



УДК 630\*52:630\*174.754

***В. А. Усольцев, Ю. В. Усольцева, С. В. Залесов***

Усольцев Владимир Андреевич родился в 1940 г., окончил в 1963 г. Уральский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесной таксации и лесоустройства Уральского государственного лесотехнического университета, заведующий лабораторией экологии и биопроductивности антропогенных растительных сообществ Ботанического сада УрО РАН. Имеет более 250 печатных научных работ по проблемам оценки и моделирования биологической продуктивности и структуры фитомассы лесов.



Усольцева Юлия Владимировна родилась в 1982 г., студентка Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет 3 научные печатные работы.



Залесов Сергей Вениаминович родился в 1953 г., окончил в 1981 г. Уральский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет 170 печатных научных работ по проблеме повышения продуктивности лесов Урала.



### **ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАС- ПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОМАССЫ БЕРЕЗЫ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ\***

Сформирована база данных о фитомассе березы из 476 определений на территории от Великобритании до Японии. Рассчитаны системы рекурсивных уравнений как для массообразующих показателей, так и для фитомассы, дифференцированные по 29 регионам Северной Евразии. Установлено снижение фитомассы березняков по

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-05-64532 и 01-04-964524).

мере ухудшения климатических условий по зональному и провинциальному градиентам.

*Betula*, биопродуктивность, лесорастительные зоны и провинции, континентальность климата.

Известно, что основой функционирования биосферы является ее первичная продуктивность и что жизнь человека и всех гетеротрофов зависит от первичной продукции, но лишь в последние десятилетия представление о продукционной способности биосферы вышло за рамки «просвещенных догадок» и получило некоторое количественное подтверждение [13]. Сегодня данных о запасах основного «держателя» органического углерода – фитомассы лесного покрова – накоплено уже достаточно, чтобы попытаться свести их, хотя бы на примере Северной Евразии, в единую базу и дать географический анализ фитомассы лесов.

Цель настоящей работы – сформировать базу данных о фитомассе березы, широко представленной в Северной Евразии, построить по ним ориентированную на многофункциональное применение систему регрессионных моделей фитомассы и выявить зонально-провинциальные закономерности распределения фитомассы по ее запасу и фракционному составу на территории Северной Евразии.

Сформированная нами база данных о фитомассе рода *Betula* (рис. 1) состоит из 476 (включая собственные) определений ее фракционного состава, взятых из 128 литературных источников, в том числе: 452 – для *B. verrucosa* и *B. pubescens* (провинции Среднеевропейская, Скандинавско-Русская, восток Русской равнины, Уральская, Западно-Сибирская, Средне-сибирская, Восточно-Сибирская, Дальний Восток (Приморье), Забайкальская, Алтае-Саянская, Кавказско-Малоазиатская); 6 – для *B. tortuosa* (лесотундра востока Русской равнины и средняя тайга Восточно-Сибирской провинции), а также по 1-3 определения для *B. Kusmisscheffii* (северная тайга востока Русской равнины), *B. Ermani* (северная тайга Дальнего Востока, южная тайга Забайкалья и Япония), *B. platyphylla* (средняя тайга Дальнего Востока и Япония), *B. costata* (Дальний Восток, Приморье), *B. Maximowicziana* и *B. grossa* (Япония), *B. Gmelini* и *B. lanata* (южная тайга Забайкалья). Подавляющая часть экспериментальных данных (95 %) приходится на долю *B. verrucosa* и *B. pubescens*, анализируемых далее совместно. Аналогичным образом совместно проанализированы *B. Ermani*, *B. platyphylla*, *B. Maximowicziana* и *B. grossa* в Японии, а остальные малочисленные данные (*B. tortuosa*, *B. Kusmisscheffii*, *B. japonica*, *B. Ermani*, *B. costata*, *B. platyphylla*, *B. Gmelini*, *B. lanata*) включены в анализ по регионам вместе с *B. verrucosa* и *B. pubescens*.

Экспериментальные данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления [1, 4, 6] распределились по 29 регионам, из которых в качестве исходной принята подзона широколиственных лесов Среднеевропейской провинции (см. рис. 1). Все регионы закодированы

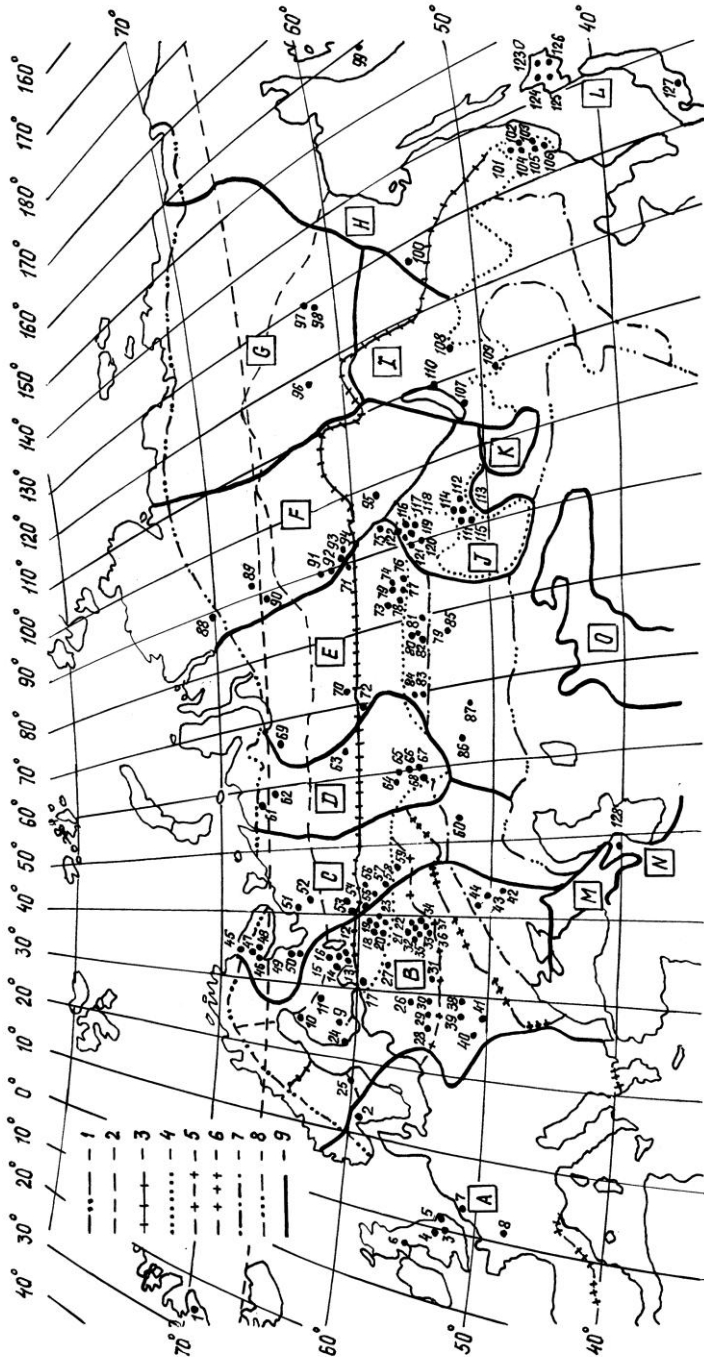


Рис. 1. География экспериментальных данных о фитомассе березы в Северной Евразии: 1 – южная граница тундры; 2 – южная граница подзоны северной тайги; 3 – южная граница подзоны средней тайги; 4 – южная граница подзоны южной тайги; 5 – южная граница хвойно-широколиственных лесов; 6 – юго-восточная граница широколиственных лесов; 7 – южная граница лесостепи; 8 – южная граница степи [1]; 9 – границы лесорастительных провинций Сибири. Выделены провинции [4, 6]: А – Среднеевропейская; В – Скандинаво-Русская (включая юг Русской равнины); С – восток Русской равнины (включая Запдно-Казахстанскую провинцию на юге); D – Уральская; E – Запдно-Сибирская (включая Восточно-Казахстанскую провинцию на юге); F – Среднесибирская; G – Восточно-Сибирская; H – Дальний Восток; I – Забайкальская горная; J – Алтайская горная; K – Центрально-Хангайская; L – Японские острова; M – Причерноморская; N – Кавказско-Малоазиатская; O – Памиро-Тянь-Шаньская. Каждая точка на схеме соответствует одной или нескольким территориально-пробным площадям, а ее номер – позиции в базе данных.

блоковыми фиктивными переменными  $X_0, \dots, X_{28}$  [3], которые включены в структуру регрессионной модели фитомассы, имеющей общий вид [8]:

$$\ln(P_i/M) = f(X_0, \dots, X_{28}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N) \quad (1)$$

или [8, 12]:

$$\ln P_i = f(X_0, \dots, X_{28}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln M), \quad (2)$$

где  $P_i$  – фитомасса в абс. сухом состоянии стволов с корой, коры стволов, скелета ветвей, хвои, корней и нижних ярусов растительности (соответственно  $P_S, P_{SB}, P_B, P_F, P_R$  и  $P_U$ ), т/га;

$M$  – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;

$A$  – возраст древостоя, лет;

$H$  – средняя высота деревьев, м;

$D$  – средний диаметр, см;

$N$  – число стволов, тыс. экз./га.

От использования интегрального показателя полноты, обычно применяемого при оценке запасов стволовой древесины, в нашем исследовании пришлось отказаться. Большая информативность густоты по сравнению с полнотой при оценке фитомассы полога древостоев была статистически доказана еще С.Б. Байзаковым [2, 7]. В развитие этого положения и в ориентации на многофункциональное применение регрессионных моделей фитомассы древостоев было показано [8], что плотность древостоя в таких моделях опосредуется не одной переменной, а двумя ортогональными составляющими – густотой и средним диаметром стволов. Поэтому при одной и той же полноте, но диаметрально противоположных сочетаниях густоты и среднего диаметра ствола фитомасса полога древостоя может различаться в два-три раза.

Схема кодировки регионов и конкретный вид уравнений (1) – (2) аналогичны таковым для лиственницы [10]. Коэффициенты  $R^2$  для независимых переменных в (1) – (2)  $\ln(P_S), \ln(P_{SB}), \ln(P_F/M), \ln(P_B/M), \ln(P_R/M), \ln(P_U/M)$  составили соответственно 0,98; 0,96; 0,79; 0,71; 0,40; 0,65.

Поскольку уравнения (1) – (2) работают по принципу «Что будет, если...?», для получения запасов фитомассы в том или ином регионе мы совместили их с набором массоопределяющих показателей  $A, H, D, N$  и запасов  $M$ , характерных для региона, согласно цепочке взаимозависимых уравнений:

$$\begin{aligned} \ln H = f(X_0, \dots, X_{28}, \ln A) \rightarrow \ln D = f(X_0, \dots, X_{28}, \ln A, \ln H) \rightarrow \\ \rightarrow \ln N = f(X_0, \dots, X_{28}, \ln A, \ln H, \ln D) \rightarrow \ln M = f(X_0, \dots, X_{28}, \ln H, \ln D, \ln N). \quad (3) \end{aligned}$$

Независимые переменные уравнений (3) объясняют 83 ... 96 % изменчивости массообразующих показателей и запаса стволов. Если с помощью системы уравнений (1) – (2) оценивается достоверность региональных

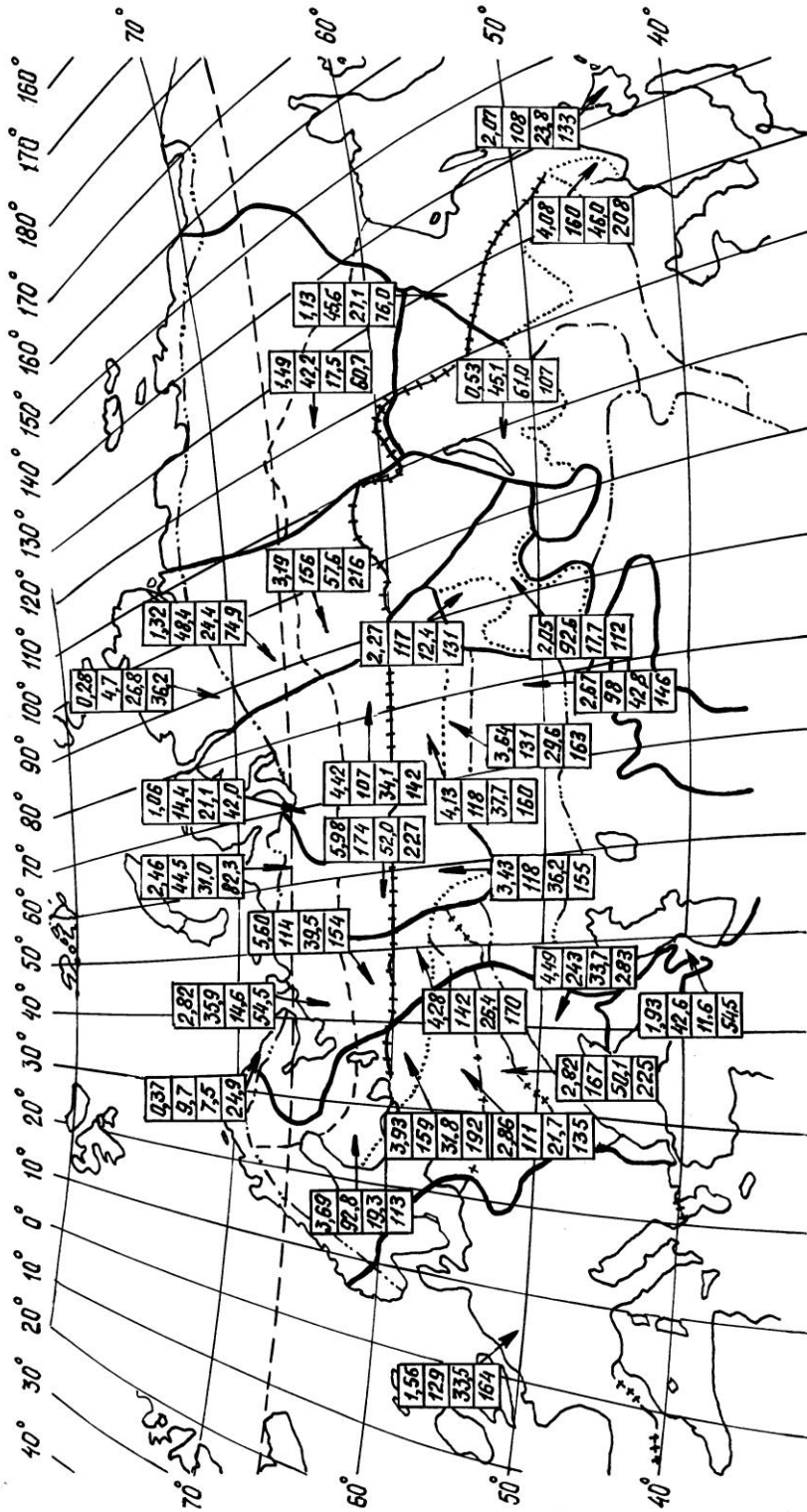


Рис. 2. Расчетные показатели фракционного состава фитомассы 55-летних березняков в 29 регионах Северной Евразии. Цифры в колонках (сверху вниз) означают запасы фитомассы по фракциям, соответственно: листвы, общей надземной, корней и общей (надземной и подземной). Выделенные регионы обозначены на рис. 1

различий в структуре фитомассы при условии равенства массообразующих показателей, то система (3) обуславливает достоверность региональных различий самих массообразующих показателей, накапливая вклад каждого из них в конечный результат – запас стволов.

Последовательным табулированием рекурсивных систем уравнений (3) и (1) – (2) по задаваемым значениям возраста получены возрастные тренды всех массообразующих показателей и запасов фитомассы по фракциям для каждого региона, которые можно рассматривать в качестве специфических характеристик видов *Betula* и использовать для сопоставления их биопродуктивности. Закономерности накопления фитомассы с возрастом в березняках различаются по регионам: в более жестких климатических условиях полярного пояса (лесотундра востока Русской равнины и Западно-Сибирской провинции) максимум фитомассы приходится на возрастную диапозону 65 ... 95 лет, а в подзоне широколиственных лесов Европы и Японии на 115 ... 135 лет. В целом в древостое возраста 15 лет запасы фитомассы березы составляют 32 ... 59, в 25 – 56 ... 78, в 35 – 75 ... 88, в 135 лет – 81 ... 118 % к запасам в возрасте 55 лет. Наибольшие запасы массы листвы приходятся на возраст 95 ... 115 лет во всех регионах лесной зоны кроме полярного пояса, где они стабилизируются и остаются примерно на одном уровне после 15 ... 25 лет.

Из упомянутых возрастных трендов взяты показатели надземной и общей фитомассы для возраста 55 лет (рис. 2) и проанализированы в связи с природной зональностью и континентальностью климата (зональный и провинциальный градиенты). Запасы фитомассы в общих чертах соответствуют общей схеме профиля продуктивности [5]. По широтному градиенту (см. рис. 2) профиль продуктивности фитомассы оказался наиболее четко выражен в меридиональном диапазоне 35 ... 45° в. д. (Скандинавско-Русская и Кавказско-Малоазиатская провинции), где фитомасса закономерно увеличивается от 113 т/га в средней тайге до 225...283 т/га в подзонах широколиственных лесов и степи, а далее к югу (Кавказско-Малоазиатская провинция) снижается до 56 т/га. Последовательное возрастание запасов фитомассы от лесотундры и северной тайги к югу происходит в провинциях востока Русской равнины, Уральской, Среднесибирской и Дальнего Востока (см. рис. 2). В Западно-Сибирской провинции общая фитомасса березняков возрастает от 42 т/га в северной тайге до 160 ... 163 т/га в южной тайге и лесостепи с последующим снижением до 146 т/га в подзоне степи.

Упомянутые показатели фитомассы из возрастных трендов (за исключением полярного пояса) сопоставлены с индексами континентальности (рис. 3), снятыми со схемы ее изолиний, построенной с использованием формулы С. П. Хромова [11]. Связь надземной фитомассы березы ( $P_{abo}$ , т/га) с индексом континентальности  $IC$  описывается уравнением

$$\ln P_{abo} = 3,3909 + 1,6968 (\ln IC) - 0,3432 (\ln IC)^2; R^2 = 0,448 \quad (4)$$

Рис. 3. Связь расчетных по уравнениям (1)–(3) показателей надземной (1) и общей (2) фитомассы 55-летних березняков с индексом континентальности климата (по С.П. Хромову [11])



и общей фитомассы ( $P_{tot}$ , т/га) –

$$\ln P_{tot} = 4,3991 + 1,1039 (\ln IC) - 0,2404 (\ln IC)^2; R^2 = 0,426, \quad (5)$$

которые действительны при  $IC > 35 \dots 40$ . Таким образом, индекс континентальности климата объясняет изменчивость надземной и общей (надземной и подземной) фитомассы березы соответственно на 45 и 43 %.

Результаты табулирования (4) – (5) показывают (см. таблицу), что по мере ухудшения климатических условий роста и соответственно возрастания индекса континентальности от 30 до 100 % последовательно снижается надземная фитомасса березы от 180 до 51 т/га и подземная – от 36 до 29 т/га, а отношение подземной фитомассы к надземной возрастает от 0,20 до 0,58.

Таким образом, сформированная база данных о фитомассе березы дала возможность рассчитать многофакторные регрессионные модели фитомассы, совместить их с возрастными трендами массообразующих показателей, полученными только по материалам сформированной базы данных, и впервые для березняков Северной Евразии выявить зонально-провинциаль-

#### Соотношение фракций фитомассы березняков Северной Евразии в возрасте 55 лет в связи с индексом континентальности климата

Индекс континентальности	Фитомасса, т/га		Отношение $P_{root} / P_{abo}$
	надземная $P_{abo}$	подземная $P_{root}$	
30	180	36	0,20
40	145	36	0,25
50	119	36	0,30
60	98	35	0,36
70	82	34	0,41
80	69	32	0,47
90	59	31	0,52
100	51	29	0,58

ные закономерности изменения их фитомассы. Подтверждены результаты, ранее полученные для лиственницы [9]: фитомасса, как надземная, так и общая, закономерно изменяется по провинциальному градиенту, снижаясь от атлантического побережья в направлении полюса континентальности в районе Якутска и затем вновь возрастая в направлении тихоокеанского побережья. До сих пор подобной закономерности не было выявлено даже при традиционном таксационном районировании по запасу стволовой древесины. Установлено также соответствие между запасами фитомассы березняков и «профилем продуктивности» по зональному градиенту [5]. Многовариантность применения изложенной методологии и упомыная многофункциональность разработанной системы моделей обсуждались ранее [8–10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н. И., Родин Л. Е.* Картограммы продуктивности и биологического круговорота главнейших типов растительности суши // Изв. ВГО. – 1967. – Т. 99, № 3. – С. 190–194.
2. *Байзаков С. Б.* Некоторые закономерности накопления древесной зелени в сосновых лесах Казахстана и перспективы ее промышленного использования: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. – Алма-Ата: КазСХИ, 1969. – 28 с.
3. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
4. *Курнаев С. Ф.* Лесорастительное районирование СССР. – М.: Наука, 1973. – 203 с.
5. *Лавренко Е. М., Андреев В. Н., Леонтьев В. Л.* Профиль продуктивности надземной части природного растительного покрова СССР от тундр к пустыням // Ботанич. журн. – 1955. – Т. 40, № 3. – С. 415 – 419.
6. *Смагин В. Н.* и др. Лесохозяйственное районирование Сибири / В. Н. Смагин, И. В. Семечкин, Н. П. Поликарпов и др. // Лесные растительные ресурсы Сибири. – Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1978. – С. 5–23.
7. *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.
8. *Усольцев В. А.* Формирование банков данных о фитомассе лесов. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1998. – 541 с.
9. *Усольцев В. А.* Биологическая продуктивность лиственниц Евразии в связи с зональностью и континентальностью климата // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск: СибГТУ, 2000. – С. 228–236.
10. *Усольцев В. А., Колтунова А. И.* Оценка запасов углерода в фитомассе лиственничных экосистем Северной Евразии // Экология. – 2001. – № 4. – С. 258–266.
11. *Хромов С. П.* К вопросу о континентальности климата // Изв. ВГО. – 1957. – Т. 89, № 3. – С. 221–225.
12. *Monserud R. A., Onuchin A. A., Tchebakova N. M.* Needle, crown, stem and root phytomass of *Pinus sylvestris* stands in Russia // Forest Ecol. Manage. – 1996. – Vol. 82. – P. 59–67.



---

13. *Whittaker R. H., Likens G. E., Lieth H.* Scope and purpose of this volume // Ecological studies: Analysis and synthesis. – 1975. – Vol. 14. – P. 3–4.

Уральский государственный  
лесотехнический университет

Поступила 04.01.02

*V.A. Usoltsev, Yu.V. Usoltseva, S.V. Zalesov*

**Geographical Regularities of Birch Phytomass Distribution  
in Northern Eurasia**

Database on birch phytomass has been formed consisting of 476 definitions covering the territory between England and Japan. Systems of recursive equations have been estimated both for mass-forming indices and phytomass differentiated for 29 regions of Northern Eurasia. The lowering of birch phytomass is stated caused by hardening the climatic conditions according to zone and province grades.

---