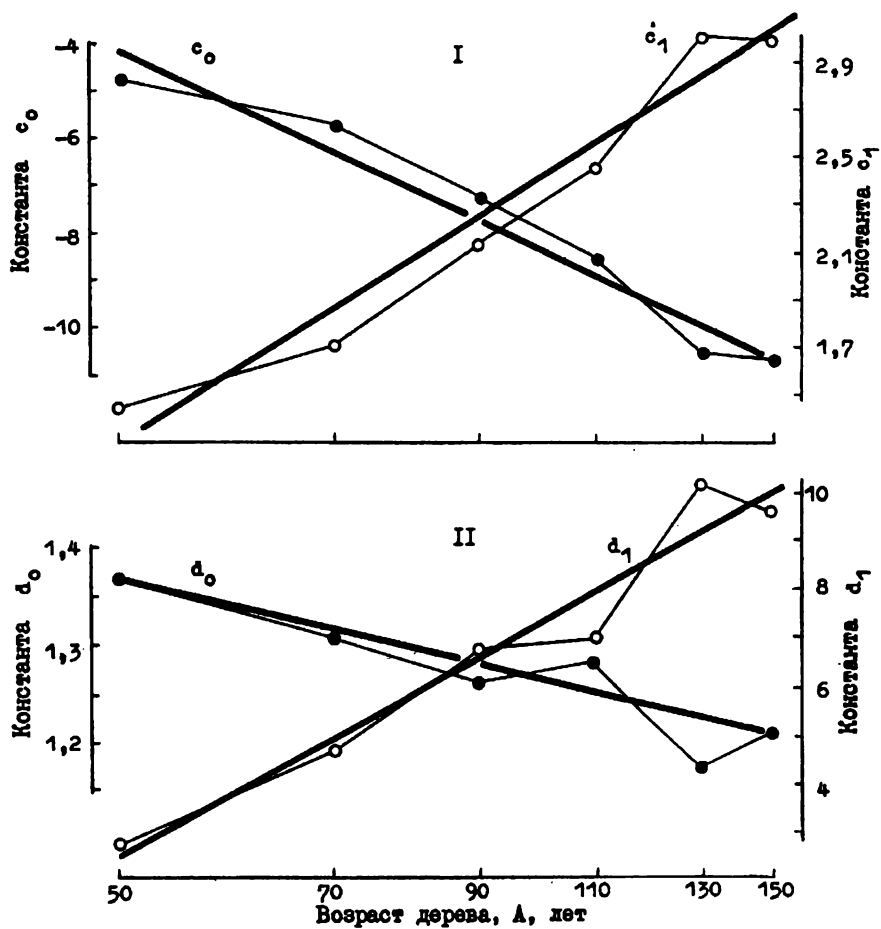


Рис. 3. Зависимость констант c_0 и c_1 (I) уравнения (4) и констант d_0 и d_1 (II) уравнения (5) от возраста дерева

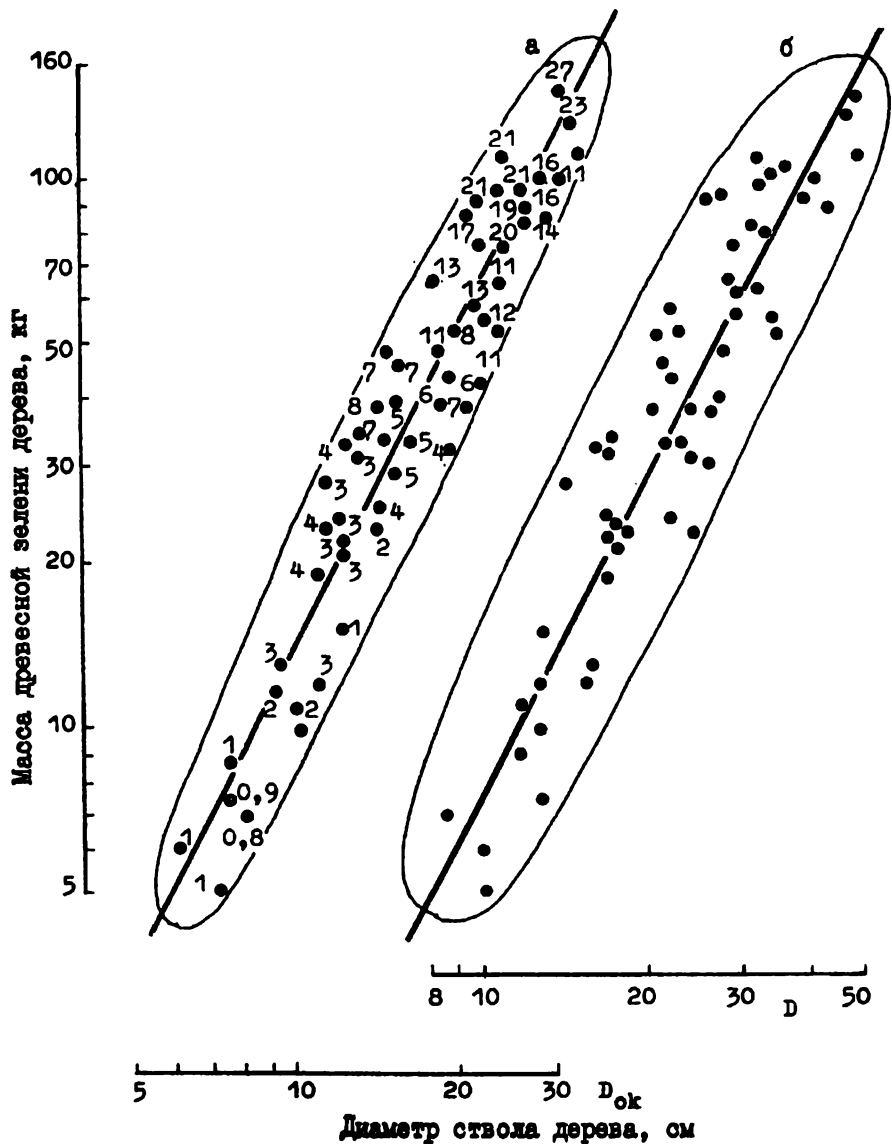


Рис. 4. Зависимость массы древесной зелени в свежем состоянии от диаметра ствола дерева у основания кроны (а) и на высоте груди (б). Цифрами обозначен объемный прирост, средний за последние 10 лет, дм^3

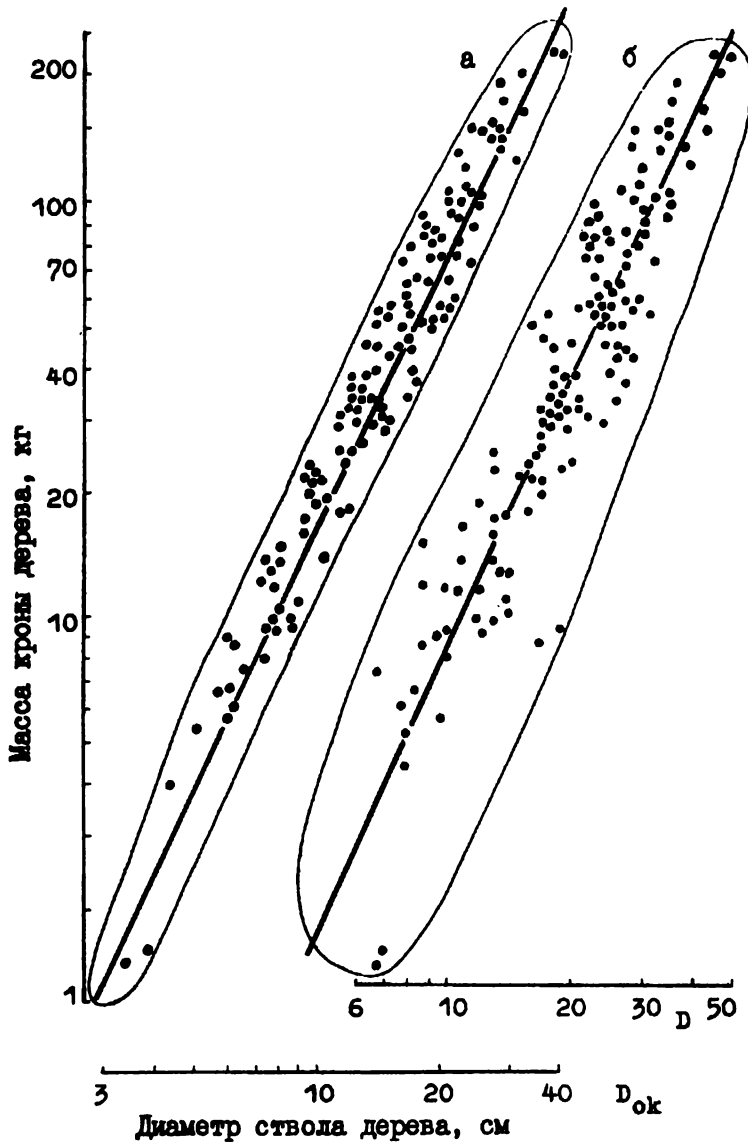


Рис. 5. Зависимость массы кроны в свежем состоянии от диаметра ствола дерева у основания кроны (а) и на высоте груди (б)

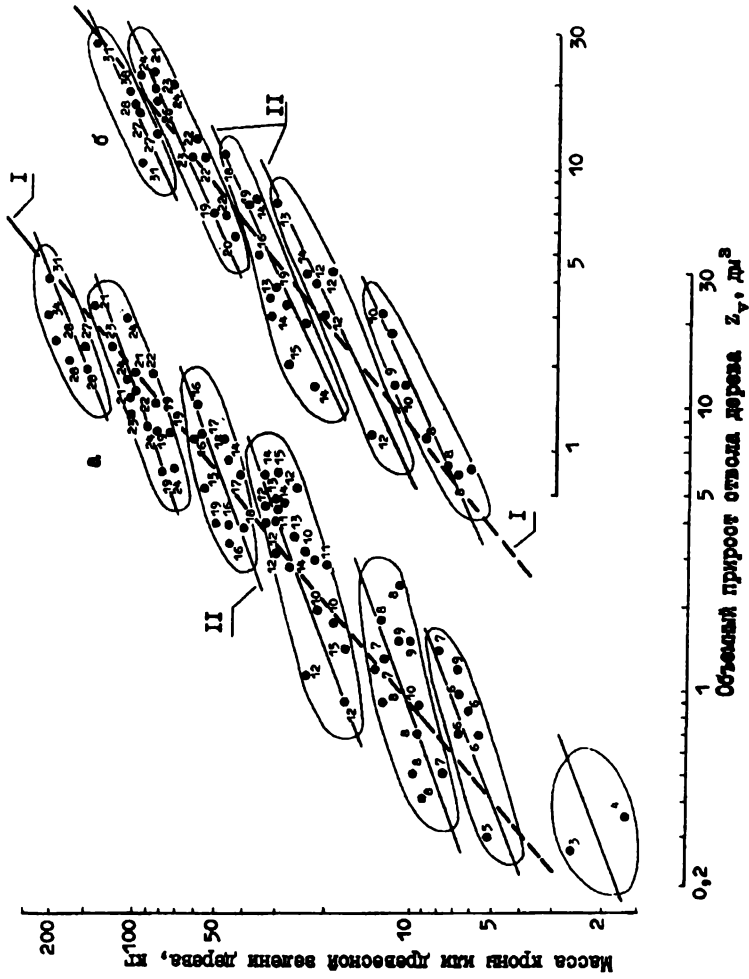


Рис. 6. Зависимость массы кроны (а) и древесной зелени (б) в свежем состоянии от объемного прироста и диаметра ствола у основания кроны; I — линии регрессий (17), II — линии регрессий (20). Цифрами обозначен диаметр $D_{ок}$, см

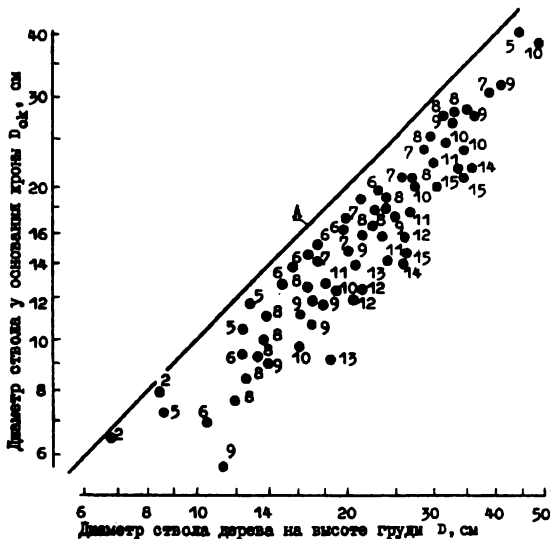


Рис. 7. Зависимость диаметра ствола у основания кроны от диаметра на высоте груди и расстояния h ; А — линия равенства диаметров D и $D_{ок}$. Цифрами обозначено расстояние h (м) от основания кроны до основания ствола

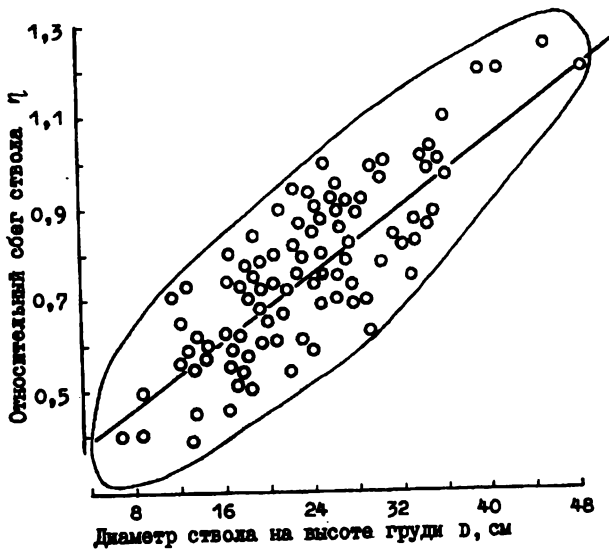


Рис. 8. Зависимость относительного сбега бессучковой части ствола от диаметра на высоте груди

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции и корреляционные отношения
между диаметром ствола, см, и объемом ДЗ дерева,
скл. м³, по классам бонитета**

Класс бонитета	Коэффициент корреляции	Корреляционное отношение	Мера линейности
I	0,811	0,849	0,063
II	0,871	0,884	0,005
III	0,812	0,825	0,022
IV	0,892	0,929	0,067

дает в итоге четырехходовую таблицу. Таким образом, наращивание входов в таблицу осуществляется по четырем этапам. Соответственно этим этапам мы последовательно сокращали размерность массива исходных данных с целью подбора структуры четырехфакторной регрессионной модели, адекватной таблице названных авторов.

На первом этапе рассчитаны константы уравнения (1) по каждому одновходовому блоку таблицы, общее количество которых n равно 5 градаций полноты \times 6 классов возраста \times 5 классов бонитета = 150.

На втором этапе вначале выполнен анализ связи полученных констант a_0 и a_1 с полнотой в пределах каждого класса возраста и бонитета и установлено, что существует четкая линейная связь (рис. 1,А)

$$a_0 = b_0 + b_1 S, \quad (2)$$

где S — относительная полнота древостоя. Характер связи один и тот же по всем возрастам и бонитетам, в то же время соотношение $a_1 = f(S)$ (рис. 1,Б) не достоверно, и величина a_1 не зависит от полноты. Поэтому она рассчитана как средняя для каждого двухходового блока таблицы, и по этим же блокам аппроксимированы уравнения (2), общее количество m которых равно 6 классов возраста \times 5 классов бонитета = 30. Путем подстановки уравнений (2) в уравнение (1) получили 30 уравнений вида

$$\ln P_{дз} = b_0 + b_1 S + a_1 \ln D, \quad (3)$$

каждое из которых аппроксимирует один двухходовый блок таблицы. Результаты расчетов второго этапа, т. е. определения величин констант в уравнениях (3), сведены в табл. 4, где все цифровые значения для большей компактности и наглядности округлены на один порядок. Поскольку модельные деревья объединялись Е. А. Ефимовичем и К. Е. Никитиным в классы бонитета по признаку равенства их высот независимо от диаметра D и полноты, то в табл. 4 для каждого двухходового блока занесены значения высот H , м, которые мы получили по бонитетной шкале М. М. Орлова, исходя из соотношения возраста и номера класса бонитета.

Таблица 4

Результаты определения констант уравнений (3) и высот деревьев H , м, по двухфакторным блокам

Класс бонитета	Показатели	Возраст дерева, лет					
		50	70	90	110	130	150
I	b_0	-0,06	0	0,10	0,16	0,13	0,10
	b_1	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,2	-1,3
	a_1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	H	19	24	27	30	31	32
II	b_0	-0,29	-0,29	-0,23	-0,10	-0,10	-0,34
	b_1	-1,3	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,2
	a_1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	H	16	20	24	26	27	28
III	b_0	-0,56	-0,53	-0,48	-0,40	-0,50	-0,71
	b_1	-1,4	-1,2	-1,3	-1,5	-1,5	-1,5
	a_1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
	H	13	17	20	22	23	24
IV	b_0	-1,21	-1,22	-1,20	-1,25	-1,30	-1,61
	b_1	-1,0	-0,8	-0,9	-0,8	-1,2	-0,8
	a_1	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
	H	10	13	16	19	20	21
V	b_0	-1,55	-1,46	-1,52	-1,59	-2,00	-2,00
	b_1	-1,5	-1,8	-1,7	-1,6	-1,5	-1,6
	a_1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
	H	7	10	13	15	16	16

На третьем этапе проанализирована связь констант уравнения (3) с третьим фактором — классом бонитета. Однако, чтобы обеспечить возможность стыковки искомой модели с любой бонитетной шкалой или шкалой разрядов высот, эти константы скоррелированы не с классом бонитета, а с высотой дерева H . Линеаризованные результаты такой модификации для констант b_0 и a_1 представлены на рис. 2, А, Б. Поскольку связь константы b_1 с высотой H отсутствует (рис 2, В), то величина b_1 рассчитана как средняя для каждого трехфакторного блока. По этим же блокам аппроксимированы уравнения

$$b_0 = c_0 + c_1 \ln H, \quad (4)$$

$$a_1 = d_0 + d_1/H, \quad (5)$$

каждое в шестикратной повторности (по числу классов возраста).

Путем подстановки уравнений (4) и (5) в уравнение (3) получено шесть уравнений вида

$$\ln P_{дз} = c_0 + c_1 \ln H + b_1 S + d_0 \ln D + d_1 (\ln D)/H, \quad (6)$$

каждое из которых аппроксимирует один трехходовый блок таблицы. Результаты расчетов третьего этапа, т. е. определения величин констант в уравнениях (6), сведены в табл. 5.

На четвертом этапе проанализирована связь констант уравнений (6) с

Таблица 5

**Результаты расчета констант уравнений (6)
по трехфакторным блокам**

A, лет	Константы				
	c_0	c_1	d_0	d_1	b_1
50	-4,67	1,57	1,37	2,82	-1,29
70	-5,72	1,81	1,31	4,66	-1,26
90	-7,34	2,24	1,26	6,70	-1,27
110	-8,52	2,56	1,28	7,02	-1,29
130	-10,54	3,13	1,17	10,27	-1,34
150	-10,71	3,10	1,20	9,59	-1,28

четвертым фактором — возрастом, которая имеет линейный характер в полулогарифмических координатах (рис. 3). Получены уравнения

$$c_0 = 19,106 - 5,9523 \ln A, \quad (7)$$

$$c_1 = 4,6290 + 1,5486 \ln A, \quad (8)$$

$$d_0 = 2,0065 - 0,1618 \ln A, \quad (9)$$

$$d_1 = -23,6521 + 6,7173 \ln A, \quad (10)$$

с коэффициентами детерминации 0,9 и выше.

Подставив уравнения (7)-(10) и значение $b_1 = -1,29$ как среднее по возрастам из табл. 5 в уравнение (6), получаем компактную итоговую регрессионную модель, представляющую аналитическое выражение таблицы ДЗ пихты, которая в работе Е. А. Ефимовича и К. Е. Никитина (1934) занимает 15 страниц:

$$\begin{aligned} \ln P_{\text{дз}} = & 19,106 \quad 5,9523 \ln A \quad 4,6290 \ln H \quad 1,2900 S + 2,0065 \ln D \\ & - 0,1618 \ln A \ln D + 1,5486 \ln A \ln H \quad 23,6521 (\ln D)/H + \\ & + 6,7173 (\ln A \ln D)/H \end{aligned} \quad (11)$$

Чтобы получить подтверждение статистической значимости всех констант уравнения (11), а также величину коэффициента детерминации, весь цифровой массив таблицы ДЗ обработан по программе многомерного регрессионного анализа MRAK, согласно структуре модели (11).

Получена модель

$$\begin{aligned} \ln P_{\text{дз}} = & 17,7231 \quad 6,0001 \ln A \quad 3,9504 \ln H \quad 1,3732 S + 2,2942 \ln D - \\ & - 0,2234 \ln A \ln D + 1,5006 \ln A \ln H \quad 29,9018 (\ln D)/H + \\ & + 8,4862 (\ln A \ln D)/H; R^2 = 0,976. \end{aligned} \quad (12)$$

Константы приводимых в работе уравнений значимы на уровне t_{05} и выше.

Для подзоны южной тайги в пределах Среднего Урала и Предуралья характерны высокопроизводительные елово-пихтовые и пихтово-еловые насаждения, сформировавшиеся на хорошо и достаточно дренированных легкосуглинистых дерново-подзолистых почвах. Преобладают насаждения с полнотой 0,7-1,0, с долей пихты в составе 4-10 единиц и древесным запасом 300-350, реже 400 м³/га (Колесников, 1969).

Наши исследования массы крон и ДЗ выполнены в 49 квартале Уваловского лесничества Учебно-опытного лесхоза УГЛТА в разновозрастном сложном насаждении с полнотой 0,8 и составом 5ПЗЕ1С1Б. Второй ярус пихты составляет 10% запаса всего древостоя. Масса крон $P_{\text{кр}}$ и ДЗ $P_{\text{дз}}$ определена в свежесрубленном состоянии путем взвешивания после рубки дерева. По 2-метровым отрезкам ствола определяли объем ствола $V_{\text{ств}}$ в коре и без коры, объемный Z_v и радиальный на высоте груди Z_r годовичные приросты за последние 10 лет, измеряли высоту дерева H , диаметры на высоте груди D и у основания кроны $D_{\text{ок}}$, по числу годовичных колец на пне определяли возраст A . Замеряли также диаметр $D_{\text{кр}}$ и длину кроны $L_{\text{кр}}$ (табл. 6).

Для выявления влияния на массу ДЗ пихты принадлежности к горноалтайской либо среднеуральской популяциям цифровые массивы таблицы Е. А. Ефимовича и К. Е. Никитина и табл. 6 были закодированы бинарными фиктивными переменными (Дрейпер, Смит, 1973). Совмещенный по двум регионам массив был обработан по программе многомерного регрессионного анализа по модели (12), модифицированной и приведенной к виду

$$\ln P = a_0 + a_1 x + a_2 \ln A + a_3 \ln H + \dots + a_9 (\ln A \ln D)/H, \quad (13)$$

где x — код региона (для Урала — 1, для Алтая — 2). Значимость константы a_1 составила $t = 11,8$, что значительно выше $t_{05} = 2,0$. Протабулировав

Таблица 6

**Таксационные и фитометрические показатели
модельных деревьев пихты**

А, лет	D, см	D _{ок} , см	H, м	D _{кр} , м	L _{кр} , м	V _{ств} , дм ³		Годичный прирост		P _{кр} , кг	P _{дз} , кг
						в коре	без коры	Z, мм	Z _v , дм ³		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
110	13,8	9,0	16,0	2,2	7,2	117	102	0,25	1,5	11,0	—
83	11,4	5,7	13,8	1,5	4,6	67	57	0,30	0,97	6,7	—
126	24,3	18,7	23,7	2,6	13,0	547	479	0,50	7,2	52,8	—
116	18,1	15,7	15,7	2,8	9,6	234	202	0,75	3,8	46,4	—
135	27,3	21,1	21,9	4,1	13,8	601	530	1,0	10,6	108,1	—
—	24,1	18,3	19,5	2,2	12,4	417	352	0,85	7,4	53,0	—
73	7,8	6,2	8,7	3,2	5,6	23	18	0,6	0,85	6,1	—
105	16,1	13,8	18,7	2,0	12,4	209	118	0,85	4,9	52,4	32,7
—	21,2	14,1	16,9	2,1	9,1	265	225	1,25	4,4	33,6	—
120	24,0	19,4	22,2	3,6	14,7	456	401	1,0	9,9	89,3	—
103	13,9	9,7	17,7	1,1	9,4	128	106	0,2	0,88	9,4	6,1
108	24,6	19,2	22,6	4,2	13,5	492	439	0,25	3,8	51,2	30,9
116	33,9	22,4	28,5	3,7	13,8	1178	1029	0,55	10,7	96,4	56,7
111	24,5	18,5	21,2	3,9	13,4	—	—	0,8	7,5	66,3	39,6
—	13,4	7,6	16,9	1,4	6,3	110	92	0,2	0,9	13,0	7,5
111	25,6	14,2	23,0	2,7	9,1	553	489	0,2	1,7	33,7	23,2
125	35,0	23,6	26,3	3,0	14,3	1185	1049	0,55	11,8	107,1	53,5
60	10,1	6,0	10,1	2,5	3,5	46	37	0,2	—	11,9	6,1
104	22,5	17,6	20,5	5,1	13,2	372	335	1,4	12,1	96,5	—
100	8,7	7,2	10,1	2,1	5,1	31	28	0,8	1,3	12,4	—
—	37,5	22,0	26,9	4,5	13,6	1187	1049	0,4	—	137,6	—
97	16,5	11,5	18,1	1,7	8,7	201	176	0,4	5,2	25,2	—
148	35,2	20,6	25,7	3,7	11,0	1059	914	0,85	12,9	103,2	—
102	30,4	22,7	23,3	3,9	12,2	863	776	1,15	15,9	124,2	—
80	13,9	8,0	12,8	1,8	5,5	90	79	0,75	2,4	10,5	—
115	20,8	14,2	21,5	2,7	10,0	365	324	0,7	5,8	34,2	—
—	7,0	3,9	10,0	1,2	4,5	18	14	0,3	0,36	1,6	—
96	16,9	12,5	18,2	2,8	9,6	206	185	0,75	4,6	29,9	—
101	21,6	16,3	18,7	3,0	11,5	310	279	1,35	6,9	80,7	—
85	10,6	7,1	13,0	2,4	7,0	49	41	0,45	1,2	13,8	—
137	31,7	24,4	27,9	2,8	17,9	979	836	0,35	5,9	73,5	—
92	17,8	12,1	21,2	3,5	8,9	269	252	0,6	—	36,6	21,3
112	26,4	21,0	22,3	4,5	15,0	532	489	1,6	21,9	150,5	90,5
132	33,3	28,0	27,3	4,6	18,9	1147	1043	1,0	—	138,5	80,7
142	29,6	22,0	23,1	4,5	14,0	698	642	1,05	12,6	96,1	57,8
119	34,3	24,0	25,7	4,0	14,5	1035	951	1,6	20,5	—	110,9
125	36,0	28,4	27,8	4,5	18,7	1269	1132	1,1	16,4	199,0	103,0
39	6,8	6,6	7,0	1,7	5,2	15	13	0,7	0,5	7,6	—
—	9,6	4,3	9,5	1,8	3,3	36	26	0,15	—	4,0	—
—	6,9	3,4	8,7	1,5	1,6	14	11	0,1	—	1,5	—

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
95	20,5	11,7	20,8	2,1	8,5	313	277	0,2	—	24,1	—
106	26,0	16,3	22,6	3,5	11,1	523	461	0,3	—	51,4	—
106	29,5	25,3	25,0	3,2	16,9	877	763	0,6	—	100	—
—	27,8	23,5	21,5	4,3	14,5	—	—	2,9	21,5	157	98
113	39,0	31,3	29,6	4,0	22,2	—	—	0,7	—	128	92
130	29,4	23,7	24,1	3,7	17,0	—	—	2,6	19,9	112	76
—	28,5	22,7	26,2	3,2	16,0	—	—	0,9	11,0	102	65
—	17,9	11,5	19,6	3,0	9,6	—	—	0,75	4,0	31	23
—	33,8	26,8	27,0	4,0	18,5	—	—	1,05	16,0	159	102
—	42,8	26,3	31,2	4,0	14,2	—	—	0,95	19,0	154	90
117	32,8	26,6	26,7	4,5	18,0	—	—	1,6	21,0	151	101
—	17,1	12,2	14,4	3,1	6,6	—	—	0,75	3,0	32	22
121	32,0	24,9	24,5	5,0	14,7	—	—	0,85	—	105	62
115	26,1	21,3	23,3	3,0	15,1	—	—	1,15	—	66	38
100	17,5	14,4	20,2	2,2	13,2	—	—	0,3	3,0	55	34
110	20,5	15,3	18,8	3,5	10,4	—	—	0,45	5,0	58	38
112	13,2	11,9	14,6	2,5	10,0	—	—	0,5	1,1	25	15
—	12,9	9,3	13,5	2,7	7,4	—	—	0,6	1,7	16	12
70	8,6	8,0	7,7	3,0	5,2	—	—	0,7	0,84	15	7
—	27,3	22,0	24,5	3,0	16,2	—	—	0,4	6,3	60	40
142	40,7	31,5	29,4	4,0	20,2	—	—	0,6	—	171	103
—	10,1	7,4	13,5	2,1	6,8	—	—	0,7	1,4	8	5
140	23,0	19,0	18,5	3,6	12,2	—	—	1,05	7,9	77	53
—	45,9	31,0	30,5	4,5	16,2	—	—	1,05	27,4	206	146
—	17,0	11,3	16,6	2,7	6,6	—	—	0,85	4,4	30	19
145	21,8	16,4	21,7	2,5	13,1	—	—	1,05	—	58	33
120	17,5	12,1	17,2	2,8	8,5	—	—	0,55	2,9	34	23
143	33,5	27,5	24,8	4,5	16,6	—	—	0,7	13,6	156	85
—	29,5	17,6	24,5	5,3	9,8	—	—	0,95	12,7	95	64
92	11,8	10,0	8,2	2,8	5,2	—	—	1,1	1,7	19	11
—	11,6	7,7	13,4	2,7	5,1	—	—	0,3	1,1	12	9
—	22,1	14,5	22,9	1,2	11,1	—	—	0,4	4,2	31	24
140	48,7	38,2	33,3	5,5	23,5	—	—	0,7	17,9	231	112
112	12,6	10,5	13,7	2,1	8,7	—	—	0,3	—	14	10
110	21,5	15,7	21,5	2,2	11,5	—	—	0,5	6,9	78	46
126	22,5	12,5	16,5	3,5	4,6	—	—	0,25	3,5	57	33
124	22,2	19,0	19,8	2,8	12,6	—	—	0,8	5,8	81	43
109	14,5	11,0	15,5	2,3	8,2	—	—	0,6	3,3	—	28
115	21,2	14,9	21,5	3,1	9,9	—	—	0,8	7,2	—	53
135	27,0	18,2	23,8	2,1	11,4	—	—	1,0	11,3	88	49
129	24,0	14,1	21,2	2,1	8,3	—	—	1,0	7,9	56	38
110	27,5	20,8	23,2	2,9	12,8	—	—	1,1	17,4	—	90
—	16,0	9,5	18,2	2,1	7,4	—	—	0,7	3,1	24	13
—	15,6	11,6	17,1	3,1	9,6	—	—	0,5	2,6	18	12
106	17,3	13,2	18,7	2,8	10,7	—	—	1,0	7,6	48	32
—	17,0	12,0	15,7	3,0	7,2	—	—	0,5	2,8	32	24

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
125	23,4	16,4	19,6	5,0	10,8	369	339	1,0	9,9	60,7	—
—	27,3	17,3	21,7	2,6	10,6	569	503	0,85	11,2	45,2	—
95	12,3	7,9	14,4	1,9	6,3	84	75	0,2	0,7	9,3	—
—	18,1	13,6	17,9	2,4	10,4	—	—	—	—	39,8	—
—	29,2	22,0	23,8	4,1	14,7	730	655	0,55	—	60,3	—
—	14,7	9,7	14,8	3,7	7,0	125	110	0,3	1,9	21,5	—
100	23,5	13,9	21,0	3,9	8,6	429	385	0,5	6,4	45,6	—
85	16,6	10,6	16,7	2,5	7,9	173	149	0,3	2,8	19,4	—
90	12,7	8,6	15,6	1,3	7,3	100	90	0,3	1,5	9,9	—
—	13,5	7,6	15,3	2,2	5,9	100	89	0,4	1,8	12,8	—
104	23,6	19,3	20,6	3,8	12,3	457	411	0,8	7,9	88	—
100	18,8	9,1	18,3	2,5	5,5	269	252	0,35	4,9	22,6	—
—	16,0	9,5	18,7	2,0	7,2	177	160	0,4	2,9	22,4	—
87	18,1	12,0	18,8	2,4	9,6	213	187	0,5	3,9	33,5	—
—	19,0	12,7	16,8	3,0	7,7	221	196	0,4	3,2	35,0	—
—	26,5	21,4	22,9	3,3	15,0	599	538	0,4	—	42,2	—
40	8,6	6,1	7,5	2,0	3,3	25	17	0,3	0,5	8,6	—
—	17,0	13,3	17,3	2,5	10,5	189	173	0,6	3,5	26,4	—
—	30,2	24,2	22,7	3,0	16,2	718	632	0,6	8,2	90,1	—
—	24,0	15,4	20,3	2,1	10,5	426	367	0,5	5,9	30,4	—
128	16,5	10,1	17,0	2,2	7,1	172	145	0,3	4,6	21,6	—
116	24,4	16,6	20,9	3,3	10,8	468	412	0,8	7,9	57	—
114	16,9	14,6	16,9	2,4	11,4	197	172	0,7	2,7	27,7	—
107	28,1	20,3	22,3	2,7	12,3	636	562	0,45	5,4	42,8	—
90	25,0	17,4	22,3	3,1	13,5	445	392	0,65	5,8	39,8	—
—	11,6	7,9	8,6	3,3	4,5	42	36	0,3	0,5	10,3	—
130	26,7	20,0	22,3	3,9	13,1	567	501	1,1	11,9	77,6	—
85	19,5	13,8	17,0	2,4	9,7	226	200	0,55	4,5	29,0	—
57	10,1	7,5	8,1	2,7	4,5	35	31	0,2	0,4	9,4	—
—	8,0	—	8,9	1,2	3,8	17	15	0,45	—	4,5	—
—	9,5	5,8	10,0	2,0	3,5	38	33	0,3	0,6	9,1	—
114	25,0	16,5	21,9	2,8	9,2	564	493	0,5	7,7	63,0	—
98	19,6	16,8	20,7	2,2	14,8	—	—	—	—	47,3	—
143	45,3	40,8	28,7	5,6	23,8	1769	1580	1,85	—	233	—
68	8,2	5,9	8,6	2,4	4,1	25	21	0,3	0,7	6,8	—
86	8,0	5,0	6,9	2,3	2,6	19	17	0,2	0,3	5,3	—
78	9,6	6,0	8,6	1,9	3,3	32	29	0,35	0,7	5,8	—
104	13,9	12,2	13,3	1,5	10,5	89	79	0,4	0,9	17,5	—
135	30,7	21,4	24,0	2,3	13,4	788	668	0,25	4,8	55,1	—
109	27,0	18,3	22,7	2,6	11,1	623	543	0,3	3,7	37,1	—
—	27,8	20,4	23,9	3,0	13,9	662	589	0,75	9,1	57,5	—
119	18,8	12,0	19,5	2,1	9,1	256	227	0,95	4,5	39,0	—
—	18,6	8,8	15,1	1,5	7,0	97	86	0,6	2,4	9,4	—
118	20,3	17,4	22,2	1,4	16,3	343	317	0,45	4,8	33,3	—
93	18,8	13,4	18,6	2,3	10,2	244	213	0,9	4,6	38,7	—
118	25,8	15,1	25,4	4,0	10,0	598	523	0,25	5,6	44,3	29,2
62	12,6	9,4	13,3	2,0	7,7	82	73	0,35	0,6	23,0	—

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
113	35,2	28,0	23,0	4,0	14,9	1023	909	0,85	14,0	179,8	—
116	22,8	17,4	20,9	2,3	12,5	417	362	0,6	7,3	68,9	—
104	28,5	22,0	25,0	2,9	16,6	490	460	0,8	—	74,5	—
—	16,6	—	14,2	2,0	3,6	129	121	0,5	—	8,9	6,6
81	13,3	9,3	16,7	2,3	8,3	118	105	0,35	1,7	17,5	—
115	29,2	22,2	25,0	2,3	13,8	832	761	0,85	12,1	81,0	—

уравнение (13) по заданным значениям $D = 20$ см, $H = 20$ м, $A = 100$ лет, $S = 0,7$, получаем для ДЗ значения 85 и 140 кг. Иными словами, при равных диаметре, высоте, возрасте дерева и полноте древостоя масса ДЗ больше у пихты уральской популяции.

Модель (12) может быть состыкована с любой объемной таблицей с использованием вспомогательной шкалы разрядов высот. Путем табулирования модели (12) по значениям H и D , позаимствованным из шкалы разрядов высот для пихтарников горного Алтая (Сортиментные и товарные таблицы ..., 1987) при фиксированных значениях $A = 100$ лет и $S = 0,7$ получена таблица выхода ДЗ пихты (табл. 7). Для составления аналогичной таблицы для горного Урала по массиву экспериментальных данных (табл. 6) получена регрессионная модель

$$\ln P_{\text{дз}} = - 6,5075 + 5,0690 \ln D - 0,6034 \ln H \ln D; R^2 = 0,887, \quad (14)$$

табулированием которой по значениям D и H — входов в объемную таблицу для пихты горного Урала (Лесотаксационный справочник..., 1991) — получена таблица выхода ДЗ (табл. 8).

В предыдущей работе (Петерсон, Чернов, 1979) было выведено трехфакторное уравнение для массы ДЗ ($P_{\text{дз}}$, кг)

$$P_{\text{дз}} = -21,4 - 3,7 V + 4,5 D - 1,8 H; R^2 = 0,792, \quad (15)$$

где V — объем ствола, м³. Уравнение (15) учитывает основные таксационные характеристики дерева, однако включает в качестве одного из факторов объем ствола, который нельзя точно определить без рубки дерева.

С учетом результатов, изложенных в работе «Оценка массы крон сосны и ели Среднего Урала на основе псевдоинвариантных взаимосвязей» настоящего сборника, мы попытались построить регрессионные модели для оценки массы крон и ДЗ пихты Урала, исходя из физиологически обусловленных закономерностей.

Известно, что масса (поверхность) листы дерева функционально связана с двумя потоками влаги — восходящим ксилемным и нисходящим флоэмным. Впервые они были обнаружены в конце XVII века, за 100 лет до открытия явления фотосинтеза, оригинальными опытами М. Мальпиги (Курсанов, 1976). Названные два аспекта структурно-функциональной ор-

Таблица 7

Выход ДЗ пихты по разрядам высот в горном Алтае

D, см.	Разряды высот							
	I		II		III		IV	
	H, м	P _{дз} , кг	H, м	P _{дз} , кг	H, м	P _{дз} , кг	H, м	P _{дз} , кг
8	9,9	1,4	9,0	1,3	7,5	1,2	6,7	1,1
12	13,7	4,8	12,1	4,1	10,5	3,6	9,3	3,3
16	16,9	10,9	14,9	9,2	13,0	7,9	11,5	7,1
20	19,6	20,2	17,2	16,7	15,1	14,2	13,3	12,5
24	21,8	32,8	19,2	27,0	16,8	22,6	14,8	19,6
28	24,0	49,7	21,1	40,4	18,5	33,7	16,3	28,8
32	25,5	68,5	22,4	55,7	19,7	46,2	17,3	39,4
36	27,0	91,5	23,7	73,7	20,8	61,0	18,3	51,6
40	28,3	118	24,9	94,8	21,8	77,8	19,2	65,7
44	29,6	148	26,0	118	22,7	96,5	19,8	80,7
48	30,5	179	26,8	144	23,5	117	20,6	98,1
52	31,5	215	27,6	171	24,1	139	21,3	117
56	32,3	253	28,4	202	24,8	163	21,7	136

ганизации дерева предполагают сбалансированность массы листвы с площадью сечения водопроводящей заболони (теория пайп-модели) и с приростом объема ствола (теория распределения ассимилятов).

Первый из них обсуждался нами в предыдущей статье, а второй предполагает взаимную обусловленность фотосинтезирующей массы с интенсивностью отложения продуктов фотосинтеза в стволе (т. е. связь массы листвы P_x с объемным приростом Z_v , впервые отмеченную в прошлом столетии Р. Гартигом (цит. по: Melzer, 1962). В 20–30-х годах получены первые количественные характеристики названной связи Г Бургером (Burger, 1929), И. Буссе (цит. по: Melzer, 1962) и А. С. Яблоковым (1934).

Можно предположить, что существует идеальная физиологически обусловленная взаимосвязь массы кроны с неким таксационным показателем (одним или несколькими) дерева. В зависимости от выбора названного показателя можно проследить несколько уровней приближения к этому идеалу, или уровней точности оценки массы кроны.

Первое приближение — зависимость (1) с диаметром D , опосредующим широкий диапазон различных аспектов — физиологического, прочностного, ценотического, возрастного и т. д. Коэффициенты детерминации R^2 уравнений (1), аппроксимированных по массиву наших экспериментальных данных (см. табл. 6), составили для массы кроны ($P_{кр}$) 0,869 и для массы ДЗ ($P_{дз}$) 0,858 (табл. 9).

Таблица 8

Выход ДЗ пихты по разрядам высот в горном Урале

D, см	Разряды высот					
	II		III		IV	
	H, м	P _{дз} , кг	H, м	P _{дз} , кг	H, м	P _{дз} , кг
8	9,2	3,5	8,3	4,0	7,4	4,6
12	13,0	9,4	11,7	11,1	10,4	13,2
16	16,3	17,8	14,7	21,2	13,0	26,0
20	19,1	28,5	17,2	34,4	15,3	42,5
24	21,6	41,0	19,4	50,4	17,3	62,8
28	23,5	56,8	21,2	69,9	18,9	88,1
32	25,1	75,6	22,5	95,0	20,1	120
36	26,1	100	23,5	125	20,9	162
40	26,8	131	24,1	166	21,5	214
44	27,0	173	24,3	220	—	—
48	27,0	226	—	—	—	—

Второе приближение опосредует один из физиологических аспектов структурно-функциональной организации, например, ксилемный или флоэмный транспорт.

Взаимосвязь массы фракций кроны (P_i, кг) с диаметром ствола у ее основания (D_{ок}, см)

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D_{ок} \quad (16)$$

характеризуется лучшими показателями R² в сравнении с (1): 0,888 > 0,869 для всей кроны и 0,898 > 0,869 для ДЗ (табл. 9, рис. 4 и 5).

Несколько лучшими R² для массы ДЗ характеризуется по сравнению с (1) и уравнение

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln Z_v \quad (17)$$

где Z_v — годичный объемный прирост ствола, дм³, средний за последние 10 лет. Уравнения (16) и (17) имеют физиологическую основу и близки по точности, если оценивать их в среднем по P_{кр} и P_{дз}.

Третье приближение связано с переходом к многофакторной модели. Парная зависимость

Таблица 9

Характеристика уравнений связи массы кроны с различными дендрометрическими показателями

Независимая переменная	Фракция фитомассы	Номер уравнения	Константы			R ²	SE, %
			a ₀	a ₁	a ₂		
D	P _{кр}	1	-2,7396	2,1307	—	0,869	44,7
	P _{дз}	1	-2,3760	1,9161	—	0,858	34,0
Z	P _{кр}	18	4,2499	1,1272	—	0,401	99,5
	P _{дз}	18	3,8810	0,7991	—	0,302	74,0
Z _v	P _{кр}	17	2,3892	0,8638	—	0,864	38,8
	P _{дз}	17	2,1207	0,8288	—	0,904	23,0
D _{ок}	P _{кр}	16	-1,7442	2,0405	—	0,888	41,5
	P _{дз}	16	-1,6259	1,8613	—	0,898	28,4
D, Z	P _{кр}	19	-1,7009	1,8634	0,4261	0,913	33,3
	P _{дз}	19а	-1,8106	1,7752	0,1173	0,914	25,5
D _{ок} , Z _v	P _{кр}	20	-0,1203	1,2118	0,3911	0,918	32,9
	P _{дз}	20	0,2213	0,8964	0,4867	0,940	20,4

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln Z \quad (18)$$

характеризуется довольно низкими показателями R² (0,401 и 0,302), где Z — радиальный прирост ствола на высоте груди, мм, средний за последние 10 лет. Однако, будучи включенным в (1), радиальный прирост Z существенно повышает точность модели для массы кроны

$$\ln P_{кр} = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln Z; \quad (19)$$

и для массы ДЗ

$$\ln P_{дз} = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln D \ln Z \quad (19a)$$

в сравнении с (1): соответственно 0,913 > 0,869 и 0,914 > 0,858. Факторы D и Z в совокупности образуют прирост площади сечения ствола $Zg = \pi DZ$, однако каждый из них изменяется с возрастом и условиям произрастания независимо один от другого (Усольцев, 1993). Ранее было показано, что в пределах исследуемого региона, например, в сосняках Аман-Карагай-

ского бора (Усольцев, 1988) или Среднего Урала (Усольцев и др., 1993 а, б) они дают устойчивые оценки массы крон. Объединение их в интегральный показатель снижает точность оценок, и это видно из сравнения уравнений (17) и (19): казалось бы связь $P \sim Z_v$ должна быть выше, чем $P \sim Z_0 = \pi DZ$, поскольку Z_v , в отличие от Z_0 , учитывает еще и прирост ствола в высоту. Однако фактически оказалось наоборот.

В качестве другого варианта третьего приближения можно рассмотреть уравнение

$$P_1 = a_0 + a_1 \ln D_{ок} + a_2 \ln Z_v \quad (20)$$

описывающее эффект ксилемного и флоэмного транспорта одновременно. На рис. 4, а дана графическая интерпретация этой взаимосвязи, где показано, что при одном и том же значении $D_{ок}$ масса ДЗ изменяется пропорционально величине Z_v . Иная интерпретация уравнения (20) приведена на рис. 6, где показаны общие поля распределения экспериментальных данных массы кроны и ДЗ по величине прироста Z_v , соответствующие уравнению (17), и стратификация этих полей посредством введения в уравнения (17) дополнительного фактора $D_{ок}$. Снижение остаточного варьирования показателей фитомассы относительно линий регрессии во втором случае очевидно.

Однако получение показателя объемного прироста дерева по трудоемкости сравнимо с непосредственным взвешиванием кроны и ДЗ. Поэтому в окончательном варианте третье приближение моделей представлено уравнениями

$$\begin{aligned} \ln P_{кр} = & -1,3854 - 1,9348 \ln D_{ок} - 0,9210 \ln D_{ок} \ln Z + 0,9214 \ln D \ln Z + \\ & + 0,6733 (\ln D_{ок})^2 \ln Z - 0,6115 \ln D_{ок} \ln D \ln Z; \end{aligned} \quad (21)$$

$R^2 = 0,946$; $SE = 24,8\%$;

$$\begin{aligned} \ln P_{дз} = & 5,2601 + 2,2680 \ln D_{ок} + 2,0373 \ln D - 0,4240 \ln D_{ок} \ln D + \\ & + 0,03004 \ln D_{ок} \ln D \ln Z; \end{aligned} \quad (21a)$$

$R^2 = 0,935$; $SE = 21,8\%$

при использовании которых показатели D и Z легко получить непосредственным измерением, а $D_{ок}$ — расчетом, изложенным ниже. Результаты табулирования уравнений (21) и (21а) показывают (табл. 10), что при одном и том же значении Z масса ДЗ пропорциональна $D_{ок}$.

Однако при стабильных значениях Z и $D_{ок}$ масса ДЗ пропорциональна еще и третьему фактору D . Можно попытаться интерпретировать модели (21) и (21а), исходя из особенностей функционирования зоны транзита влаги у кольцесосудистых пород (Иванов, Дубинин, 1992). Ксилемный и флоэмный транспорты дерева функционально взаимосвязаны, образуя единую гидродинамическую систему (Водный обмен..., 1989), замкнутую на массу хвои. На уровне древостоя общие закономерности возрастного изменения площади сечения зоны транзита влаги и годичного прироста площади сечения ствола имеют синхронный характер (Иванов, Дубинин,

Таблица 10

**Масса кроны (числитель) и древесной зелени (знаменатель)
в свежесрубленном состоянии, кг, в зависимости
от диаметров у основания кроны и на высоте груди
и радиального прироста (уравнения 21 и 21а)**

D, см	Радиальный прирост Z, мм							
	0,2	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
$D_{ок} = 4 \text{ см}$								
4	3,0/0,8	3,4/0,9	3,7/0,9	—	—	—	—	—
8	2,8/2,1	3,3/2,3	3,6/2,5	—	—	—	—	—
$D_{ок} = 12 \text{ см}$								
12	16/12	25/15	31/17	35/18	—	—	—	—
16	22/16	28/20	31/22	33/24	—	—	—	—
20	27/19	29/25	31/28	31/30	—	—	—	—
$D_{ок} = 20 \text{ см}$								
20	—	62/40	82/46	99/50	114/54	—	—	—
24	—	67/46	82/53	94/58	103/63	—	—	—
28	—	72/51	82/60	90/66	95/71	—	—	—
32	—	77/56	82/66	86/73	89/79	—	—	—
$D_{ок} = 28 \text{ см}$								
28	—	111/67	158/80	199/89	236/97	271/104	305/110	336/115
32	—	120/73	158/87	189/97	217/106	241/114	264/120	285/127
36	—	128/78	158/93	181/105	200/115	218/124	233/131	247/138
40	—	136/82	158/100	174/113	187/124	198/133	208/142	217/150

1992). Однако на уровне отдельного дерева снижение прироста и отпад одних сопровождается увеличением прироста соседних деревьев. В более сухие периоды снижается приток ассимилятов по флоэме и соответственно прирост площади сечения ствола при одновременном возрастании площади сечения зоны транзита влаги.

Последнее явление может обусловить скачкообразный характер отмирания нижних мутовок. В результате при постоянном значении $D_{ок}$ масса хвой может быть тесно сопряжена с радиальным приростом за последние 10 лет. Напротив, при стабильном радиальном приросте и интенсивном отмирании нижних мутовок масса хвой будет связана с диаметром $D_{ок}$ вследствие сдвига последнего вверх по стволу. При постоянных значениях $D_{ок}$ и Z масса хвой увеличивается пропорционально второй составляю-

щей прироста Z_0 — величине диаметра D . Соответственно возрастает камбиальная поверхность, служащая для ассимилятов важной аттрагирующей зоной.

Ортогональность трех определяющих факторов D , Z и $D_{ок}$ может быть показана и с иной позиции. Факторы D и Z изменяются без какой-либо взаимной связи, определяя в совокупности величину прироста Z_0 и связанную с ним массу хвои. При постоянных значениях D и Z масса кроны зависит от проводящей способности зоны транзита влаги, которая связана с расстоянием от начала кроны, или с увеличением перепада между диаметрами D и $D_{ок}$, и следовательно изменяется пропорционально величине $D_{ок}$.

Поскольку непосредственный замер диаметра $D_{ок}$ затруднен, его значение можно установить расчетным путем (Козлов, Соколова, 1984). Анализ поля распределения экспериментальных данных для соотношения $D_{ок} \sim D$ (рис. 7), варьирующих в связи с расстоянием от основания кроны до основания ствола h , m , показывает, что при одном и том же значении D диаметр $D_{ок}$ тем меньше, чем больше расстояние h . Поскольку поле распределения в логарифмических координатах имеет линейный характер, рассчитано аллометрическое двухфакторное уравнение

$$\ln D_{ок} = -0,0394 + 1,1919 \ln D - 0,4025 \ln h; R^2 = 0,969. \quad (22)$$

Разность диаметров $(D - D_{ок})$ характеризует сбег бессучковой зоны ствола, который зависит от диаметра на высоте груди и величины h согласно уравнению

$$(D - D_{ок}) = -1,2412 + 0,4500 h + 0,01506 hD; R^2 = 0,894. \quad (23)$$

Решая его относительно $D_{ок}$, получаем

$$D_{ок} = 1,2412 + D - 0,4500h - 0,01506hD. \quad (24)$$

Если же величину абсолютного сбega $(D - D_{ок})$ разделить на расстояние между основанием кроны и высотой груди $(h - 1,3)$, то получим относительный сбег η бессучковой части ствола, который связан с диаметром D (рис. 8) уравнением

$$\eta = \frac{D - D_{ок}}{h - 1,3} = 0,3348 + 0,01847 D; R^2 = 0,650. \quad (25)$$

Решая его относительно $D_{ок}$, получаем

$$D_{ок} = 0,4352 + 1,0240 D - 0,3348 h - 0,0185 hD. \quad (26)$$

Выбрать из трех уравнений (22), (24) и (26) лучшее по коэффициенту детерминации невозможно, поскольку R^2 в этих уравнениях характеризует несравнимые величины, соответственно логарифм диаметра, разность

Таблица 11

Таблица для определения диаметра у основания кроны $D_{ок}$
по измеренным диаметру на высоте груди D
и расстоянию от основания ствола до основания кроны h

h, м	Диаметр D, см								
	8	12	16	20	24	28	36	44	52
2	7,6	—	—	—	—	—	—	—	—
3	7,2	—	—	—	—	—	—	—	—
4	6,7	10,5	—	—	—	—	—	—	—
5	6,2	9,9	13,7	—	—	—	—	—	—
6	—	9,4	13,0	16,7	20,3	24,0	—	—	—
8	—	8,3	11,8	15,3	18,8	22,3	29,3	36,3	43,3
10	—	—	10,5	13,9	17,2	20,6	27,3	34,0	40,7
12	—	—	—	12,5	15,7	18,9	25,3	31,7	38,1
14	—	—	—	11,0	14,1	17,2	23,3	29,4	35,5
16	—	—	—	—	—	15,5	21,3	27,1	32,9

диаметров и отношение этой разности к величине ($h - 1,3$). Поэтому был выполнен расчет стандартной ошибки SE, характеризующей расхождение между фактическими и расчетными значениями диаметра $D_{ок}$, согласно уравнениям (22), (24) и (26). Полученные значения SE составили соответственно 7,3; 5,1 и 5,1%. Аллометрическое уравнение (22) дает наибольшую ошибку, видимо, в результате смещения при логарифмировании. Уравнения (24) и (26), а также результаты их табулирования (табл. 11) можно использовать для расчета диаметра $D_{ок}$ по измеренным показателям D и h .

Таким образом, использование многомерного регрессионного анализа дает возможность компактного и адекватного описания многофакторной зависимости массы кроны от определяющих факторов. Однако при таком подходе необходим обширный экспериментальный материал по показателям массы крон. Использование биологически обусловленных взаимосвязей позволяет снизить трудоемкость построения многофакторных моделей и таблиц для оценки массы крон.

Библиографический список

- Водный обмен растений. М. Наука, 1989. С. 256.
 Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М. Статистика, 1973. 392 с.
 Ефимович Е. А., Никитин К. Е. Выход пихтовой лапки в лесах Алтая Казахстана и производство пихтового масла // Труды по лесному опытному делу (отчет). Семипалатинск: Казахская лесная опытная станция ВАСХНИЛ - ВНИЛАМИ, 1934. 77 с.

- Иванов А. И., Дубинин А. И. Площадь сечения заболони и площадь зоны транзита влаги в ней у сосны обыкновенной // Лесоведение, 1992. № 5. С. 28—37.
- Козлов М. В., Соколова И. В. Методика определения площади и массы листы березы // Лесоведение, 1984. № 6. С. 79—83.
- Колесников Б. П. Леса Свердловской области // Леса СССР, т. 4. М.: Наука, 1969. С. 64—124.
- Кохман Г. Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 211 с.
- Курсанов А. Л. Транспорт ассимилятов в растении. М.: Наука, 1976. 647 с.
- Лесотаксационный справочник для лесов Урала. М., 1991. 483 с.
- Петерсон О. А., Чернов Н. Н. Запасы коры и лапки пихты сибирской в южной тайге Среднего Урала // Растительные ресурсы, 1979. Т. XV. Вып. 2. С. 207—210.
- Сортиментные и товарные таблицы для лесов Казахстана. Часть 2. Алма-Ата: Кайнар, 1987. 227 с.
- Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985. 191 с.
- Усольцев В. А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, 1988. 253 с.
- Усольцев В. А. Применение инвариантных взаимосвязей при оценке массы крон деревьев: Методические указания для студентов-дипломников специальности 3112 и аспирантов. Екатеринбург: УЛТИ. 1993. 90 с.
- Усольцев В. А., Нагимов З. Я., Деменев В. В., Мельникова И. В. Методы и таблицы оценки надземной фитомассы деревьев // Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург: УЛТИ. 1993 а. Вып. 16. С. 90—110.
- Усольцев В. А., Тепикин С. В., Ваганов В. М. Структура надземной фитомассы деревьев в ельниках Среднего Урала // Там же, 1993 б. С. 110—129.
- Чернов Н. Н. Пихтовая древесная зелень // Леса Урала и хозяйство в них. Свердловск: Уральский ун-т, 1988. Вып. 14. С. 54—57.
- Яблоков А. С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослесбумиздат, 1934. 128 с.
- Burger H. Holz, Blattmenge und Zuwachs. 1. Mitteilung: Die Weymouthföhre // Mitt. Schweiz. Anstalt Forstl. Versuchswesen. 1929. Bd. 15. S. 243—292.
- Melzer E. W. Die stochastischen Beziehungen zwischen Spross — und Wurzelsystem des Baumes // Arch. Forstwesen. 1962. Bd. 11. N 7, S. 822—838.