

УДК 630*531

В.А. УСОЛЬЦЕВ, А.А. САЛЬНИКОВ, В.В. КИРИЛЛОВА

Сальников Александр Александрович родился в 1970 г., окончил в 1992 г. Уральскую государственную лесотехническую академию, ассистент кафедры лесной таксации и лесоустройства УГЛТА. Имеет 6 печатных работ в области оценки фитомассы лесов.



Кириллова Вера Витальевна родилась в 1970 г., окончила в 1992 г. Уральскую государственную лесотехническую академию, ассистент кафедры лесной таксации и лесоустройства УГЛТА. Имеет 4 печатные работы в области оценки фитомассы лесов.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ И ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАВИСИМОСТИ МАССЫ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ БЕРЕЗЫ И ОСИНЫ ОТ ДИАМЕТРА, ВЫСОТЫ И ВОЗРАСТА ДЕРЕВА*

С использованием метода блоковых «фиктивных» переменных исследованы зависимости массы древесной зелени от диаметра на высоте груди, высоты и возраста дерева. Выявлены два района произрастания березы и один – осины, для которых названные зависимости требуется рассчитывать отдельно.

* В работе участвовали аспиранты В.М.Ваганов и И.С.Сальникова.

Dependences of tree verdure biomass upon diameter at breast height, tree height and age are studied using block «dummy» variable method. Two location regions for birch and one region for aspen are revealed. Separate regressions are required referring to each of these regions.

В лесохозяйственной практике, в частности при отводе и материально-денежной оценке лесосек, лесоинвентаризации на основе перечислительной таксации и т.д., необходимы упрощенные регрессионные уравнения и таблицы массы крон, в том числе наиболее ценной их части – древесной зелени (облиственных побегов – ДЗ), составленные по образцу традиционных объемных (сортиментных) таблиц и зачастую совмещенные с ними [2, 8, 13, 16, 17, 20]. Входами таких уравнений и таблиц служат два основных показателя, определяющих объем дерева: высота и диаметр на высоте груди. Составление таблиц предваряется расчетом регрессионных уравнений различного вида. Они описывают парную связь массы крон с диаметром ствола для каждого разряда высоты [6] либо включают два показателя, когда наряду с диаметром в уравнение входит номер разряда высоты [16] или (что более часто) значение высоты дерева. В последнем случае обычно используется уравнение статической аллометрии, в котором высота и диаметр включаются либо раздельно [8, 13, 17, 20], либо в виде так называемого видового цилиндра (произведения квадрата диаметра на высоту дерева) [1, 3, 7]. Однако видовой цилиндр, изначально предназначенный для определения объема ствола [18], при оценке массы кроны у некоторых пород, в частности березы, осины и сосны, дает значение коэффициента детерминации R^2 меньшее, чем диаметр ствола, взятый отдельно [6, 11, 12, 19].

В настоящее время имеется множество таких уравнений и таблиц. В целях выявления возможности обобщения необходим анализ их региональной и видовой специфики. Однако для установления статистической достоверности различия (или его отсутствия) необходим исходный экспериментальный материал, а не публикуемые результаты выравнивания.

Наши исследования проведены в сомкнутых березняках и осинниках Урала и Северного Казахстана производных типов как чистых, так и смешанных по составу (табл. 1). На уральских объектах исследования преобладает береза пушистая, на казахстанских – береза бородавчатая. Осина во влажных типах леса представлена зеленокорой формой, в сухих – серокорой. Преобладающие почвы на первых объектах – бурые лесные оподзоленные, на вторых – бурые лесные, лугово-черноземные и дерново-боровые.

Модельные деревья взяты по ступеням толщины, по 3 ... 11 на каждой пробной площади. В 45-летнем березняке Казахского мелкосопочника проведена сплошная рубка 100 деревьев со взвешиванием кроны на площади 0,16 га. ДЗ кроны обрезали секатором и взвешивали с точностью 0,05 кг.

Таблица 1

Тип лесорастительных условий	Класс бонитета	Число пробных площадей (числитель) и модельных деревьев (знаменатель) по классам возраста							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	Итого
Береза Среднего Урала (опытный лесхоз УГЛТА)									
Березняк: свежий	I – II	–	1/12	–	–	3/30	2/20	–	6/62
	III	2/14	–	1/12	–	–	–	–	3/26
сухой	IV – V	–	1/10	1/14	–	–	–	–	2/24
	Береза Южного Урала (Кусинский лесхоз)								
свежий	II – III	–	1/7	1/6	3/24	2/7	2/13	1/7	10/64
»	Береза Казахского мелкосопочника (Бармашинский лесхоз)								
	III	–	–	–	–	1/100	–	–	1/100
» сухой	Береза Тургайского прогиба (Аракарагайский лесхоз)								
	III	–	–	2/20	–	2/19	1/9	–	5/48
	IV	–	–	–	–	1/10	1/10	1/10	3/30
Итого	–	2/14	3/29	5/52	3/24	9/166	6/52	2/17	30/354
Осина Казахского мелкосопочника (Бармашинский и Буландинский лесхозы)									
Осинник: влажный	Ia – I	–	1/11	–	2/21	–	–	–	3/32
	II – III	1/10	2/20	2/20	2/22	2/21	2/15	–	11/108
сухой	IV	–	1/10	1/10	–	–	–	–	2/20
Итого	–	1/10	4/41	3/30	4/43	2/21	2/15	–	16/160
Всего	–	3/24	7/70	8/82	7/67	11/187	8/67	2/17	46/514

Для сравнения нескольких уравнений парной связи имеются алгоритмы, основанные на оценке дисперсий углового коэффициента и свободного члена регрессий [9, 15], однако для многофакторных уравнений они непригодны. В этом случае сравнение можно выполнить по алгоритмам, в основе которых лежат блоковые «фиктивные» переменные [5]. Они и использованы в нашей работе. Однако при сравнении трех и более выборок (и соответствующих им регрессий) возникает проблема выбора исходной (отправной) выборки, с которой сравниваются все остальные. Она характеризуется величиной константы a_0 , кодируется в блоке одними нулями, и в дальнейшем эту выборку и соответствующую регрессию мы будем называть нулевой. В зависимости от того, какая из выборок взята в качестве нулевой, остальные могут достоверно отличаться от нее и друг от друга. Поэтому мы модифицировали метод Дрейпера и Смита [5], придав ему большую определенность и объективность путем расчета обобщенной по всем выборкам регрессии и принятия ее в качестве нулевой.

Формирование блоков «фиктивных» переменных относительно нулевой выборки выполнено произвольно, поскольку выборки не подлежат предварительному ранжированию по какому-либо признаку (табл. 2). Однако для удобства упоминания их по тексту они обозначены условными номерами. Каждый блок переменных, характеризующий популяцию и обозначаемый сочетанием единицы и нескольких

Таблица 2

Порода и район произрастания	Обозначение популяции	Блоки «фиктивных» переменных				
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Береза:						
Среднего Урала	1	1	0	0	0	0
Тургайского прогиба	2	0	1	0	0	0
Южного Урала	3	0	0	1	0	0
Казахского мелко-сопочника	4	0	0	0	1	0
Осина Казахского мелкосопочника	5	0	0	0	0	1
Общий массив (нулевая выборка)	0	0	0	0	0	0

нулей, повторяется в исходной матрице экспериментальных данных столько раз, сколько взято модельных деревьев в популяции, каждое из которых характеризуется специфическими значениями показателей диаметра, высоты, возраста и массы ДЗ.

Известно, что значения массы кроны березы и осины одного диаметра, но различного возраста могут различаться в несколько раз [4, 10], поэтому применяются уравнения и составляются таблицы, включающие в качестве входов диаметр ствола и возраст дерева. Учитывая изложенное, по всей совокупности 514 модельных деревьев рассчитаны два вида уравнений в логарифмической форме, включающих, наряду с «фиктивными» переменными, основные определяющие факторы: в первом случае – диаметр, высоту дерева и их произведение, во втором – диаметр, возраст дерева и их произведение:

$$\ln P = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_5 x_5 + a_6 \ln D + a_7 \ln H + a_8 \ln D \ln H; \quad (1)$$

$$\ln P = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_5 x_5 + a_6 \ln D + a_7 \ln A + a_8 \ln D \ln A. \quad (2)$$

Поскольку в объемных и сортиментных таблицах возраст дерева не учитывается, для стыковки с ними уравнения (2) рассчитано вспомогательное уравнение

$$\ln A = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_5 x_5 + a_6 \ln D + a_7 \ln H + a_8 \ln D \ln H. \quad (3)$$

В уравнениях (1)-(3) P – масса ДЗ в свежем состоянии, кг;

D – диаметр ствола на высоте груди, см;

H – высота дерева, м;

A – возраст дерева, лет.

Показатели значимости констант уравнений (1)-(3) по критерию Стьюдента и коэффициенты их детерминации приведены в табл. 3 (первая группировка «фиктивных переменных»).

Как видим, влияние диаметра и высоты дерева в уравнении (1), а также диаметра и возраста дерева в уравнении (2) на массу ДЗ в высшей степени достоверно. Вклад отдельных популяций в объяснение общей

Таблица 3

Номер уравнения	Значимость констант по Стьюденту								R^2
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	
Первая группировка									
1	0,2	0,7	2,0	0,5	1,5	15,1	10,4	5,0	0,935
2	-0,7	1,2	1,6	0,6	2,0	12,5	12,6	6,2	0,940
3	-1,6	0,6	-0,9	-1,3	0,7	4,6	10,2	-1,8	0,834
Вторая группировка									
1	4,6	-6,8	-	-	-	18,4	-10,3	3,7	0,932
2	2,7	-5,6	-	-	-	12,4	-9,3	4,4	0,930
3	-1,4	-4,4	-	-	-	7,8	7,2	-	0,796

изменчивости массы ДЗ незначительный: коэффициенты Стьюдента не превышают стандартного значения $t_{05} = 2,0$. Тем не менее мы выделили две популяции, характеризующиеся наибольшим значением t -критерия – третью (береза Южного Урала) и пятую (осина Казахстанско-мелкосопочника). Остальные три популяции березы, значимость констант для которых не превышает 1,2, мы объединили в одну Казахстанско-Среднеуральскую. Вклад популяций березы и осины в объяснение изменчивости возраста оказался незначительным ($t = 0,6 \dots 1,6$), тем не менее перегруппировка популяций для уравнения (3) выполнена аналогично (1) и (2).

Таким образом, были сформированы новые блоки «фиктивных» переменных: для березы Южного Урала $x_1 = 1$; $x_2 = 0$; для осины Казахстанско-мелкосопочника $x_1 = 0$; $x_2 = 1$. В этом случае в качестве нулевой ($x_1 = 0$; $x_2 = 0$) принята объединенная (1, 2 и 4) на втором этапе популяция, которая по t -критерию ближе всего к объединенной (1-5) на первом этапе популяции обеих пород, фигурировавшей в качестве нулевой в первой группировке «фиктивных» переменных.

При повторном расчете уравнений (1)-(3) с новыми блоками «фиктивных» переменных вместо пяти участвуют только две из них – x_1 и x_2 ; в остальном структура уравнений не изменяется. Анализ полученных констант (табл. 3, вторая группировка) показывает, что на статистически достоверных уровнях ($t = 4,6$ и $t = 2,7$) при одинаковых размерах и возрасте дерева масса ДЗ у березы Южного Урала больше, чем у березы Казахстанско-Среднеуральского региона, а у осины существенно меньше ($t = 6,8$ и $t = 5,6$), чем у березы обоих регионов. Различия в возрасте популяций березы, определенные по уравнению (3), недостоверны ($t = 1,4$); специфичны они лишь по породам ($t = 4,4$). Теперь, когда на статистически достоверном уровне выделены три популяции для определения массы ДЗ и две – возраста, для каждой из них по соответствующим массивам экспериментальных данных отдельно рассчитаны окончательные уравнения (1)-(3), к которым «фиктивные» переменные уже отсутствуют. Их характеристика приведена в табл. 4.

Таблица 4

Порода и район произрастания	Номер уравнения	Окончательные значения констант уравнений (1) – (3) (числитель) и их значимость по Стьюденту (знаменатель)				R ²
		a ₀	a ₆	a ₇	a ₈	
Береза: Казахстанско- Среднеуральского региона Южного Урала	1	-0,6956	1,8922/15,2	-1,5527/11,0	0,2570/6,1	0,939
	2	-0,7716	1,3277/8,1	-0,8084/8,1	0,2290/5,5	0,930
	3	1,4599	0,3622/8,5	0,4809/5,5	-	0,820
	1	-2,2524	3,0283/12,4	-1,2589/3,3	-	0,927
	2	-4,5649	3,5080/8,5	-	-0,2464/3,1	0,925
	3	1,4599	0,3622/8,5	0,4809/5,5	-	0,820
Осина Казахского мелкосопочника	1	-2,7587	2,2337/16,1	-0,4985/2,0	-	0,938
	2	-1,7103	2,3288/30,0	-0,7364/5,3	-	0,946
	3	1,3466	0,3622/8,2	0,4809/7,7	-	0,796

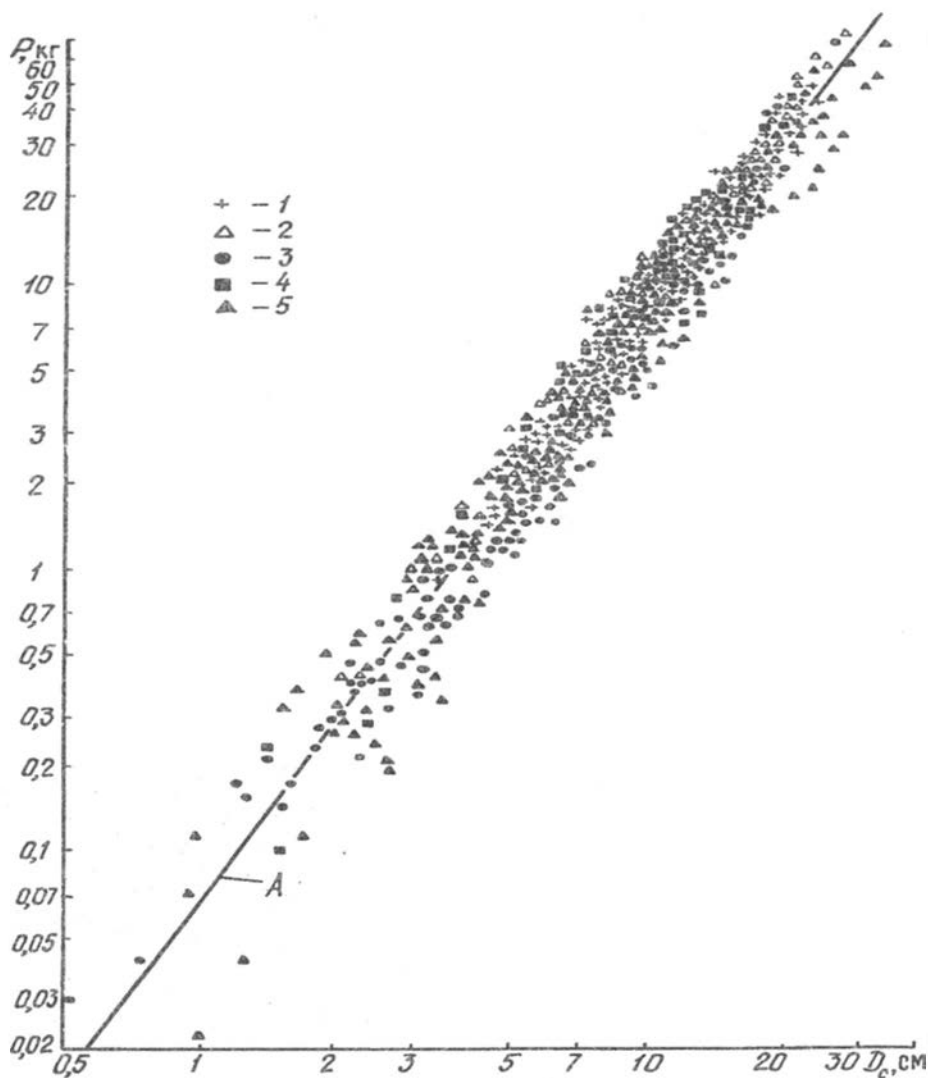
Объемные и сортиментные таблицы часто составляют по разрядам высоты деревьев. Для каждого региона создается шкала разрядов высоты, на основе произвольного разбиения поля экспериментальных точек в координатах высота – диаметр, в результате число разрядов высоты у одной породы может колебаться от 3 до 9. Это не позволяет сопоставить такие объемные таблицы и совмещенные с ними таблицы ДЗ по регионам. Поэтому табулирование основных уравнений, приведенных в табл. 4, выполнено нами по макету баварских таблиц с постоянными градациями диаметров, высот и возрастов (табл. 5).

В нашей предыдущей работе [14] было показано, что аллометрическая (в логарифмических координатах) связь массы листвы и ветвей P_i с диаметром ствола у основания кроны (D_c , см):

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D_c, \quad (4)$$

где сечение представлено целиком водопроводящей заболонью, у березы Урала, Казахского мелкосопочника и островных боров Тургайского прогиба инвариантна, т.е. достоверно не различается по регионам. Выполненный нами расчет уравнения (4) для массы ДЗ с включением блока «фиктивных» переменных из четырех популяций березы и одной – осины (табл. 1) показал, что оно является инвариантным относительно не только разных популяций березы, но и двух разных пород – березы и осины. Это подтверждается низкой значимостью констант «фиктивных» переменных, соответствующих пяти названным древесным популяциям, которая в порядке их нумерации в табл. 2 составила соответственно 0,9; 0,5; 0,4; 0,5 и 0,4. Полученное обобщенное уравнение (см. рисунок)

$$\ln P = -2,6907 + 2,0480 \ln D_c; \quad R^2 = 0,948 \quad (5)$$



Зависимость массы древесной зелени в свежесрубленном состоянии (P , кг) четырех популяций березы и одной – осины от диаметра ствола у основания кроны D , см): 1 – береза Казахского мелкосопочника; 2 – береза Тургайского прогиба; 3 – береза Среднего Урала; 4 – береза Южного Урала; 5 – осина Казахского мелкосопочника; A – линия регрессии (5)

может применяться в каждой из пяти исследованных популяций. Однако диаметр D_c у растущих деревьев измерить трудно, и при использовании уравнения (5) необходимо знать для каждого древостоя зависимость $D_c = f(D)$.

Таблица 5

D, см	Масса древесной зелени в свежем состоянии, кг на 1 дерево											
	Уравнение (1) при высоте дерева, м						Уравнение (2) при высоте дерева, лет					
	8	12	16	20	24	28	10	30	50	70	90	110
8	3,1	2,0	1,5	1,2	-	-	3,4	2,4	2,0	1,8	-	-
	4,2	2,5	1,7	1,3	-	-	4,7	2,7	2,1	1,7	-	-
	2,3	1,9	1,6	1,5	-	-	4,2	1,9	1,3	1,0	-	-
12	-	5,7	4,4	3,5	-	-	7,2	5,5	4,9	4,5	-	-
	-	8,5	5,9	4,5	-	-	15,5	7,9	5,8	4,7	-	-
	-	4,7	4,1	3,7	-	-	10,8	4,8	3,3	2,6	-	-
16	-	11,7	9,2	7,6	6,5	-	-	10,2	9,3	8,8	8,4	-
	-	20,4	14,2	10,7	8,5	-	-	17,1	12,0	9,6	8,1	-
	-	9,0	7,8	7,0	6,4	-	-	9,4	6,5	5,0	4,2	-
20	-	-	16,5	13,8	12,0	-	-	16,3	15,3	14,7	14,2	13,9
	-	-	27,9	21,1	16,8	-	-	31,0	21,2	16,6	13,8	11,9
	-	-	12,8	11,5	10,5	-	-	15,8	10,9	8,5	7,0	6,1
24	-	-	26,5	22,5	19,7	17,6	-	-	22,9	22,3	21,9	21,5
	-	-	48,5	36,6	29,1	24,0	-	-	33,8	26,0	21,3	18,2
	-	-	19,3	17,2	15,7	14,6	-	-	16,6	13,0	10,8	9,3
28	-	-	39,6	33,9	29,9	26,8	-	-	32,3	31,8	31,5	31,2
	-	-	77,3	58,4	46,4	38,2	-	-	50,0	37,9	30,9	26,2
	-	-	27,2	24,3	22,2	20,6	-	-	23,8	18,6	15,4	13,3

Примечание. Первая строка – для березы Казахстанско-Среднеуральского региона; вторая – для березы Южного Урала; третья – для осины Казахского мелкосопочника.

Таким образом, оценка массы древесной зелени дерева по диаметру ствола у основания кроны (физиологически обусловленная взаимосвязь) возможна на основе одного, инвариантного для биологически близких пород, уравнения. При использовании же общепринятых в лесной таксации диаметра, высоты, возраста дерева в качестве независимых переменных или входов в таблицы требуется районирование получаемых уравнений и соответствующих таксационных таблиц фитомассы по породам и регионам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Алексеев В.И., Уткин А.И. Таблицы массы фракций деревьев главных лесобразующих пород // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. - М.: Наука, 1982. - С. 237-240. [2]. Бабурин А.А., Петропавловский Б.С., Суханов В.В. Предварительные таблицы фитомассы древесных пород Дальнего Востока. - Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. - 44 с. [3]. Ватковский О.С. Методы определения фитомассы ствола и кроны дуба // Лесоведение. - 1968. - № 6. - С. 58-64. [4]. Габеев В.Н.

- Биологическая продуктивность лесов Приобья. - Новосибирск: Наука, 1976. - 171 с. [5]. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. - М.: Статистика, 1973. - 392 с. [6]. Зинченко В.Ф. Исследование способов учета, запасов и кормовой ценности фитомассы крон осинников и березняков Ленинградской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. - Брянск, 1986. - 21 с. [7]. Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. - Новосибирск: Наука, 1978. - 166 с. [8]. Токмурзин Т.Х., Байзаков С.Б. Рекомендации по таксации надземной массы и освоению древесной зелени сосновых и еловых лесов Казахстана. - Алма-Ата: КазСХИ, 1970. - 63 с. [9]. Урбах В.Ю. Биометрические методы. - М.: Наука, 1964. - 415 с. [10]. Усольцев В.А. Вес кроны березы и осины в насаждениях Северного Казахстана // Вестн. с.-х. науки Казахстана. - 1972. - № 4. - С. 77-80. [11]. Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. - Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985. - 191 с. [12]. Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. - Новосибирск: Наука, 1988. - 253 с. [13]. Усольцев В.А., Усольцева Р.Ф. Аппроксимирование надземной фитомассы березы и осины по диаметру и высоте ствола // Вестн. с.-х. науки Казахстана. - 1977. - № 7. - С. 83-89. [14]. Усольцев В.А. Сальников А.А. Фитомасса крон березы Урало-Казахстанского региона: Принципы составления нормативов // Лесные экосистемы Тургайской впадины. - Кустанай: Печатный двор, 1993. - С. 18-20. [15]. Хальд А. Математическая статистика (с техническими приложениями). - М.: ИЛ, 1956. - 501 с. [16]. Яновский Л.Н. Масса крон и древесной зелени в сырастающем состоянии // Лесотаксационный справочник по Северо-Западу. - Л.: ЛТА, 1984. - С. 46-49. [17]. Grigal D.F., Kernik L.K. Generality of black spruce biomass estimation equations // Can. J. For. Res. - 1984. - Vol. 14. - P. 468-470. [18]. Prodan M. Holzmesslehre. - Frankfurt a. M.: J. D. Sauerlaender's Verl., 1965. - 644 S. [19]. Schmitt M.D.C., Grigal D.F. Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh. // Can. J. For. Res. - 1981. - Vol. 11. - P. 837-840. [20]. Spank G. Zur Schaetzung der Kronen- und Nadelmasse in Reinbestaenden der Baumart Kiefer (*Pinus silvestris* L.) // Beitr. Forstwirt. - 1982. - Bd. 16, № 3. - S. 129-139.