

**В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, А.А. Осмирко, В.Ф. Ковязин,
В.П. Часовских, В.А. Азаренок, М.В. Азаренок, Н.И. Кузьмин**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АДДИТИВНОЙ СТРУКТУРЫ БИОМАССЫ
ДРЕВОСТОЕВ *PINUS L.*
В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ**

Введение. Биомасса лесов является ключевой экосистемной составляющей и важным компонентом глобального углеродного цикла. Она играет основополагающую роль в нашем понимании углеродного обмена между биотой и атмосферой в условиях антропогенного изменения климата [Ni et al., 2001].

Разработка моделей биомассы, чувствительных к изменению климата, ведется на уровнях как древостоев [Manogaran, 1973; Лит, 1974; DeLucia et al., 2000; Ni et al., 2001; Stegen et al., 2011; Fang et al., 2016], так и модельных деревьев [Forrester et al., 2017; Zeng et al., 2017]. Получен, например, уникальный результат по изменению надземной и подземной биомассы равновеликих деревьев лиственницы, произрастающей в пределах китайского ареала рода *Larix Mill.*, в связи с температурой и осадками. В результате введения в аллометрическую модель в качестве дополнительных независимых переменных показателей среднегодовой температуры и среднегодовых осадков установлено, что увеличение температуры на 1°C влечет увеличение надземной биомассы равновеликих деревьев на 0,9% и снижение подземной – на 2,3%, а увеличение осадков на 100 мм вызывает снижение надземной и подземной биомассы на 1,5 и 1,1% соответственно [Zeng et al., 2017].

Однако все текущие исследования подобного рода выполняются в пределах ограниченных экорегионов. Опубликованные фактические данные о биомассе насаждений подрода *Pinus L.*, произрастающего в Евразии [Усольцев, 2010; Usoltsev, 2013], создают предпосылку для выявления трансконтинентальных закономерностей. Эти данные имеются в открытом доступе в русскоязычном и англоязычном вариантах (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606> и <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>). В настоящем исследовании авторы впервые попытались разработать модель изменений аддитивной по фракционному составу биомассы насаждений подрода *Pinus L.* по трансевразийским гидротермическим градиентам, а именно, по осадкам и температуре воздуха. Аддитивность фракционного состава означает, что значения сово-

купной биомассы фракций, рассчитанные по соответствующим уравнениям, равны расчетной величине биомассы как результат табулирования общего уравнения (по совокупности фракций) [Dong et al., 2015].

Методика исследования. Из нашей базы взяты фактические данные биомассы (т/га), полученные на 2,46 тыс. пробных площадей, включая 1,48 – для естественных насаждений и 0,98 тыс. пробных площадей – для культур. Из их общего количества 86% приходится на *Pinus sylvestris* L.) и 14% – на остальные виды двухвойного подрода *Pinus* L. Места закладки пробных площадей охватывают практически весь ареал подрода (рис. 1). Выполнено их позиционирование относительно изолиний среднегодовой температуры января (рис. 2) и относительно изолиний среднегодовых осадков (рис. 3) и составлена цифровая матрица значений фракционного состава биомассы и таксационных показателей древостоев, соотнесенных с соответствующими значениями среднегодовой температуры и осадков, включенная затем в процедуру анализа.

С целью гармонизации искомой модели в терминах аддитивности авторами использован алгоритм, альтернативный ранее часто применяемому [Parresol, 2001; Návar et al., 2004], а именно трехшаговая схема, разработанная в Китае [Dong et al., 2015] и затем реализованная авторами на примере лиственничных насаждений Евразии [Усольцев и др., 2018].



Рис. 1. География мест закладки проб на территории Евразии для определения биомассы (т/га) в 2,46 тыс. насаждений двухвойных сосен

Fig. 1. The geography of the locations of sample plots on the territory of Eurasia with the aim of biomass (t/ha) measuring of 2460 two-needled pine stands

Результаты исследования. Исходная регрессионная модель имеет общий вид:

$$\ln P_i = a_{0i} + a_{1i}(\ln A) + a_{2i}(\ln A)^2 + a_{3i}(\ln M) + a_{4i}(\ln N) + a_{5i}X + a_{6i}[\ln(Tm + 40)] + a_{7i}[\ln(Tm + 40)]^2 + a_{8i}(\ln PRm) + a_{9i}(\ln PRm)^2 + a_{10i}[\ln(Tm + 40)](\ln PRm). \quad (1)$$

В модели (1) P_i – биомасса общая (P_i), надземная (P_a), подземная (P_r), кроны (P_{cr}), ствола с корой (P_{st}), хвои (P_f), скелета кроны (P_{br}), стволовой древесины (P_w) и стволовой коры (P_k), т/га; A – возраст древостоя, лет; M – стволовой запас, м³/га; N – число деревьев, тыс. экз/га; X – бинарная переменная, введенная для согласования биомассы естественных древостоев ($X = 0$) и культур сосны ($X = 1$); PRm – среднегодовые осадки, мм; Tm – среднегодовая температура января, °С. Поскольку на севере Евразии среднегодовая температура имеет минусовые значения, соответствующая независимая переменная модифицирована к виду $(Tm+40)$. В качестве температурного предиктора принята не среднегодовая температура, а средняя температура января, поскольку зимние температуры более чувствительны к изменениям климата [Laing, Vinyamin, 2013].

Характеристика уравнений (1) получена путем стандартного регрессионного анализа и, после введения поправок на логарифмическое преобразование [Baskerville, 1972] и потенцирование, дана в табл. 1. Уравнения (1) характеризуются показателем значимости не ниже 0,05. Они приведены к аддитивной форме по схеме, предложенной китайскими исследователями [Dong et al., 2015], и получена искомая трансконтинентальная модель, аддитивная по фракционному составу биомассы древостоев (табл. 2).

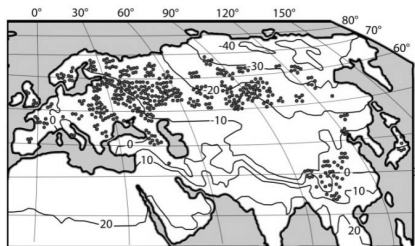


Рис. 2. Положение пробных площадей с определениями биомассы сосновых древостоев относительно изолиний среднегодовой температуры января, °С [World Weather Maps, 2007]

Fig. 2. The position of the sample plots with the measurements of pine stand biomass in relation to the contours of mean annual January temperature, °С [World Weather Maps, 2007]

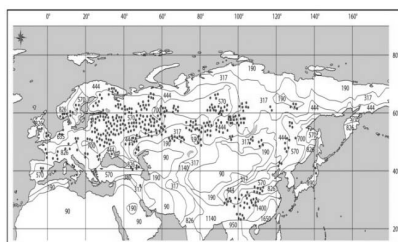


Рис. 3. Положение пробных площадей с определениями биомассы сосновых древостоев относительно изолиний среднегодовых осадков, мм [World Weather Maps, 2007]

Fig. 3. The position of the sample plots with the measurements of pine stand biomass in relation to the contours of mean annual precipitation, mm [World Weather Maps, 2007]

Таблица 1

Результаты регрессионного анализа уравнений (1)
Results of regression analysis of equations (1)

Фракция	Регрессионные коэффициенты модели										$adjR^2$ *	
P_i	41,8764	$A^{-0,0947}$	$A^{0,0191(\ln t)}$	$M^{0,8283}$	$N^{0,0072}$	$X^{-0,0347}$	$(Tm+40)^{-1,7081}$	$(Tm+40)^{0,0431 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{-0,1754}$	$PRm^{-0,0555 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,2542 \ln(PRm)}$	0,947
Шар 1												
P_a	22,8823	$A^{-0,2524}$	$A^{0,0397(\ln t)}$	$M^{0,8241}$	$N^{0,0065}$	$X^{-0,0499}$	$(Tm+40)^{-1,7443}$	$(Tm+40)^{0,0781 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{0,0069}$	$PRm^{-0,0547 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,2180 \ln(PRm)}$	0,951
P_r	2,05E-05	$A^{0,9526}$	$A^{-0,0951(\ln t)}$	$M^{0,6941}$	$N^{0,0777}$	$X^{0,0331}$	$(Tm+40)^{2,9224}$	$(Tm+40)^{-0,0952 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{0,8842}$	$PRm^{0,0237 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{-0,3447 \ln(PRm)}$	0,799
Шар 2												
P_{cr}	1,10E+06	$A^{-0,6671}$	$A^{0,0590(\ln t)}$	$M^{0,5288}$	$N^{-0,0528}$	$X^{-0,0008}$	$(Tm+40)^{-3,2616}$	$(Tm+40)^{-0,0174 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{-2,3831}$	$PRm^{0,0572 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,5547 \ln(PRm)}$	0,621
P_{st}	0,2990	$A^{0,3529}$	$A^{-0,0276(\ln t)}$	$M^{0,9205}$	$N^{0,0257}$	$X^{-0,0625}$	$(Tm+40)^{-1,4144}$	$(Tm+40)^{0,1821 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{0,5701}$	$PRm^{-0,0585 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,0584 \ln(PRm)}$	0,965
Шар 3а												
P_f	2,00E+05	$A^{-0,5871}$	$A^{0,0318(\ln t)}$	$M^{0,4393}$	$N^{0,0347}$	$X^{0,0306}$	$(Tm+40)^{-1,2510}$	$(Tm+40)^{-0,0071 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{-3,0048}$	$PRm^{0,2042 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,1945 \ln(PRm)}$	0,430
P_{br}	9,48E+04	$A^{-0,4754}$	$A^{0,0424(\ln t)}$	$M^{0,5825}$	$N^{-0,0836}$	$X^{-0,0026}$	$(Tm+40)^{-4,8746}$	$(Tm+40)^{0,0094 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{-1,1818}$	$PRm^{-0,1021 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,7994 \ln(PRm)}$	0,652
Шар 3б												
P_w	0,0393	$A^{0,5888}$	$A^{-0,0563(\ln t)}$	$M^{0,9291}$	$N^{0,0009}$	$X^{-0,1303}$	$(Tm+40)^{-1,1127}$	$(Tm+40)^{0,0328 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{0,8231}$	$PRm^{-0,0952 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,1504 \ln(PRm)}$	0,967
P_k	1,97E+19	$A^{0,4697}$	$A^{-0,0291(\ln t)}$	$M^{0,6603}$	$N^{-0,1812}$	$X^{-0,0792}$	$(Tm+40)^{-8,0281}$	$(Tm+40)^{0,7813 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{-1,3663}$	$PRm^{0,8013 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,4980 \ln(PRm)}$	0,785

Примечание: * $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число параметров.

Таблица 2

**Трехшаговая аддитивная модель фракционного состава фитомассы
древостоев сосны, реализованная по принципу пропорционального взвешивания**

**Three-step additive model of component composition of pine stand biomass,
implemented on the principle of proportional weighing**

	$Pt = 41,8764A^{-0,0947} A^{0,0191(\ln A)} M^{0,8283} N^{0,0072} X^{-0,0347} (Tm+40)^{-1,7081} \times \\ \times (Tm+40)^{0,0431 \ln(Tm+40)} PRm^{-0,1754} PRm^{-0,0555(\ln PRm)} (Tm+40)^{0,2542(\ln PRm)}$
Шар 1	$Pa = \frac{1}{1 + 8,95E-07A^{1,2051} A^{-0,1328(\ln A)} M^{-0,1300} N^{0,0742} X^{-0,0168} (Tm+40)^{4,6666} \times \\ \times (Tm+40)^{-0,1733 \ln(Tm+40)} PRm^{0,8773} PRm^{0,0784(\ln PRm)} (Tm+40)^{-0,5627(\ln PRm)}} Pt$
	$Pr = \frac{1}{1 + 1,12E+06 A^{-1,2051} A^{0,1328(\ln A)} M^{0,1300} N^{-0,0742} X^{0,0168} (Tm+40)^{-4,6666} \times \\ \times (Tm+40)^{0,1733 \ln(Tm+40)} PRm^{-0,8773} PRm^{-0,0784(\ln PRm)} (Tm+40)^{0,5627(\ln PRm)}} Pt$
Шар 2	$Pcr = \frac{1}{1 + 2,72E-07 A^{1,0200} A^{-0,0875(\ln A)} M^{0,3916} N^{0,0585} X^{0,0617} (Tm+40)^{1,8472} \times \\ \times (Tm+40)^{0,1995 \ln(Tm+40)} PRm^{2,9531} PRm^{-0,1157(\ln PRm)} (Tm+40)^{-0,4964(\ln PRm)}} Pa$
	$Pst = \frac{1}{1 + 3,68E+06 A^{-1,0200} A^{0,0875(\ln A)} M^{-0,3916} N^{-0,0585} X^{-0,0617} (Tm+40)^{-1,8472} \times \\ \times (Tm+40)^{-0,1995 \ln(Tm+40)} PRm^{-2,9531} PRm^{0,1157(\ln PRm)} (Tm+40)^{0,4964(\ln PRm)}} Pa$
Шар 3a	$Pcf = \frac{1}{1 + 0,4740 A^{0,1117} A^{0,0106(\ln A)} M^{0,1432} N^{-0,1183} X^{-0,0332} (Tm+40)^{-3,6237} \times \\ \times (Tm+40)^{0,0165 \ln(Tm+40)} PRm^{1,8230} PRm^{-0,3063(\ln PRm)} (Tm+40)^{0,6049(\ln PRm)}} Pcr$
	$Pbr = \frac{1}{1 + 2,1097 A^{-0,1117} A^{-0,0106(\ln A)} M^{-0,1432} N^{0,1183} X^{0,0332} (Tm+40)^{3,6237} \times \\ \times (Tm+40)^{-0,0165 \ln(Tm+40)} PRm^{-1,8230} PRm^{0,3063(\ln PRm)} (Tm+40)^{-0,6049(\ln PRm)}} Pcr$
Шар 3б	$Pw = \frac{1}{1 + 5,02E+20 A^{-0,1191} A^{0,0272(\ln A)} M^{-0,2688} N^{0,1802} X^{-0,0512} (Tm+40)^{-6,9154} \times \\ \times (Tm+40)^{0,7484 \ln(Tm+40)} PRm^{-12,1894} PRm^{0,8965(\ln PRm)} (Tm+40)^{0,3476(\ln PRm)}} Pst$
	$Pck = \frac{1}{1 + 1,99E-21 A^{0,1191} A^{-0,0272(\ln A)} M^{0,2688} N^{-0,1802} X^{0,0512} (Tm+40)^{6,9154} \times \\ \times (Tm+40)^{-0,7484 \ln(Tm+40)} PRm^{12,1894} PRm^{-0,8965(\ln PRm)} (Tm+40)^{-0,3476(\ln PRm)}} Pst$

Таблица 4

Характеристика рекурсивной системы вспомогательных уравнений для массобразующих показателей
 Characteristics of the recursive system of auxiliary equations for mass-forming indices

Массообразующие показатели	Регрессионные коэффициенты модели										$adjR^2*$
	300,3	$A^{-1,1206}$	—	—	$X^{-0,1297}$	$(Tm+40)^{3,3600}$	$(Tm+40)^{-0,6335 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{-1,0095}$	$PRm^{0,0222 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{0,0357 \ln(PRm)}$	
lnN	97,06	$A^{3,9791}$	$A^{-0,4309(\ln A)}$	$N^{-0,0907}$	$X^{0,2067}$	$(Tm+40)^{-10,4134}$	$(Tm+40)^{0,2147 \ln(Tm+40)}$	$PRm^{3,1242}$	$PRm^{-0,6942 \ln(PRm)}$	$(Tm+40)^{1,5281 \ln(PRm)}$	0,555
lnM											0,540

Примечание: * $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число параметров.

Таблица 3

Сравнительная характеристика адекватности исходных и искомых уравнений биомассы сосновых древостоев

Comparative characteristics of the adequacy of the initial and additive equations of pine stand biomass

Коэффициент детерминации	Фракции биомассы								
	<i>Pt</i>	<i>Pa</i>	<i>Pr</i>	<i>Pst</i>	<i>Pw</i>	<i>Pk</i>	<i>Pcr</i>	<i>Pbr</i>	<i>Pf</i>
Исходные уравнения									
R^2	0,936	0,932	0,726	0,945	0,934	0,551	0,568	0,576	0,323
Искомые уравнения									
R^2	0,936	0,932	0,729	0,942	0,928	0,583	0,566	0,575	0,326

Известно, что обеспечение согласованности (гармонизации) фракционного состава модели по аддитивному принципу не всегда повышает ее точность [Cunia, Briggs, 1984; Reed, Green, 1985]. Авторы попытались выявить степень адекватности итоговых уравнений (см. табл. 2) по отношению к системе исходных уравнений (1) (см. табл. 1). С этой целью те и другие протабулированы по эмпирическим показателям биомассы, и их расчетные значения сравнены с эмпирическими по величине коэффициента детерминации.

По данным табл. 3 трудно судить о преимуществах в точности той или иной из двух систем уравнений. Степень сходства полей распределения эмпирических данных по отношению к расчетным (рис. 4) довольно велика, и явные различия в структуре их остаточных дисперсий практически отсутствуют.

Табулирование полученной модели (1) с целью составления региональных таксационных нормативов возможно только по показателям возраста древостоя, температуры и осадков, а значения запаса и густоты получаем расчетным путем через рекурсивную систему дополнительных уравнений, имеющих общий вид:

$$N = f [A, X (Tm+40), PRm]; \quad (2)$$

$$M = f [A, N, X, (Tm+40), PRm]. \quad (3)$$

Результаты расчета (2) и (3), показанные в табл. 4, были затем протабулированы в последовательности (2), (3) и (1), и полученная таблица по своему объему оказалась слишком большой. Авторы взяли из неё показатели биомассы естественных сосняков в 100-летнем возрасте и построили «пропеллеро-образные» поверхности их зависимости от температуры и осадков (рис. 5).

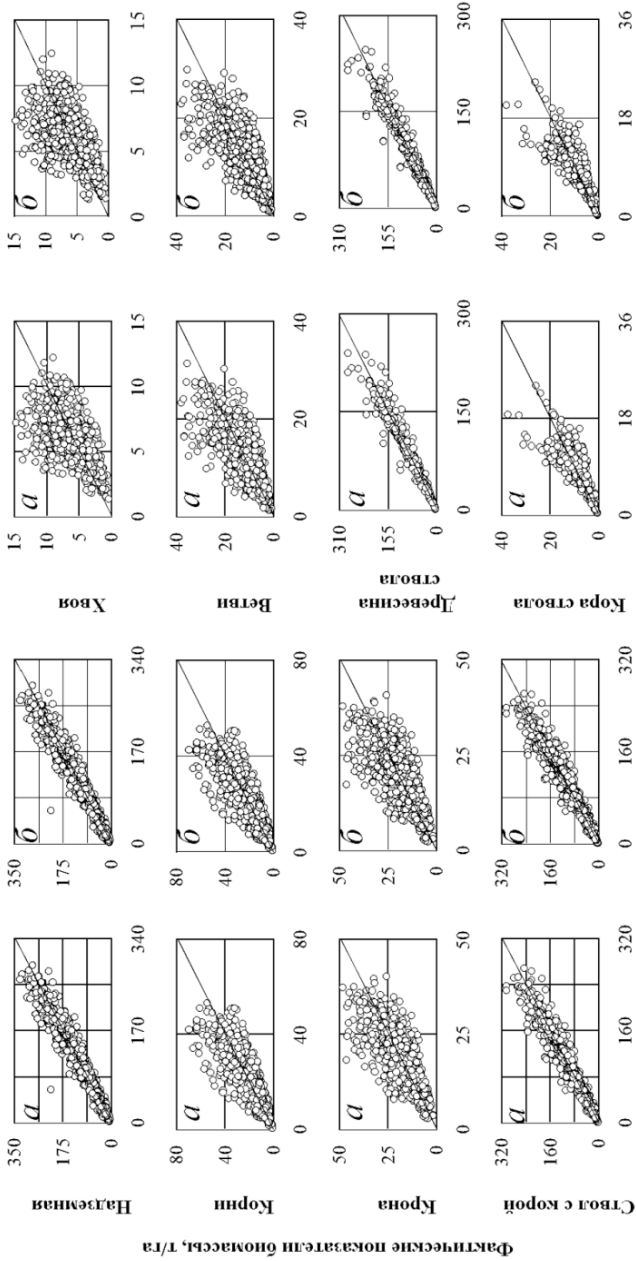


Рис. 4. Степень схождения полей распределения эмпирических данных по отношению к расчетным, показывающая фактическое отсутствие различий результатов, полученных по исходным (а) и искомым (б) уравнениям биомассы древостоев двухвойных сосен

Fig. 4. The degree of similarity of the distribution of harvest data in relation to the calculated data, showing the actual absence of differences in the results obtained with the initial (a) and the additive (b) biomass equations

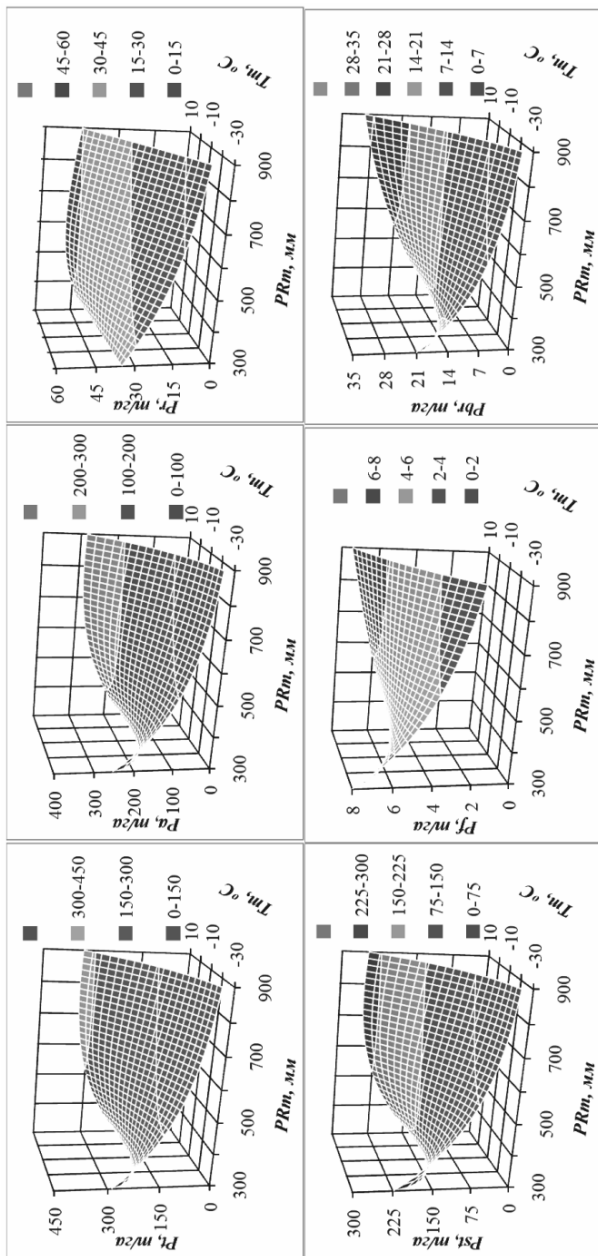


Рис. 5. Зависимость биомассы естественных сосняков Евразии от среднегодовой температуры (T_m) и осадков (PR_m). Обозначения: P_t , P_{st} , P_a , P_f , P_r и P_{br} – соответственно биомасса общая, стволов, надземная, хвой, корней и ветвей, т/га

Fig. 5. The dependence of the biomass of the natural pine forests of Eurasia upon the mean January temperature (T_m) and precipitation (PR_m). Designations: P_t , P_{st} , P_a , P_f , P_r and P_{br} – respectively biomass total, stems, aboveground, needles, roots and branches, t/ha

Судя по графикам, все фракции биомассы изменяются примерно по одной общей схеме, но в разных соотношениях. Общая для всех фракций закономерность: в холодных поясах ($T_m = -20\text{ }^\circ\text{C}$) увеличение осадков приводит к снижению биомассы, а в теплых ($T_m = 10\text{ }^\circ\text{C}$) – к ее увеличению. Соответственно во влагообеспеченных районах ($PRm = 900\text{ мм}$) повышение температуры вызывает увеличение биомассы, а в засушливых ($PRm = 300\text{ мм}$) – ее снижение.

Аналогичная общая закономерность была прослежена ранее на локальном уровне в болотных лесах Томского стационара, когда при максимальных суммах температур выше $10\text{ }^\circ\text{C}$ ($2200\text{ }^\circ\text{C}$) при увеличении осадков с 400 до 600 мм происходит повышение радиального прироста стволов на 30–50%, а при минимальных суммах температур ($1600\text{ }^\circ\text{C}$) с увеличением осадков в том же диапазоне радиальный прирост снижается на 4–9%. Соответственно при уровне осадков 400 мм с повышением сумм температур с 1600 до $2200\text{ }^\circ\text{C}$ радиальный прирост снижается на 14–20%, а при уровне осадков 600 мм в том же диапазоне температур повышается на 14–33% [Глебов, Литвиненко, 1976].

Подобная закономерность установлена на региональном уровне: в горах южной Сибири бонитет кедровых, пихтовых, лиственничных и сосновых древостоев при увеличении сумм температур (выше $10\text{ }^\circ\text{C}$) с $400\text{ }^\circ\text{C}$ до $1600\text{ }^\circ\text{C}$ повышается с Va до I класса, а при изменении индекса сухости с 1,0 до 0,2 снижается с I до Va класса. Более информативным оказался анализ связи класса бонитета с обоими климатическими факторами одновременно: «Если в холодных поясах (суммы температур ниже 800°) определяющей в производительности является термика, так как продуктивность меняется в направлении изменения сумм температур, то в теплых поясах (суммы температур выше 800°) изменение класса бонитета происходит по градиенту индекса сухости, что подтверждает ведущую роль фактора относительного увлажнения» [Поликарпов, Чебакова, 1982. С. 33–34]. А именно, при индексе сухости 0,2 с повышением сумм температур с $400\text{ }^\circ\text{C}$ до $1600\text{ }^\circ\text{C}$ бонитет у хвойных повышается с V до III класса, а при индексе сухости 1,0 при повышении сумм температур с 1200 до $1600\text{ }^\circ\text{C}$ снижается с II до III класса [Поликарпов, Чебакова, 1982].

Согласно результатам, полученным А.А. Молчановым (1976), в условиях севера Евразии наибольшее влияние на прирост годичного кольца оказывает температура воздуха, а в условиях южной лесостепи доминирующую роль играют осадки. Таким образом, наши результаты по измене-

нию структуры биомассы деревьев в двух климатических градиентах подтверждают закономерности, ранее установленные другими исследователями на локальном и региональном уровнях.

Для культур сосны названные закономерности сохраняются, но в абсолютных показателях биомасса культур выше: общая, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 16, 11, 18, 2 и 3%.

Полученные аддитивные модели биомассы древостоев двухвойных сосен дают возможность установить количественные изменения в ее структуре в связи с климатическими изменениями, в частности, изменениями среднегодовой температуры января и среднегодовых осадков. Процентное изменение структуры биомассы связано с соотношением названных двух климатических показателей. Для центральной части европейской России, российского Дальнего Востока и северо-восточного Китая, характеризующихся среднегодовой температурой января $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и среднегодовыми осадками 500 мм, повышение температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при неизменном уровне осадков вызывает увеличение биомассы сосен в возрасте 100 лет: общей, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 2,2; 1,8; 2,5; 0,36 и 2,3%, независимо от происхождения древостоев. Для тех же регионов в том же возрасте сосняков повышение осадков на 100 мм при неизменной среднегодовой температуре вызывает снижение биомассы общей, корней, стволов и хвои соответственно на 5,8; 2,3; 6,5 и 0,3% и увеличение биомассы ветвей на 0,3%.

Выводы. Таким образом, предпринятая первая попытка моделирования изменений аддитивного фракционного состава биомассы древостоев двухвойных сосен по трансевразийским гидротермическим градиентам с учетом региональной специфики показателей возраста и морфологии древостоев показала, что в холодных климатических поясах увеличение осадков приводит к снижению биомассы, а в теплых – к ее увеличению. Соответственно во влагообеспеченных районах повышение температуры вызывает увеличение биомассы, а в засушливых – ее снижение. Изложенное подтверждает ранее установленные закономерности других авторов на локальном и региональном уровнях.

Процентное изменение структуры биомассы связано с соотношением названных двух климатических показателей. В частности, для центральной части европейской России, российского Дальнего Востока и северо-восточного Китая, характеризующихся среднегодовой температурой января $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и среднегодовыми осадками 500 мм, повышение температуры на

1 °С при неизменном уровне осадков вызывает увеличение биомассы сосен в возрасте 100 лет: общей, корней, стволов, хвои и ветвей соответственно на 2,2; 1,8; 2,5; 0,36 и 2,3%, независимо от происхождения древостоев. Для тех же регионов в том же возрасте сосняков повышение осадков на 100 мм при неизменной среднегодовой температуре вызывает снижение биомассы общей, корней, стволов и хвои соответственно на 5,8; 2,3; 6,5 и 0,3% и увеличение биомассы ветвей на 0,3%.

Разработка подобных моделей для основных лесообразующих пород Евразии даст возможность прогнозировать изменения продуктивности лесного покрова Евразии в связи с изменениями климата.

Библиографический список

Глебов Ф.З., Литвиненко В.И. Динамика ширины годичных колец в связи с метеорологическими показателями в различных типах болотных лесов // Лесоведение. 1976. № 4. С. 56–62.

Лит Х. Моделирование первичной продуктивности Земного шара // Экология. 1974. № 2. С. 13–23.

Молчанов А.А. Дендроклиматические основы прогнозов погоды. М.: Наука, 1976. 168 с.

Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М. Оценка биологической продуктивности лесообразующих пород на экологической основе // Формирование молодянок хвойных пород: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1982. С. 25–54.

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>

Усольцев В.А., Кох Е.В., Часовских В.П., Колтунова А.И., Цепордей И.С. Повышение эффективности принятия решений при оценке углеродного пула лиственных лесов на основе компьютерного моделирования: аддитивные модели фитомассы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. Т. 71, № 3. С. 123–128. URL: http://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2018/izvestiya3_71.pdf

Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2 (1). P. 49–53. DOI: 10.1139/x72-009

Cunia T., Briggs R.D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14 (3). P. 376–384. DOI: 10.1139/x84-067

DeLucia E.H., Maherali H., Carey E.V. Climate-driven changes in biomass allocation in pines // Global Change Biology. 2000. Vol. 6 (5). P. 587–593. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00338.x

Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations // *Forest Science*. 2015. Vol. 61, no. 1. P. 35–45. DOI: 10.5849/forsci.13-193

Fang O., Yang Wang Y., Shao X. The effect of climate on the net primary productivity (NPP) of *Pinus koraiensis* in the Changbai Mountains over the past 50 years // *Trees*. 2016. Vol. 30. P. 281–294. DOI: 10.1007/s00468-015-1300-6

Forrester D.I., Tachauer I.H.H., Annighoefer P., Barbeito I., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G.W. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 396. P. 160–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>

Laing J., Binyamin J. Climate change effect on winter temperature and precipitation of Yellowknife, Northwest Territories, Canada from 1943 to 2011 // *American Journal of Climate Change*. 2013. Vol. 2. P. 275–283. DOI: 10.4236/ajcc.2013.24027

Manogaran C. Climatic limitations for tree growth potential in southern forests // *Southeastern Geographer*. 1973. Vol. 13, no. 2. P. 71–81. DOI: 10.1353/sgo.1973.0000

Návar Ch.J.J., González B.N., Graciano L.J.J., Dale V., Parresol B. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico // *Madera Bosques*. 2004. Vol. 10, no. 2. P. 17–28. DOI: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710202>

Ni J., Zhang X.-S., Scurlock J.M.O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests // *Annals of Forest Science*. 2001. Vol. 58 (4). P. 351–384. DOI: 10.1051/forest:2001131

Parresol B.R. Additivity of nonlinear biomass equations // *Canadian Journal of Forest Research*. 2001. Vol. 31, no. 5. P. 865–878. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x00-202>

Reed D.D., Green E.J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models // *Canadian Journal of Forest Research*. 1985. Vol. 15 (6). P. 1184–1187. DOI: 10.1139/x85-193

Stegen J.C., Swenson N.G., Enquist B.J., White E.P., Phillips O.L., Jorgensen P.M., Weiser M.D., Mendoza A.M., Vargas P.N. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20 (5). P. 744–754. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00645.x>

Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The 2nd ed., enlarged and re-harmonized. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>

World Weather Maps, 2007. URL: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather/> (дата обращения: 15.06.2018).

Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T. Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China // *European Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 136, is. 2. P. 233–249. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1024-9>

References

Glebov F.Z., Litvinenko V.I. Dinamika shiriny godichnykh kolets v svyazi s meteorologicheskimi pokazatelyami v razlichnykh tipakh bolotnykh lesov. *Lesovedenie*, 1976, is. 4, pp. 56–62. (In Russ.)

Lieth H. Modelirovanie pervichnoy produktivnosti Zemnogo shara. *Ekologiya*, 1974, is. 2, pp. 13–23. (In Russ.)

Molchanov A.A. Dendroklimaticheskie osnovy prognozov pogody. M.: Nauka, 1976. 168 s. (In Russ.)

Polikarpov N.P., Chebakova N.M. Otsenka biologicheskoy produktivnosti lesoobrazuyushchikh porod na ekologicheskoy osnove. *Formirovanie molodnyakov khvoynykh porod*: sb. nauch. tr. Novosibirsk: Nauka, 1982, pp. 25–54. (In Russ.)

Usol'tsev V.A. Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii. Ekaterinburg: UrO RAN, 2010. 570 p. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>. (In Russ.)

Usol'tsev V.A., Kokh E.V., Chasovskikh V.P., Koltunova A.I., Tsepordey I.S. Povyshenie effektivnosti prinyatiya resheniy pri otsenke uglerodnogo pula listvennichnykh lesov na osnove kompyuternogo modelirovaniya: additivnye modeli fitomassy. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, vol. 71, no. 3, pp. 123–128. URL: http://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2018/izvestiya3_71.pdf (In Russ.)

Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2 (1), pp. 49–53. DOI: 10.1139/x72-009

Cunia T., Briggs R.D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. *Canadian Journal of Forest Research*, 1984, vol. 14 (3), pp. 376–384. DOI: 10.1139/x84-067

DeLucia E.H., Maherali H., Carey E.V. Climate-driven changes in biomass allocation in pines. *Global Change Biology*, 2000, vol. 6 (5), pp. 587–593. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00338.x

Dong L., Zhang L., Li F. A three-step proportional weighting system of nonlinear biomass equations. *Forest Science*, 2015, vol. 61, no. 1, pp. 35–45. DOI: 10.5849/forsci.13-193

Fang O., Yang Wang Y., Shao X. The effect of climate on the net primary productivity (NPP) of *Pinus koraiensis* in the Changbai Mountains over the past 50 years. *Trees*, 2016, vol. 30, pp. 281–294. DOI: 10.1007/s00468-015-1300-6

Forrester D.I., Tachauer I.H.H., Annighoefer P., Barbeito I., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G.W. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*. 2017, vol. 396, pp. 160–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>

Laing J., Binyamin J. Climate change effect on winter temperature and precipitation of Yellowknife, Northwest Territories, Canada from 1943 to 2011. *American Journal of Climate Change*, 2013, vol. 2, pp. 275–283. DOI: 10.4236/ajcc.2013.24027

Manogaran C. Climatic limitations for tree growth potential in southern forests. *Southeastern Geographer*. 1973, vol. 13, no. 2, pp. 71–81. DOI: 10.1353/sgo.1973.0000

Návar Ch.J.J., González B.N., Graciano L.J.J., Dale V., Parresol B. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera Bosques*, 2004, vol. 10, no. 2, pp. 17–28. DOI: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710202>

Ni J., Zhang X.-S., Scurlock J.M.O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests. *Annals of Forest Science*, 2001, vol. 58 (4), pp. 351–384. DOI: 10.1051/forest:2001131

Parresol B.R. Additivity of nonlinear biomass equations // *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31, no. 5, pp. 865–878. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x00-202>

Reed D.D., Green E.J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Canadian Journal of Forest Research*, 1985, vol. 15(6), pp. 1184–1187. DOI: 10.1139/x85-193

Stegen J.C., Swenson N.G., Enquist B.J., White E.P., Phillips O.L., Jorgensen P.M., Weiser M.D., Mendoza A.M., Vargas P.N. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, vol. 20 (5), pp. 744–754. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00645.x>

Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The 2nd edition, enlarged and re-harmonized. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>

World Weather Maps, 2007. URL: <https://www.mapsofworld.com/referrals/wather/> (дата обращения: 15.06.2018).

Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T. Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China. *European Journal of Forest Research*, 2017, vol. 136, is. 2, pp. 233–249. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1024-9>

Материал поступил в редакцию 20.08.2018. г.

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Осмирко А.А., Ковязин В.Ф., Часовских В.П., Азаренок В.А., Азаренок М.В., Кузьмин Н.И. Моделирование аддитивной структуры биомассы древостоев *Pinus* L. в климатических градиентах Евразии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 225. С. 28–46. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.28-46

Биомасса лесов является ключевой экосистемной составляющей и важным компонентом глобального углеродного цикла. Разработка моделей биомассы, чувствительных к изменению климата, ведется сегодня на уровнях как древостоев, так и модельных деревьев. Однако все текущие исследования подобного рода выполняются в пределах ограниченных экорегионов.

Сформированная авторами база данных о биомассе насаждений подрода *Pinus* L., произрастающего в Евразии, в количестве 2460 пробных площадей использована в качестве основы для выявления трансконтинентальных закономерностей. Предпринята первая попытка разработать гармонизированную по структуре биомассы модель аддитивной по фракционному составу биомассы насаждений двухвойных сосен, изменяющейся по трансевразийским гидротермическим градиентам, а именно, по среднегодовым осадкам и средней январской температуре воздуха. Гармонизация обеспечена аддитивностью фракционного состава, когда суммарная биомасса стволов, ветвей, хвои и корней, полученная по «фракционным» уравнениям, равняется значению биомассы, полученной по общему уравнению. Показано, что в холодных климатических поясах увеличение осадков приводит к снижению биомассы большинства фракций, а в теплых – к ее увеличению. Соответственно во влагообеспеченных районах повышение температуры вызывает увеличение биомассы, а в засушливых – ее снижение. Геометрическая интерпретация полученной модели представлена «пропеллеро-образной» поверхностью, что согласуется с аналогичными закономерностями, ранее установленными в России на локальном и региональном уровнях. Предложенная модель аддитивной структуры биомассы сосновых древостоев дает возможность прогнозировать изменение структуры биомассы, связанное с одновременным повышением или понижением температуры января и годовых осадков.

Ключевые слова: двухвойные сосны Евразии, биомасса древостоев, аддитивные уравнения биомассы, среднегодовая температура января, среднегодовые осадки.

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Osmirko A.A., Kovyazin V.F., Chasovskikh V.P., Azarenok V.A., Azarenok M.V., Kuz'min N.I. Modeling of the additive biomass structure of *Pinus* L. stands in climatic gradients of Eurasia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2018, is. 225, pp. 28–46 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.28-46

Forest biomass is a key ecosystem part and an important component of the global carbon cycle. Modelling of biomass, sensitive to climate change, is fulfilled up-to-date at levels as forest stands and sample trees. However, all current studies of this matter are carried out within limited ecoregions. The database on forest biomass of the subgenus *Pinus* L. in Eurasia in a number of 2460 sample plots compiled by the authors is the basis for revealing transcontinental regularities. The first attempt is made to develop a biomass structure model harmonized by means of additive component composition algorithm describing biomass change in trans-Eurasian hydrothermal gradients, namely, mean annual precipitation and mean January air temperature. Additivity of biomass component composition means that the total of biomass components (stems, branches, foliage, roots) derived from component equations is

equal to the result obtained using the common biomass equation. It is stated that in cold climatic zones any increase in precipitation leads to corresponding decrease in the biomass values, but in warm zones – to its increase. In wet areas, the rise in temperature causes an increase of biomass values, but in arid areas – their reductions. Geometric view of this model represented by a «propeller-shaped» surface is consistent with the results, formerly revealed by the other authors in Russia on local and regional levels. The proposed transcontinental model of additive structure of forest biomass gives a possibility to predict the change of biomass structure in relation to simultaneous increase or decrease of January temperature and annual precipitation. The development of such models for basic forest-forming species grown in Eurasia enables to forecast any changes in the biological productivity of forest cover of Eurasia in relation to climate change.

Key words: two-needled pines of Eurasia, forest biomass, additive biomass model, mean January air temperature, mean annual precipitation.

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – профессор кафедры менеджмента и управления качеством Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, доктор сельскохозяйственных наук, заслуженный лесовод России.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

USOLTSEV Vladimir A. – DSc (Agricultural), professor of the Department of quality management, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

620100. Sibirskiy Trakt. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

ЦЕПОРДЕЙ Иван Степанович – аспирант Ботанического сада УрО РАН. 620144, ул. 8 Марта, д. 202а. г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

TSEPORDEY Ivan S. – PhD student at Botanical Garden of Ural Branch of RAS. 620144. 8 Marta str. 202a. Yekaterinburg. Russia. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

ОСМИРКО Анна Андреевна – аспирант Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

OSMIRKO Anna A. – PhD student, Ural State Forestry University.

620100. Sibirskiy Trakt. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

КОВЯЗИН Василий Федорович – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, академик МАНЭБ и РАЕН, доктор биологических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vfkedr@mail.ru

KOVYAZIN Vasily F. – DSc (Biology), Professor, academician of Russian Academy of Natural Sciences and MANEB, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vfkedr@mail.ru

ЧАСОВСКИХ Виктор Петрович – профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, член Российской академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, член Российской академии естественных наук, Full Member of European Academy of Natural History, директор Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: u2007u@yandex.ru

CHASOVSKIKH Viktor P. – DSc (Technical), Professor, Full Member of European Academy of Natural History, Director of the Institute of Economics and Management, Ural State Forest Engineering University.

620100. Sibirskiy Trakt. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: u2007u@yandex.ru

АЗАРЕНОК Василий Андреевич – профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства Института лесопромышленного бизнеса и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета, доктор сельскохозяйственных наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: v.azarenok@yandex.ru

AZARENOK Vasily A. – DSc (Agriculture), Professor of the Department of technology and equipment of timber industry on the Institute of timber business and road construction of the Ural State Forest Engineering University, professor.

620100. Sibirskiy Trakt. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: v.azarenok@yandex.ru

АЗАРЁНОК Максим Васильевич – доцент кафедры менеджмента и управления качеством Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета, кандидат сельскохозяйственных наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Azarenok_96@mail.ru

AZARENOK Maksim V. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Quality Management at the Ural State Forest Engineering University.

620100, Sibirskiy Trakt. 37. Yekaterinburg, Russia. E-mail: Azarenok_96@mail.ru

КУЗЬМИН Николай Иванович – доцент кафедры лесоводства и лесопаркового хозяйства Оренбургского государственного аграрного университета, кандидат сельскохозяйственных наук.

460014, ул. Челюскинцев, д. 18, г. Оренбург, Россия. E-mail: kuzmina.56@inbox.ru

KUZ'MIN Nikolay I. – PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of forestry on Orenburg State Agrarian University.

460014, Cheluskintsev str. 18. Orenburg, Russia. E-mail: kuzmina.56@inbox.ru