

Изменение структуры фитомассы деревьев сосны (подрод *Pinus*) в трансконтинентальных градиентах Евразии

В.А. Усольцев, д.с.-х.н., профессор, **В.А. Азарёнок**, д.с.-х.н., профессор, **К.С. Субботин**, аспирант, ФГБОУ ВПО Уральский ГЛТУ; **А.И. Колтунова**, д.с.-х.н., профессор, ФГБОУ ВПО Оренбургский ГАУ

При оценке фитомассы насаждений в настоящее время общепринятым является регрессионный метод, на основе которого рассчитываются аллометрические уравнения фитомассы по результатам взятия модельных деревьев, представленных во всём диапазоне диаметров стволов. Опубликовано множество аллометрических уравнений для оценки фракций фитомассы дерева, различающихся по структуре и поэтому несопоставимых по древесным породам и регионам. Опубликованные сводки аллометрических уравнений содержат в себе фактические данные о фитомассе многих сотен тысяч деревьев разных пород мира, однако они недоступны для использования и географического анализа. Поэтому необходима база данных о фактической структуре фитомассы деревьев, полученной на лесных пробных площадях, на основе которой можно исследовать трансконтинентальные закономерности структуры фитомассы на уровне отдельного дерева. Такая база данных о фитомассе двухвойных сосен (подрод *Pinus*) в количестве 2540 модельных деревьев, взятых на 320 пробных площадях (200 – в естественных насаждениях и 120 – в культурах), нами сформирована с использованием 44 (24 для естественных насаждений и 20 – для культур) литературных источников.

Цель настоящего исследования – на основе сформированной базы данных установить закономерности изменения структуры фитомассы деревьев сосны (кг) по трансевразийским градиентам.

Объекты и методы исследования. Пробные площади, на которых выполнено определение фитомассы деревьев, позиционированы нами по зональным поясам [1] на карте-схеме Евразии (рис. 1) и соотнесены с индексом континентальности на карте-схеме изоконт (рис. 2), рассчитанных по В. Ценкеру [2].

На основе содержательного анализа многофакторного массива эмпирических данных фитомассы деревьев нами предложена структурная форма регрессионной модели [4]:

$$\ln P_i = f(\ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln Vt, \ln(Zon), \ln(ICC)), \quad (1)$$

где P_i – фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои, надземной части и корней (соответственно P_{st} , P_{br} , P_f , P_a и P_r), кг;
 Vt – объём ствола в коре, dm^3 ;

A – возраст дерева, лет;
 H – высота дерева, м;
 D – диаметр ствола на высоте груди, см;
 N – густота древостоя, тыс. экз/га;
 Zon – номер зонального пояса (рис. 1);
 ICC – индекс континентальности климата по Ценкеру – Борису (рис. 2).

Известно, что продуктивность древесного ценоза определяется по соотношению его возраста и высоты, что положено в основу бонитировки лесных древостоев по специальным бонитетным шкалам [3]. Поэтому в качестве базовой была принята зависимость $H = f(A)$. Рекурсивный принцип регрессионного моделирования обеспечивает последовательное накопление возрастных трендов массообразующих показателей и фитомассы деревьев по цепочке взаимозависимых уравнений [5], когда региональные различия предшествующей зависимости кумулятивно накладываются на предыдущий результат [3, 6], и завершается последовательность зависимостью $P_i = f(A, H, D, N, Vt, Zon, ICC)$. Итоговая система уравнений имеет общий вид:

$$\begin{aligned} H = f(A, Zon, ICC) \rightarrow D = f(A, H, Zon, ICC) \rightarrow \\ \rightarrow N = f(A, H, D, Zon, ICC) \rightarrow \\ \rightarrow Vt = f(A, H, D, N, Zon, ICC) \rightarrow P_i = f \\ (A, H, D, N, Vt, Zon, ICC). \end{aligned} \quad (2)$$

Все переменные подвергнуты логарифмической трансформации, поскольку без этой процедуры система уравнений (2) на крайних значениях независимых переменных даёт существенные искажения вследствие нелинейности исследуемых зависимостей [6]. Чтобы фракционный состав

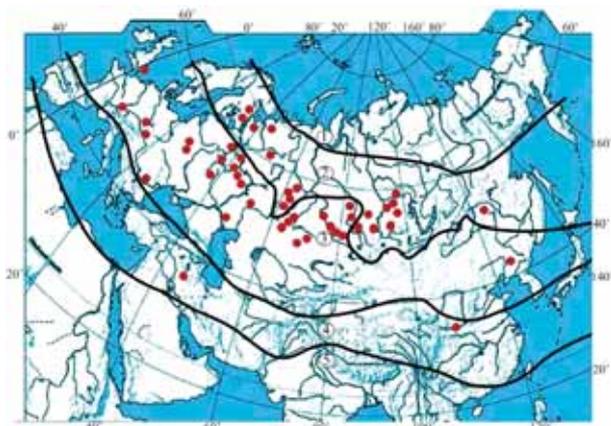


Рис. 1 – Распределение пробных площадей, на которых определена фитомасса деревьев сосны, по зональным поясам: 1 – субарктический; 2 – северный умеренный; 3 – южный умеренный; 4 субтропический; 5 – субэкваториальный [1]

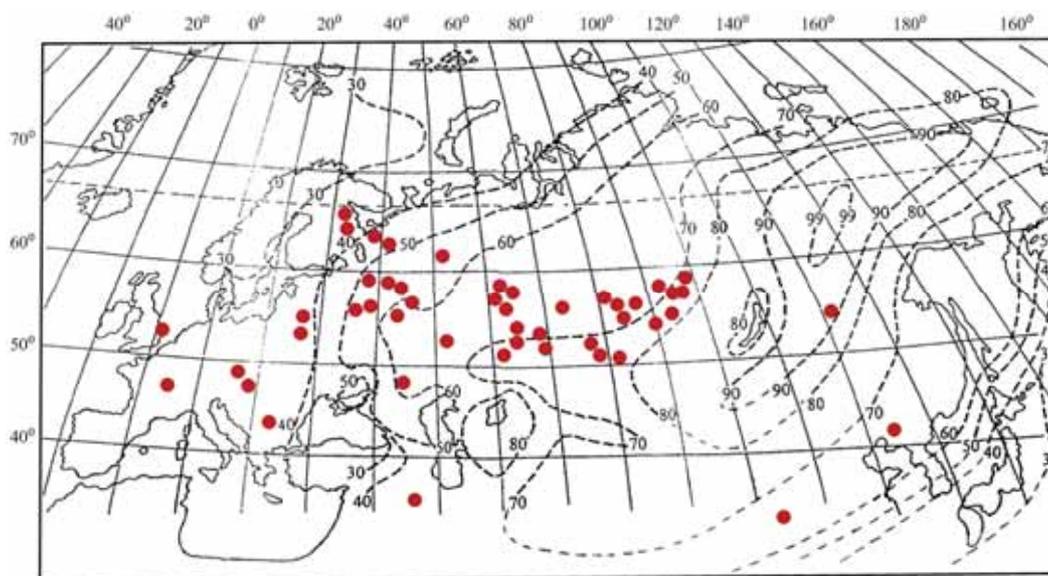


Рис. 2 – Карта-схема изолиний континентальности климата Евразии, рассчитанных А.А. Борисовым [2] по упрощённой формуле В. Ценкера с нанесённым положением пробных площадей, на которых выполнено определение фитомассы деревьев в сосновых насаждениях

Характеристика системы уравнений (2)

| Зависимые переменные | Константы и независимые переменные | | | | | | | |
|----------------------|------------------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| | a_0 | $a_1(\ln A)$ | $a_2(\ln A)^2$ | $a_3(\ln H)$ | $a_4(\ln H)^2$ | $a_5(\ln D)$ | $a_6(\ln D)^2$ | $a_7(\ln N)$ |
| $\ln(H)$ | -0,7733 | 1,6356 | -0,1074 | – | – | – | – | – |
| $\ln(D)$ | 2,2240 | -1,4203 | 0,1855 | 1,2554 | – | – | – | – |
| $\ln(N)$ | -5,993 | 5,4729 | -0,7522 | -3,2095 | 0,4528 | 0,4378 | -0,2002 | – |
| $\ln(Vt)$ | -2,1564 | – | – | 0,7851 | – | 1,8535 | – | -0,0415 |
| $\ln(Pa)$ | 2,0516 | 0,0370 | – | -0,5048 | – | 0,0760 | – | – |
| $\ln((Pf/Pa) 100)$ | 6,6937 | -0,9011 | 0,0530 | -1,7390 | – | 0,4156 | – | 0,0273 |
| $\ln((Pbr/Pa) 100)$ | 5,3789 | 1,1287 | -0,1592 | -2,1380 | – | 0,7084 | – | -0,7503 |
| $\ln((Pst/Pa) 100)$ | 2,2356 | 0,7635 | -0,0874 | 0,5001 | – | -0,0325 | – | 0,0386 |
| $\ln((Pr/Pa) 100)$ | 2,3259 | 1,4222 | -0,1944 | 0,1851 | – | 0,4009 | – | -0,2738 |

| Зависимые переменные | Константы и независимые переменные | | | | | R2* | SE* |
|----------------------|------------------------------------|---------------|------------------|--------------------|------------------|-------|------|
| | $a_8(\ln N)^2$ | $a_9(\ln Vt)$ | $a_{10}\ln(Zon)$ | $a_{11}\ln(Zon)^2$ | $a_{12}\ln(ICC)$ | | |
| $\ln(H)$ | – | – | 0,1401 | – | -0,3662 | 0,593 | 0,47 |
| $\ln(D)$ | – | – | -2,6632 | 1,4960 | 0,2037 | 0,933 | 0,27 |
| $\ln(N)$ | – | – | 5,2636 | -2,9236 | 0,0886 | 0,763 | 0,87 |
| $\ln(Vt)$ | – | – | 1,0401 | -0,5719 | -0,1239 | 0,994 | 0,15 |
| $\ln(Pa)$ | – | 1,06889 | -1,5342 | 0,8195 | -0,3507 | 0,992 | 0,17 |
| $\ln((Pf/Pa) 100)$ | -0,0123 | 0,2240 | -1,0582 | 0,5845 | 0,1183 | 0,771 | 0,39 |
| $\ln((Pbr/Pa) 100)$ | – | 0,2986 | -4,7656 | 2,4687 | -0,1211 | 0,574 | 0,36 |
| $\ln((Pst/Pa) 100)$ | – | -0,1106 | – | -0,0289 | -0,0354 | 0,785 | 0,09 |
| $\ln((Pr/Pa) 100)$ | 0,1316 | -0,2172 | -4,0384 | 2,0780 | -0,1547 | 0,632 | 0,2 |

Примечание: *R² – коэффициент детерминации и SE – стандартная ошибка уравнения

расчётных значений фитомассы деревьев был сбалансирован (в соответствии с принципом аддитивности), показатель Pi в системе (2) модифицирован: он соответствует лишь надземной фитомассе Pa , а остальные фракции представлены относительными величинами (Pf/Pa) , (Pbr/Pa) , (Pst/Pa) и (Pr/Pa) , выраженными в процентах к надземной фитомассе.

Результаты исследования. Результаты последовательного расчёта констант уравнений (2) сведены в таблицу, согласно которой коэффициенты детерминации R² составили: для H , D , N и Vt соответственно 0,593, 0,933, 0,763 и 0,994, а для Pa , (Pf/Pa) , (Pbr/Pa) , (Pst/Pa) и (Pr/Pa) соот-

ветственно 0,992; 0,771; 0,574; 0,785 и 0,632. Все регрессионные коэффициенты при независимых переменных значимы на уровне P₉₅.

Полученная рекурсивная система уравнений (2) протабулирована в следующей последовательности. Вначале получены значения H по задаваемым величинам A , Zon , ICC , затем полученный тренд корректируется путём табулирования следующего уравнения – для D по полученным значениям H и тем же A , Zon , ICC , далее коррекция тренда осуществляется табулированием следующего уравнения – для N по полученным значениям H и D и тем же A , Zon , ICC , далее – для Vt и, наконец,

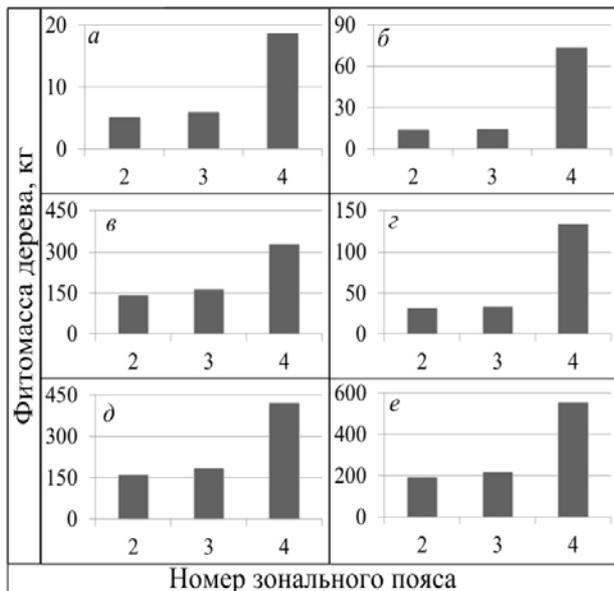


Рис. 3 – Изменение расчётных показателей фитомассы деревьев двухвойных сосен, кг: хвои (а), ветвей (б), стволов (в), корней (г), надземной (д) и общей (е) в возрасте 100 лет по климатическим поясам при индексе континентальности климата по Ценкеру – Борису, равном 75%

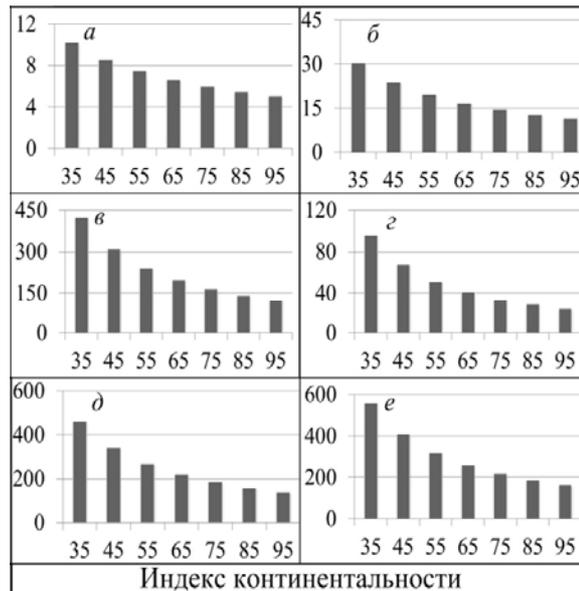


Рис. 4 – Связь расчётных показателей фитомассы деревьев двухвойных сосен (кг): хвои (а), ветвей (б), стволов (в), корней (г), надземной (д) и общей (е) в возрасте 100 лет с индексом континентальности, по Ценкеру – Борису, в южном умеренном климатическом поясе (№ 3 на рис. 1)

табулируются уравнения для Pa , (Pf/Pa) , (Pbr/Pa) , (Pst/Pa) и (Pr/Pa) по полученным значениям предыдущих уравнений системы (2).

Анализ полученных регрессионных коэффициентов при независимых переменных уравнений (2) в таблице позволяет сделать некоторые предварительные выводы. В частности, при фиксированном возрасте дерева его высота монотонно увеличивается в направлении с севера на юг и снижается в направлении от океанических побережий к полюсу континентальности в Якутии. Густота древостоев изменяется в направлении с севера на юг по колоколообразной кривой и монотонно возрастает в направлении от океанических побережий к полюсу континентальности.

Из полученных возрастных трендов Pa , Pf , Pbr , Pst и Pr , распределённых по трём зональным поясам (с 2-го по 4-й) и в каждом – по значениям индексов континентальности в диапазоне от 35 до 95, взяты значения фитомассы деревьев для возраста 100 лет и построены графики (рис. 3, 4).

Масса всех фракций дерева монотонно увеличивается в направлении с севера на юг. На рисунке 3 показано их изменение по зональным поясам для деревьев в возрасте 100 лет с учётом зональных различий деревьев по высоте, диаметру и объёму ствола, а также по густоте древостоев.

Динамика фитомассы 100-летних деревьев в направлении от океанических побережий к полюсу континентальности характеризуется монотонным снижением всех фракций, включая корни (рис. 4).

Последнее находится в противоречии с изменением фитомассы корней у деревьев лиственницы по градиенту континентальности климата [3], которая, в отличие от корней сосны, не снижается, а возрастает. Причины подобного противоречия пока неизвестны.

Выводы. Таким образом, впервые установлены трансконтинентальные зависимости фракционного состава фитомассы двухвойных сосен с учётом региональных различий деревьев по возрасту, высоте, диаметру и объёму ствола, а также по густоте древостоев. Система полученных трансконтинентальных уравнений (2) даёт возможность её регионального применения при оценке фитомассы сосны на 1 га на основе локальных данных перечёта деревьев на единице площади.

Литература

1. Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология. М.: МГУ, 1974. 300 с.
2. Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Просвещение, 1967. 296 с.
3. Орлов М.М. Лесная вспомогательная книжка для таксации и технических расчётов. М.: Государственное техническое издательство, 1928. 757 с.
4. Usoltsev V.A., Gavrilin D.S., Chasovskikh V.P. Transcontinental gradienti biomassa degli alberi nelle foreste di larici dell'Eurasia (Трансконтинентальные градиенты фитомассы деревьев в лиственничных лесах Евразии) // Italian Science Review. 2015. No. 6 (27). P. 38–42 (итал.). ISSN: 2308–832X. Indexed in Google Scholar (<http://www.ias-journal.org/archive/2015/june/Usoltsev1.pdf>).
5. Furnival G.M., Wilson R.W. Systems of equations for predicting forest growth and yield // Statistical Ecol. 1971. Vol. 3. P. 43–55.
6. Usoltsev V.A., Somogyi Z., Chasovskikh V.P., Noritsina Yu.V. Climatic Gradients of Biomass and Net Primary Production of Mixed Picea-Abies Forests in Eurasia // Environment and Natural Resources Research. 2014. Vol. 4. No 2. P. 102–114 (<http://dx.doi.org/10.5539/enrr.v4n2p102>).