

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630\*52:630\*174.754+630\*176.321.3(574.21)

*В.А. УСОЛЬЦЕВ, А.В. УСОЛЬЦЕВ*

Усольцев Владимир Андреевич родился в 1940 г., окончил в 1963 г. Уральский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства Уральской государственной лесотехнической академии, заведующий лабораторией биологической продуктивности лесов Института леса УрО РАН. Имеет 140 печатных научных работ по проблемам оценки и моделирования биологической продуктивности и структуры фитомассы лесов.



Усольцев Александр Владимирович родился в 1968 г., окончил в 1993 г. Уральскую государственную лесотехническую академию, аспирант кафедры лесоводства УЛЛТА.

**ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПРОДУКТИВНОСТИ БЕРЕЗОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ  
ПО ИСХОДНЫМ ДАННЫМ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ БИОГРУПП\***

Установлены предельные показатели надземной фитомассы березовых древостоев семенного и порослевого происхождения при увеличении густоты в статике с использованием системы рекуррентных уравнений на уровне биогрупп и соотношения сомкнутости полога древостоя и биогрупп.

---

\* Авторы признательны Г.Б.Кофману за помощь в подготовке статьи к публикации.

The utmost biomass indices corresponding to maximum density in statics of birch stands of sprouting and seed origin using a compatible system of biomass equations on tree biogroup and stand levels as well as biogroup and stand canopy density ratio have been stated.

При расчетах углеродного баланса показатели оценки ежегодно связываемого лесной растительностью углерода разнятся на порядок и более: на планетарном уровне от 1 [13] до 10 Гт [11], для лесов России и бывшего СССР – от 200 [3] до 400 [2] и даже свыше 4000 млн т [12]. При таком разбросе данных возможность прогнозирования экологической ситуации представляется сомнительной. Прежде всего, необходимо иметь достаточно надежные сведения о фитомассе лесов, разработанные на основе банка данных лесоустройства по выделам [10], а также сведения о предельной продуктивности древостоев на выделах.

Ранее нами были установлены траектории продуктивности березняков семенного и порослевого происхождения по возрастам и густоте на уровне биогрупп как микромоделей древостоев [6, 7]. Преимущество биогрупп состоит в том, что, во-первых, при полной сомкнутости полога их продуктивность, в отличие от древостоев, практически не зависит от горизонтальной структуры и, во-вторых, можно получить достаточно обширный экспериментальный материал при минимальных трудозатратах. К недостаткам использования биогрупп можно отнести субъективность их выделения в природе. Однако этот недостаток устраняется при учете соотношения  $K$  между сомкнутостью полога древостоя  $C_{п.д}$  и составляющих его биогрупп  $C_{п.б}$ .

В наших предыдущих работах [6, 7, 9] с использованием коэффициента  $K = C_{п.д} / C_{п.б}$  для каждого класса возраста березы были установлены густоты биогрупп и древостоев в целом, при которых запас на единице площади максимальный. За пределами этих густот запасы древостоев и составляющих их биогрупп снижаются. Мы предприняли попытку установить минимальный предел, к которому стремится надземная фитомасса древостоев данного возраста при увеличении густоты (в статике), но не достигает его вследствие естественного изреживания.

Экспериментальный материал получен в колочных березняках Тургайского прогиба (Казахстан, подзона степей) в типе леса березняк разнотравный на лугово-черноземных почвах в Боровском и Аракарагайском лесхозах Кустанайской области. В березняках 5 ... 50 лет заложены пробные площади: в порослевых – 21, в семенных – 13. Их принадлежность к естественным рядам развития установлена сопоставлением возрастных трендов объемного прироста деревьев высших рангов [4, 5]. В порослевых березняках среднее число порослевых гнезд  $1670 \pm 173$  экз./ га, класс бонитета III. Полнота семенных близка к 1,0, класс бонитета I. Размер пробных площадей 0,01 ... 0,20 га с числом деревьев 130 ... 460. Пробные площади разбиты в природе на квадраты размером 1,5 x 1,5 м в возрасте древостоев 5 ... 10 лет и 3 x 3 м в более старших возрастах. Пронумерованы и нанесены на план все деревья; у каждого из них замерены высота, диаметр на высоте груди в двух на-

правлениях и радиусы кроны в четырех направлениях. Всего учтено 5300 деревьев в порослевых и 3050 – в семенных березняках и выделено соответственно 360 и 280 биогрупп.

Биогруппы выделяли на плане насаждений визуально, с учетом расстояний между деревьями и их сходства по таксационно-морфологическим признакам [8]. На рис. 1 представлены фрагменты закартированных пробных площадей.

Для расчета запасов древесины в биогруппах взято 100 модельных деревьев в порослевых и 80 – в семенных березняках, у которых определены объемы стволов в коре по 10 отрезкам (относительным высотам), замерены диаметры на высоте груди и высоты, рассчитаны уравнения для объема ствола как функции его высоты и диаметра [6, 7]. Затем с использованием полученных уравнений и замеров высот и диаметров стволов в каждой биогруппе рассчитаны на компьютере запасы стволовой древесины биогрупп.

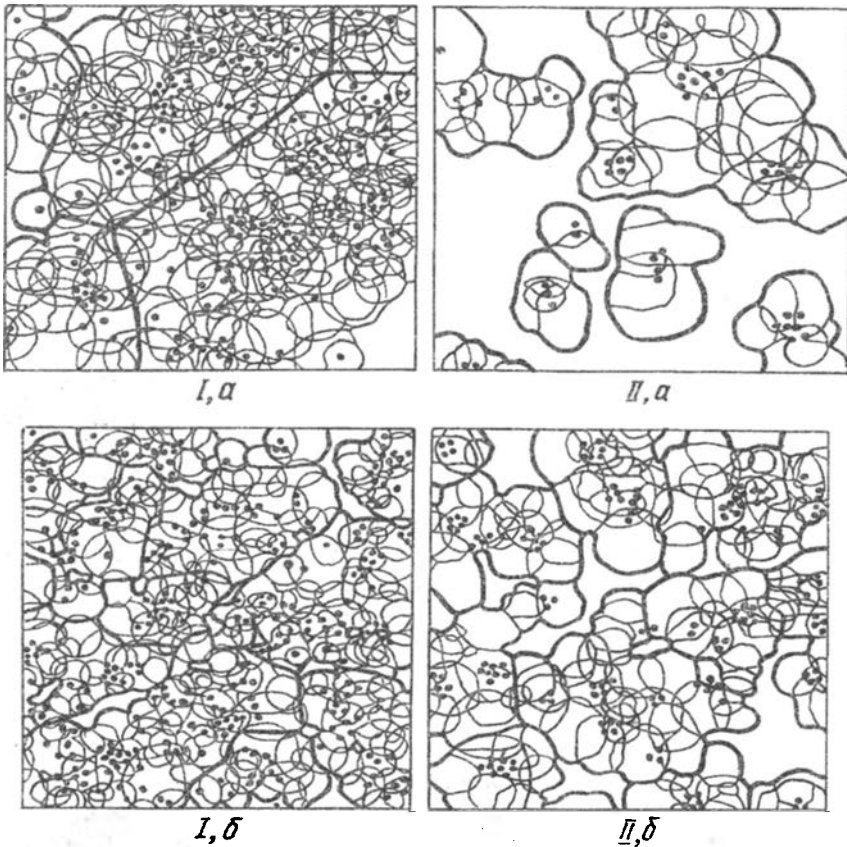


Рис.1 Результаты картирования и выделения биогрупп (жирная линия) в древостоях семенного (I) и порослевого (II) происхождения в возрасте 10 лет (a) и спустя 7 лет на тех же участках (б). Масштаб участков б мельче, чем а, масштаб участков I и II одинаков

Запас биогруппы на единице площади при заданном возрасте в предельном ценотическом состоянии, т. е. при максимально возможной густоте, определяется двумя основными массообразующими показателями – средними диаметром и высотой. Поэтому вначале необходимо рассчитать траектории изменения среднего диаметра, максимального для каждого класса возраста и в пределах одного возраста – для каждой градации густоты. Для получения исходных данных к расчету таких траекторий все экспериментальные данные средних диаметров биогрупп были распределены в двухходовые (по возрасту и густоте) матрицы, и из каждой ячейки матрицы отобраны максимальные значения среднего диаметра. Последние аппроксимированы зависимостью

$$D_{\max} = f(A, N), \quad (1)$$

где  $D_{\max}$  – максимальное значение среднего диаметра стволов биогруппы, см;

$A$  – возраст, лет;

$N$  – число стволов, приходящихся на единицу площади биогруппы, в данном случае на 1 условный гектар, тыс. экз./га.

Получены нелинейные модели:

для семенных березняков

$$\ln D_{\max} = 0,6194 A^{0,403} - 0,0304 A^{0,1225 \ln A} (\ln N)^2; R^2 = 0,988; \quad (2)$$

для порослевых

$$\ln D_{\max} = 0,8865 A^{0,320} - 1,0553 A^{0,5255 \ln A - 2,265} (\ln N)^2; R^2 = 0,962. \quad (3)$$

Положение предельных траекторий максимального диаметра  $D_{\max}$  и их огибающей относительно экспериментальных значений средних диаметров всех семенных биогрупп показано на рис. 2.

Средняя высота биогруппы изменяется в связи не только с возрастом и густотой, но и со средним диаметром стволов  $D$ . Поэтому для получения исходных данных к расчету траекторий изменения максимальных значений средних высот биогрупп все экспериментальные данные средних высот были распределены в трехходовые (по возрасту, густоте и среднему диаметру) матрицы, и из каждой ячейки матрицы отобраны максимальные значения средних высот. Последние аппроксимированы трехфакторной зависимостью

$$H_{\max} = f(A, N, D), \quad (4)$$

где  $H_{\max}$  – максимальное значение средних высот биогрупп, м;

$D$  – средний диаметр стволов биогрупп, см.

Чтобы установить, достоверно ли различаются максимальные значения средних высот семенных и порослевых биогрупп при одних и тех же значениях возраста, густоты и среднего диаметра, в модель (4) включали бинарную фиктивную переменную [1]. Экспериментальные данные кодировались для семенных биогрупп значениями фиктивной

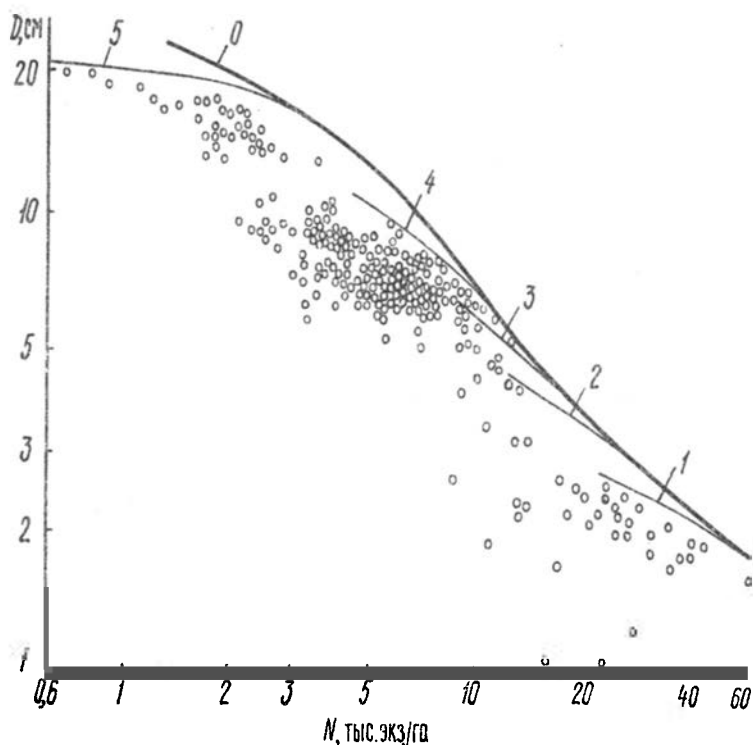


Рис.2. Кривые  $D_{\max} = f(N)$  для семенных биогрупп в возрасте 10, 20, 30, 40 и 50 лет (линии соответственно 1, 2, 3, 4 и 5), полученные табулированием уравнения (2) по задаваемым значениям плотности биогрупп;  $O$  – огибающая

переменной  $X = 0$ , а для порослевых  $X = 1$ . Получена регрессионная модель

$$H_{\max} = -2,5567 + 2,4113 X - 1,4220 X \ln A + 1,9487 \ln A \ln D + 2,8754 \ln N - 0,3870 (\ln N)^2 - 0,6763 \ln D \ln N; R^2 = 0,974. \quad (5)$$

Все константы уравнения (5) значимы на уровне  $t_{05}$ . Это означает, что максимальные значения средних высот определяются не только возрастом, плотностью и средним диаметром биогруппы, но и происхождением древостоя. На начальном этапе роста, когда порослевые биогруппы используют материнскую корневую систему, их значения  $H_{\max}$  выше, чем у семенных, а с возрастом соотношение  $H_{\max}$  меняется на обратное. Предельные траектории изменения  $H_{\max}$  по возрасту и плотности биогрупп рассчитаны для семенных биогрупп подстановкой уравнения (2) в уравнение (5) при  $X = 0$  (рис. 3), а для порослевых – уравнения (3) в уравнение (5) при  $X = 1$ .

Запас стволовой древесины биогрупп определяется четырьмя показателями – возрастом, плотностью, средним диаметром и средней высотой биогрупп:

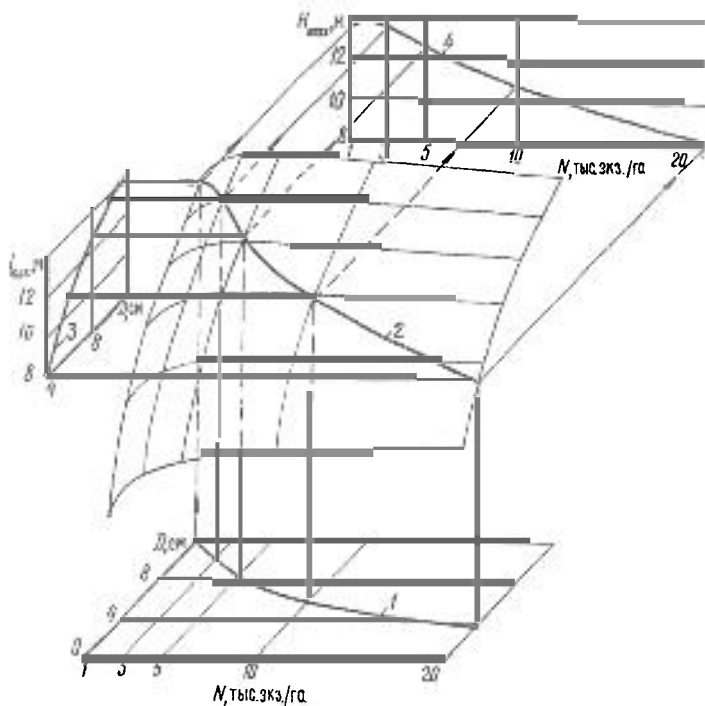


Рис.3. Геометрическая интерпретация рекуррентной системы уравнений (2) и (5) для максимальных значений средних высот семенных биогрупп в возрасте 30 лет: 1 – кривая зависимости  $D_{\max} = f(N)$  по уравнению (2); 2 – проекция кривой 1 на поверхность, описываемую уравнением (5) при  $A = 30$  лет; 3 – кривая зависимости  $H_{\max} = f(D)$ ; 4 – кривая зависимости  $H_{\max} = f(N)$

$$M = f(A, N, D, H), \quad (6)$$

где  $M$  – запас стволовой древесины в коре,  $\text{м}^3$  на 1 условный гектар биогруппы;

$H$  – средняя высота стволов биогруппы, м.

Чтобы установить, достоверно ли различаются запасы биогрупп семенного и порослевого происхождения при одних и тех же значениях названных четырех факторов, в модель (6) включали бинарную фиктивную переменную  $X$ . Она оказалась статистически значимой ( $t = 6,2 > t_{05} = 2$ ), т. е. запасы порослевых и семенных биогрупп при равных значениях массообразующих показателей различны. Чтобы учесть специфику влияния каждого из определяющих факторов на запас биогрупп березы разного происхождения, регрессионные модели рассчитывали отдельно:

для семенных биогрупп

$$\begin{aligned} \ln M = & -15,1525 + 10,2006 \ln A - 2,1269 (\ln A)^2 + 1,1777 \ln N + \\ & + 1,0675 \ln A \ln D + 1,2026 H - 0,5783 H \ln A + 0,1086 H (\ln A)^2 - \\ & - 0,1872 H \ln D - 0,02654 H \ln N; \quad R^2 = 0,972; \end{aligned} \quad (7)$$

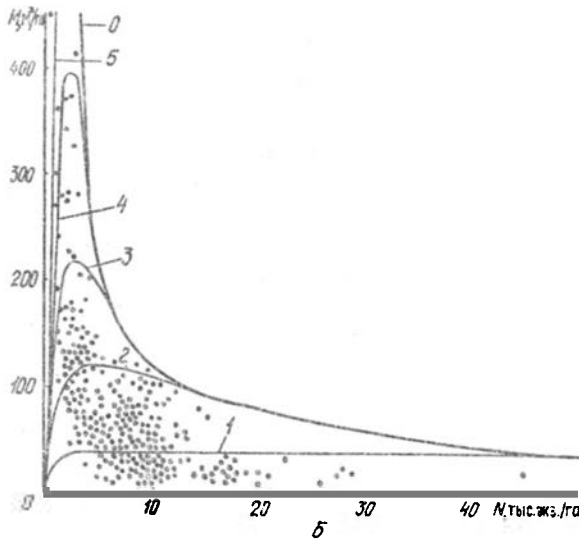
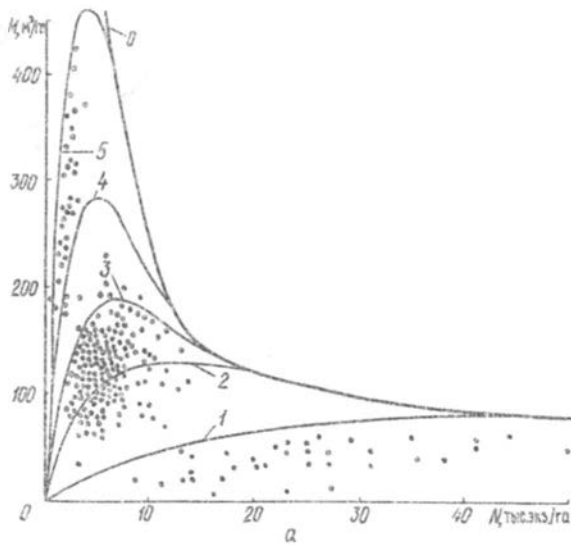


Рис. 4. Колоколообразные кривые густоты семенных (а) и порослевых (б) биогрупп для возрастов 10, 20, 30, 40 и 50 лет (кривые соответственно 1, 2, 3, 4 и 5), полученные последовательным табулированием уравнений (2), (3), (5) и (7), (8) по задаваемым значениям возраста и густоты; 0 — огибающая

для порослевых биогрупп

$$\ln M = 2,4461 - 1,5332 \ln A + 0,4476 \ln A \ln N + 1,3311 \ln A \ln D + \\ + 0,02202 H^2 - 0,01983 H (\ln A)^2 - 0,1425 H \ln D - 0,2383 \ln D \ln N; \\ R^2 = 0,930. \quad (8)$$

Положение предельных траекторий изменения запасов биогрупп  $M_{\max}$  и их огибающей относительно всех экспериментальных значений запасов показано на рис. 4. Эти траектории получены последовательным табулированием рекуррентной системы уравнений (9)

$$\left. \begin{array}{l} \text{I. } M = f(A, N, D, H); \\ \uparrow \\ \text{II. } H_{\max} = f(A, N, D); \\ \uparrow \\ \text{III. } D_{\max} = f(A, N). \end{array} \right\} \quad (9)$$

Вначале табулируются уравнения (2) и (3) по заданным  $A$  и  $N$ , затем уравнение (5) по тем же  $A$  и  $N$  и полученным  $D_{\max}$  и, наконец, уравнения (7) и (8) по тем же  $A$  и  $N$  и полученным  $D_{\max}$  и  $H_{\max}$ .

В табл. 1 для задаваемого возраста и предельной для него густоты  $N_{\max}$  (точка пересечения колоколообразной кривой с огибающей на рис. 4) приведены соответствующие значения предельного запаса  $M$ . Подстановкой величин  $N_{\max}$  для каждого возраста в уравнения (2) и (3) получены значения  $D_{\max}$ ; подстановкой этих же значений в (5) – величины  $H_{\max}$ . Для пересчета показателей с уровня биогруппы на уровень древостоя использован корректировочный коэффициент  $K = C_{п.д} / C_{п.б}$ , расчет которого приведен в работах [6, табл. 4.12 и 9]. Умножением коэффициента  $K$  на значения  $N_{\max}$  и предельного  $M$  биогруппы получены соответствующие показатели для древостоя.

Таблица 1

A, лет	K	$N_{\max}$ , тыс. экз./га		$D_{\max}$ , см	$H_{\max}$ , м	Предельный M, м <sup>3</sup> /га		Предельная фитомасса (сухая), т/га			
		био- груп- пы	дре- во- стоя			био- груп- пы	дре- во- стоя	С	В	Л	Итого
Семенные березняки											
20	0,97	20	19	3,5	7,4	123	119	108	6	3	117
30	0,97	17	15	4,2	9,2	128	116	106	4	1	111
40	0,84	12	10	5,7	11,8	172	144	134	3	1	138
50	0,78	6	5	10,6	16,5	416	324	306	17	4	327
Порослевые березняки											
20	0,79	14	11	4,0	6,1	97	77	68	6	3	77
30	0,80	5	4	8,1	10,2	192	154	144	20	3	167
40	0,78	4	3	9,8	12,1	258	201	192	28	3	223
50	0,72	3	2	12,6	14,4	364	262	254	43	3	300

Примечание. С – ствол, В – ветви, Л – листья.



Имея для заданного возраста в табл. 1 предельные значения  $N_{\max}$  и  $M$ , скорректированные через коэффициент  $K$  на древостой, а также значения  $D_{\max}$  и  $H_{\max}$ , мы можем рассчитать предельные показатели надземной фитомассы древостоев на основе рекуррентно-ступенчатого метода [6, 10], используя переводной коэффициент  $P_i / M$  как функцию названных четырех показателей  $A, N, D, H$ :

$$P_i / M = a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln A)^3 + a_4 \ln N + a_5 (\ln N)^2 + a_6 \ln D + a_7 \ln H + a_8 (\ln A)^2 \ln N + a_9 \ln A \ln N + a_{10} \ln A \ln H + a_{11} \ln A \ln D + a_{12} \ln N \ln D + a_{13} \ln N \ln H + a_{14} \ln H \ln D, \quad (10)$$

где  $P_i$  – фитомасса  $i$ -й фракции (ствол, ветви, листья) в абсолютно сухом состоянии, т/га.

Для построения моделей (10) использованы данные 50 пробных площадей, заложенных в березняках Тургайского прогиба, Среднего Урала и юга Западной Сибири в широких диапазонах возраста (5 ... 90 лет) и лесорастительных условий (I – IV классы бонитета). Характеристика уравнения (10) для трех фракций приведена в табл. 2.

Таблица 2

Константы и переменные уравнения (10)	Значения констант и переменных уравнения (10) для фракций		
	Ствол	Ветви	Листья
$a_0$	-0,4833	1,7840	0,8832
$a_1(\ln A)$	-	7,5733	-
$a_2(\ln A)^2$	-	-3,1133	-0,0503
$a_3(\ln A)^3$	-0,0091	0,2818	-
$a_4(\ln N)$	0,6499	-4,3084	-0,2357
$a_5(\ln N)^2$	-0,0536	0,5316	-
$a_6(\ln D)$	-	-9,7223	-0,1983
$a_7(\ln H)$	0,4607	3,8762	-0,4013
$a_8(\ln A)^2 \ln N$	0,0301	0,1188	-0,0104
$a_9(\ln A \ln N)$	-0,1891	-	0,0611
$a_{10}(\ln A \ln H)$	-	-1,0198	0,0995
$a_{11}(\ln A \ln D)$	0,1587	2,4628	0,0447
$a_{12}(\ln N \ln D)$	-0,1148	1,4053	-
$a_{13}(\ln N \ln H)$	-	-0,5114	0,0529
$a_{14}(\ln H \ln D)$	-0,1873	-	-
$R^2$	0,638	0,886	0,975

Подставляя в уравнения (10) значения  $A$  и  $M$ , а также  $N_{\max}$ ,  $D_{\max}$  и  $H_{\max}$  из табл. 1, получаем предельные для каждого возраста показатели надземной фитомассы березняков по фракциям  $P_i$  (табл. 1).

Таким образом, изложенный подход позволяет установить предельно возможные запасы надземной фитомассы и связанного в ней

углерода в древостоях данного возраста. Использование био групп как микромоделей древостоев различной густоты дает возможность получить для любой древесной породы достоверные показатели предельных запасов фитомассы при минимальных трудозатратах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. - М.: Статистика, 1973. - 392 с. [2]. Заварзин Г.А. Международные экологические конвенции // Природа. - 1992. - № 12. - С. 3-7. [3]. Оценка запасов и годовичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, А.И. Уткин и др. // Лесоведение. - 1993. - № 5. - С. 3 - 10. [4]. Усольцев В.А. О закономерностях роста березы порослевого и семенного происхождения // Вестн. сельскохозяйств. науки Казахстана. - 1978. - № 6. - С. 87-93. [5]. Усольцев В.А. Математическое моделирование прироста березы повислой // Лесоведение. - 1979. - № 2. - С. 13-22. [6]. Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. - Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985. - 191 с. [7]. Усольцев В.А. Оценка показателей продуктивности в био группах разной густоты // Лесоведение. - 1985. - № 2. - С. 62-72. [8]. Усольцев В.А. Элементы динамики горизонтальной структуры березняков порослевого и семенного происхождения // Лесоведение. - 1985. - № 6. - С. 19-29. [9]. Усольцев В.А. О соотношении продуктивности древостоя и составляющих его био групп // Лесные экосистемы в условиях континентального климата. - Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1987. - С. 168-173. [10]. Усольцев В.А. Глобальные экологические программы и базы данных о фитомассе лесов // Лесн. журн. - 1993. - № 4. - С. 3-7. - (Изв. высш. учеб. заведений). [11]. Global BIOME Programm. - U.S. Environmental Protection Agency. - Corvallis. - 1991. - 8 p. [12]. Kolchugina T.P., Vinson T.S. Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union // Can. J. For. Res. - 1993. - № 23. - P. 81-88. [13]. Schläpfer R. (ed.). Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. - Progress Report of the IUFRO Task Force « Climate Change and Air Pollution ». - Vienna: IUFRO; Birmensdorf: WSL / IUFRO World Series. - 1993. - Vol. 4. - 133 p.