УДК 630*52:630*174.754

B.A. Усольцев^{1,2}, И.С. Цепордей², $B.\Pi.$ Часовских¹, A.A. Осмирко¹

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург ² Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

АДДИТИВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ И ДРЕВОСТОЕВ ЕВРАЗИИ. СООБЩЕНИЕ 3: РОД *Populus* L.

Ключевые слова: осиновые насаждения, биосферная роль лесов, фитомасса деревьев и древостоев, аллометрические модели, пробные площади, биологическая продуктивность, аддитивность уравнений, трансконтинентальные таблицы фитомассы.

Впервые на уникальных по объёму базам фактических данных о фитомассе деревьев и древостоев на примере рода *Populus* L. разработаны трансевразийские аддитивные модели фитомассы осины и тополей, и тем самым решена проблема совмещения аддитивности и всеобщности моделей. Модель фитомассы деревьев гармонизирована двояко: в ней устранена внутренняя противоречивость «фракционных» и общего уравнения, и кроме того, она учитывает региональные различия равновеликих деревьев как по величине общей, надземной и подземной фитомассы, так и по ее фракционной структуре. Аддитивная модель фитомассы древостоев гармонизирована также по двум уровням, один из которых обеспечивает принцип аддитивности фракций фитомассы, а второй связан с вводом «фиктивных» переменных, локализующих модель по экорегионам Евразии. Модель демонстрирует различия фитомассы древостоев не только по абсолютным ее значениям для стволов, хвои, ветвей и корней, но и по их соотношениям, т.е. по структуре фитомассы. Предложенные модели и соответствующие таблицы для оценки фитомассы деревьев и древостоев рода *Populus* дают возможность определения их фитомассы в различных экорегионах Евразии по данным измерительной таксации.

V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey, V.P. Chasovskikh, A.A. Osmirko

ADDITIVE REGIONAL MODELS OF TREE AND STAND BIOMASS FOR EURASIA. MESSAGE 3: GENUS *Populus* sp.

Key words: genus Populus sp., equations additivity, biosphere role of forests, biomass of trees and forests, allometric models, sample plots, biological productivity, transcontinental tables of biomass.

When using the unique in terms of the volumes of databases on the levels of a tree and stand of the genus *Populus* sp., the trans-Eurasian additive allometric models of biomass of trees and forests for Eurasia are developed for the first time, and thereby the combined problem of model additivity and generality is solved. The additive model of tree biomass of *Populus* is harmonized in two ways: it eliminated the internal contradictions of the component and the total biomass equations, and in addition, it takes into account regional differences of trees of equal sizes not only on total, aboveground and underground biomass, but also on its component structure, i.e. it reflects the regional peculiarities of the component structure of tree biomass. The additive model of forest biomass of *Populus* is harmonized in two levels too, one of which provides the principle of additivity of biomass components, and the second one is associated with the introduction of dummy independent variables localizing model for ecoregions of Eurasia.

В предыдущем и настоящем выпусках журнала «Эко-потенциал» впервые на уникальных по объёму базах фактических данных о фитомассе деревьев и древостоев на примере подрода *Pinus* L. (Усольцев и др., 2018) и родов *Larix* Mill. и *Betula* L. (настоящий выпуск) разработаны трансевразийские аддитивные модели фитомассы сосны, лиственницы и берёзы, и тем самым решена совмещенная проблема аддитивности и всеобщности моделей. Модели фитомассы деревьев и древостоев гармонизированы двояко: в них устранена внутренняя противоречивость «фракционных» и общего уравнения, и кроме того, они учитывают региональные различия как по величине общей, надземной и подземной фитомассы, так и по ее фракционной структуре.

В настоящей статье предпринята первая попытка разработки локализованных по регионам Евразии аддитивных аллометрических моделей фитомассы деревьев и древостоев осины и тополей (род $Populus\ L$.). Эти модели послужат основой для составления региональных трансевразийских нормативов для оценки фитомассы деревьев и древостоев осины и тополей.

Объекты и методы

Из впервые сформированной и опубликованной нами базы данных о фитомассе деревьев и древостоев лесообразующих пород Евразии (Усольцев, 2016; Usoltsev, 2013, 2016) взяты материалы в количестве соответственно 396 модельных деревьев и 212 древостоев пяти викарирующих видов рода *Populus L*. и распределены соответственно по 9 (табл. 1) и 10 (табл. 2) экорегионам, закодированным соответствующими блоками фиктивных переменных. Распределение пробных площадей, на которых измерена фитомасса модельных деревьев (кг), показано на рис. 1, а распределение пробных площадей, на которых определена фитомасса древостоев (т/га), - на рис. 2.

Таблица 1. Схема кодирования фиктивными переменными региональных массивов фактических данных фитомассы 396 деревьев осины и тополей.

| Реги- | Вид | | Блок фиктивных | | | | | | | , , | Диапазон | Число |
|-------|-----------------|------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------|----------|
| он* | Populus L. | переменных | | | | | мен | НЫ | X | диаметров | высот | наблюде- |
| OH | т ориназ Ц. | X_{l} | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | дерева, см | дерева, м | ний |
| ЕРт | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,0÷34,5 | 4,1÷25,6 | 44 |
| ЕРш | P. tremula L. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,0÷27,0 | 2,5÷26,3 | 17 |
| ЕРлс | P. tremula L. | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,2÷25,2 | 4,9÷28,0 | 11 |
| ЕРст | P. nigra L. | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,8÷25,2 | 5,0÷17,6 | 8 |
| Тст | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,5÷32,4 | 6,7÷23,2 | 38 |
| КАЗст | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4,9÷45,7 | 8,3÷21,2 | 79 |
| 3Слс | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | $0,7 \div 30,5$ | 2,2÷24,6 | 181 |
| 3Ст | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2,5÷11,0 | 3,7÷14,4 | 11 |
| ДВхш | P. davidiana D. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 9,8÷30,0 | 14,5÷28,8 | 7 |

^{*} Обозначения регионов здесь и далее: ЕРт — Европейская часть России, тайга; ЕРш — Европейская часть России, широколиственные леса; ЕРлс — Европейская часть России, лесостепь; Тст — Тургайский прогиб, степь; КАЗст — Казахский Мелкосопочник, степь; ЗСлс — Западная Сибирь, лесостепь; ЗСт — Западная Сибирь, южная тайга; ДВхш — Дальний Восток, хвойно-широколиственные леса.

Таблица 2. Схема кодирования региональных массивов фактических данных фитомассы 212 древостоев осины и тополей.

| | | | Бπ | ОК | ф | ик | ти | RH | ых | | | Диап | азоны: | | 11 |
|-------|------------------|---|------------------------------|-------------|-------|----|----|----|----|---|--------|------------------|-----------|---------------|-----------------|
| Реги- | Вид | | Блок фиктивных переменных | | | | | | | | воз- | густоты, | среднего | средней | Число наблю- |
| он* | Populus L. | V | | | X_4 | | | | | V | раста, | дений | | | |
| | | Λ | 1 12 | 11 3 | | | | | | | лет | экз/га | СМ | M | <u></u> |
| 3CE | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3÷57 | $0,64 \div 22,8$ | 1,9÷30,6 | $2,1\div28,6$ | 61 |
| ЕРсев | P. tremula L. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2÷85 | 37 | | | |
| ЕРюг | P. tremula L. | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10÷50 | 20 | | | |
| ЕРюг | P. alba L. | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11÷68 | 0,22÷12,5 | 0,3÷34,7 | 1,5÷26,0 | 9 |
| 3Ст | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6÷95 | 0,57÷30,5 | 2,1÷31,8 | 3,2÷29,6 | 14 |
| 3Сст | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10÷53 | $0,41 \div 26,3$ | 2,3÷31,0 | 4,0÷22,3 | 26 |
| ССсев | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8÷140 | $0,64 \div 22,8$ | 4,9÷24,5 | 13 | |
| ССюг | P. tremula L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 21÷90 | 0,80÷8,50 | 6,2÷23,5 | 7,4÷24,0 | 11 |
| ССюг | P. laurifolia L. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 10÷120 | $0,23 \div 7,87$ | 2,9÷38,3 | 4,0÷25,3 | 12 |
| Яп | P. davidiana D. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 11÷33 | 0,40÷1,24 | 16,0÷35,6 | 16,0÷23,8 | 9 |

*3СЕ – Западная и Средняя Европа, широколиственные леса; ЕРсев – Европейская часть России, север; ЕРюг – Европейская часть России, юг; ЗСст – Западная Сибирь, степь и лесостепь; ССсев – Средняя Сибирь, северная часть; ССюг – Средняя Сибирь, южная часть; Яп – Японские острова.



Рис. 1. Распределение пробных площадей, на которых выполнены измерения фитомассы (кг) 396 модельных деревьев осины и тополей (*Populus* L.) на территории Евразии.



Рис. 2. Распределение пробных площадей, на которых выполнены измерения фитомассы (т/га) 212 древостоев осины и тополей (*Populus* L.) на территории Евразии.

Анализ фитомассы деревьев и древостоев выполнен на основе аллометрических аддитивных регрессионных уравнений, структурированных согласно трехшаговой аддитивной системе (Tang et al., 2000; Dong et al., 2015) (см. рис. 3 в предыдущей статье настоящего выпуска).

Результаты и обсуждение

1 Аддитивная модель фитомассы на уровне деревьев

Рассчитаны исходные аллометрические модели

$$\ln P_i = a_i + b_i (\ln D) + c_i (\ln H) + d_i (\ln D) (\ln H) + \sum g_{ii} X_i, \tag{1}$$

где P_i — фитомасса i-й фракции, кг; D — диаметр ствола на высоте груди, см; H — высота дерева, м; i — индекс фракций фитомассы: общей (t), надземной (a), корней (r), кроны (c), ствола в коре (s), листвы (f), ветвей (b), древесины ствола (w) и коры ствола (bk); j — индекс (код) фиктивной переменной, от 0 до 8 (см. **табл. 1**). $\Sigma g_{ij}X_j$ — блок фиктивных переменных для i—й фракции фитомассы j—го экорегиона. Модель (1) после потенцирования имеет вид

$$P_i = e^{ai} D^{bi} H^{ci} D^{di(\ln H)} e^{\sum gijXj}. \tag{2}$$

По программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics выполнен расчет коэффициентов уравнений (1) и получена их характеристика, которая после введения поправок на логарифмическое преобразование по Г.Л. Баскервилю (Baskerville, 1972) и приведения ее к виду (2) дана в **табл. 3**. Все регрессионные коэффициенты уравнений (2) при численных переменных значимы на уровне вероятности $P_{0.95}$ и выше, и уравнения адекватны исходным данным.

Полученные согласно структуре (2) независимые (исходные) уравнения, приведённые в **табл. 3**, преобразованы в искомую модель аддитивной структуры фитомассы деревьев (**табл. 4**) по алгоритму трёхшагового пропорционального взвешивания, показанному в предыдущей статье настоящего выпуска. Модель действительна в диапазоне

фактических данных высоты и диаметра ствола модельных деревьев, приведенных в **табл. 1**. Путем табулирования полученной модели (**табл. 4**) по задаваемым значениям D и H и по значениям фиктивных переменных, локализующих общую модель по экорегионам, получены в итоге региональные нормативы, аддитивные по фракциям фитомассы и предназначенные для ее оценки в древостоях *Populus* на территории Евразии. В частности, для европейской части России подобный региональный норматив показан в **табл. 5.** Региональные особенности структуры фитомассы равновеликих деревьев *Populus* можно проследить на фрагменте трансконтинентальной таблицы для деревьев диаметром 14 см и высотой 14 м (**табл. 6**).

Таблица 6. Фрагмент аддитивной таблицы фитомассы для деревьев диаметром 14 см и высотой 14 м по экорегионам и соответствующим видам *Populus*.

| | 1 | • | | | | | | | 1 |
|------------------|---------|---------|---------|-------------|-----------|-------------------|---------|---------|---------|
| | | | Эко | регион и со | ответству | ощий вид <i>I</i> | Populus | | |
| Фракции фито- | EРт | ЕРш | ЕРлс | ЕРст | Тст | КА3ст | 3Слс | 3Ст | ДВхш |
| массы | Р. | P. | P. | P. nigra | P. | Р. | P. | P. | P. da- |
| | tremula | tremula | tremula | 1. mgra | tremula | tremula | tremula | tremula | vidiana |
| Общая фитомасса | 66,34 | 63,14 | 96,38 | 37,85 | 65,11 | 67,64 | 62,72 | 68,55 | 78,18 |
| Корни | 12,32 | 10,64 | 27,68 | 7,37 | 10,75 | 12,04 | 10,09 | 12,98 | 12,10 |
| Надземная | 54,02 | 52,50 | 68,70 | 30,48 | 54,36 | 55,60 | 52,63 | 55,57 | 66,08 |
| Крона | 11,11 | 10,96 | 16,67 | 3,74 | 11,21 | 8,51 | 11,62 | 10,11 | 16,93 |
| Листва | 2,41 | 2,45 | 3,74 | 0,56 | 1,71 | 1,27 | 2,20 | 1,93 | 3,04 |
| Ветви | 8,69 | 8,50 | 12,92 | 3,18 | 9,50 | 7,24 | 9,42 | 8,19 | 13,89 |
| Ствол в коре | 42,91 | 41,55 | 52,04 | 26,74 | 43,14 | 47,09 | 41,01 | 45,46 | 49,15 |
| Древесина ствола | 36,13 | 34,61 | 43,62 | 22,70 | 37,46 | 39,24 | 34,50 | 38,81 | 42,60 |
| Кора ствола | 6,78 | 6,93 | 8,42 | 4,04 | 5,69 | 7,85 | 6,51 | 6,65 | 6,55 |

По данным **табл.** 6 можно сделать вывод, что наибольшие значения общей фитомассы равновеликих деревьев имеют место у осины в лесостепи европейской России (96 кг) и у тополя Давида в Приморье (78 кг) и наименьшие – у тополя чёрного в степной зоне европейской России (38 кг), а в остальных регионах общая фитомасса находится в пределах от 63 до 69 кг. Наибольшая доля листвы в надземной фитомассе – у осины в лесостепи европейской России (5,4%), наименьшая – у тополя чёрного в степной зоне европейской России (1,8%) и у осины в Казахском мелкосопочнике (2,3%), а в остальных регионах колеблется в пределах от 3,1 до 4,7%.

Для случаев, когда невозможно замерить высоты деревьев на пробных площадях при расчетах фитомассы на единице площади древостоя с применением предложенной модели (2), рассчитано вспомогательное уравнение, скорректированное на логарифмическую трансформацию

$$H = 2,9814 D^{0,6425} e^{-0,0452XI} e^{0,0381X2} e^{-0,1823X3} e^{-0,0817X4} e^{-0,2589X5} e^{-0,0471X6} e^{-0,0068X7} e^{0,2090X8}; (3)$$

$$adj R^2 = 0,902.$$

Все регрессионные коэффициенты (3) при численных переменных значимы на уровне вероятности $P_{0,999}$.

С целью выяснить, достаточно ли адекватна полученная аддитивная модель и как ее характеристики соотносятся с показателями адекватности независимых уравнений, расчетные показатели фитомассы, полученные, с одной стороны, по независимым (исходным), а с другой стороны, по аддитивным уравнениям, сопоставлены с фактическими значениями фитомассы путем расчета коэффициента детерминации \mathbb{R}^2 . Для корректного сравнения адекватности независимых и аддитивных уравнений исходные данные приводим в сопоставимое состояние, т.е. независимые уравнения для всех фракций фитомассы рассчитываются по тем же данным, что и аддитивные уравнения для общей фитомассы. Характеристика таких «приведённых» уравнений дана в **табл. 7**.

Таблица 3. Характеристика независимых (исходных) аллометрических уравнений для фитомассы деревьев осины и тополей

| $adjR^2$ | 0,994 | | 0,994 | 0,971 | | 0,961 | 966'0 | | 0,930 | 0,959 | | 966'0 | 0.982 |
|------------------------------------|------------------------|---------|------------------------|---------------------|-------|-----------------------|------------------------|--------|------------------------------|----------------------|-----------------|----------------|---------------------|
| | e 0,1642 X8 | | e 0,1735.X8 | e -0,0462 X8 | | e 0,3873 X8 | e 0,1014.88 | | e 0,1899 X8 | e 0,4264 X8 | | e 0,0858 X8 | e -0,1138 X8 |
| | e 0,0328 X7 | 1 | ~ | e -0,0329 X7 | | e -0,1525 X7 | e -0,0015 X7 | | e -0,2932 X7 | e -0,1290 X7 | 1 | | e -0,1794 X7 |
| | e -0,0562 <i>X6</i> | | e 0,0260 X6 | e -0,1481 <i>X6</i> | | e 0,1093 X6 | e 0,0183 X6 | | e -0,0319 X6 | e 0,1412 X6 | | e -0,0282 X6 | e -0,0236 <i>X6</i> |
| | e 0,0194 X3 | | e 0,0167 X5 | e -0,0351 X5 | | e -0,2713 X5 | e 0,0879 X5 | | e -0,6476 X5 | e -0,1881 X5 | | e 0,0320 X5 | e 0,0955 X5 |
| уравнений | e -0,0188 X4 | | e 0,0306 X4 | e -0,1122 X4 | | e 0,0454 X4 | e 0,0412 X4 | | e -0,3015 X4 | e 0,1288 X4 | | e 0,0248 X4 | e -0,1880 X4 |
| Компоненты регрессионных уравнений | e -0,5612 X3 | IIIar 1 | e -0,5039 X3 | e -0,4457 X3 | Шar 2 | e -0,9788 X3 | e -0,3629 X3 | Har 3a | e -1,3208 X3 | e -0,8629 X3 | IIIar 36 | e -0,2999 X3 | e -0,3534 X3 |
| енты регр | e ^{0,3735 X2} | | e ^{0,1777 X2} | e 0,7464 X2 | | e 0,3773 X2 | e ^{0,1641} X2 | | e 0,3712.X2 | e 0,3282 X2 | | e 0,0926 X2 | e 0,1197 X2 |
| Компон | e -0,0495 XI | | e -0,0136 XI | e -0,1324 XI | | e 0,0270 XI | e ^{0,0082 XI} | | e 0,0606 XI | e 0,0206 XI | | e -0,0088 XI | e 0,0560 XI |
| | D 0,1166 (lnH) | | D 0,1701 (InH) | D 0,0271 (InH) | | $D^{0,1498 (\ln H)}$ | D 0,1760 (InH) | | $D^{0,0257~({ m In}H)}$ | $D^{0,1342~(\ln H)}$ | | D 0,1256 (InH) | D 0,2632 (InH) |
| | $H^{0,1743}$ | | $H^{0,0923}$ | H 0,0816 | | $H^{-2,4328}$ | $H^{0,6502}$ | | $\mid H^{	ext{-2,1274}}\mid$ | $ H^{-2,3390} $ | | $ H^{0,8344} $ | $ H^{0,1061} $ |
| | $D^{1,8140}$ | | $D^{1,7037}$ | D 1,9735 | | D 3,2505 | $D_{1,3706}$ | | | $D^{3,3723}$ | | | $D^{1,1325}$ |
| | 0,1549 | | 0,1424 | 0,0444 | | 0,4351 | 0,0586 | | 0,1430 | 0,2148 | | 0,0318 | 0,0417 |
| фитомассы Фитомассы | P_t | | P_a | P_r | | P_c | P_s | | P_f | P_b | | P_{w} | $ P_{bk} $ |

Таблица 4. Трехшаговая модель фракционного состава аддитивной фитомассы деревьев осины и тополей, реализованная по принципу пропорционального взвешивания

| | $Pt = 0,1549\ D^{1,8140}H^{0,1743}D^{0,1166(\ln H)}e^{-0,0495XI}e^{0,3735X2}e^{-0,5612X3}e^{-0,0188X4}e^{0,0194X5}e^{-0,0562X6}e^{0,0328X7}e^{0,1642X8}$ |
|-----|--|
| Шаг | $Pa = \frac{1}{1 + 0.4352 \ D^{\ 0.2010} H^{-0.1711} D^{-0.1079 (\ln H)}_{e^{\ -0.1114 XI}_{e^{\ 0.6467 XZ}_{e^{\ 0.1521 XZ}_{e^{\ 0.0963 XZ}_{e^{\ -0.0963 XZ}_{e^{\ -0.0466 XZ}_{e^{\ -0.1072 XG}_{e^{\ -0.0904 XZ}_{e^{\ -0.2088 XS}_{e^{\ -0.2088 XS}_{$ |
| - | $Pr = \frac{1}{1+2.2980\ D^{-0,2010}H^{0,1711}D^{0,1079(\ln H)}e^{0,1114XI}e^{-0,6467XZ}e^{-0,1521X3}e^{0,0963X4}e^{0,0466X5}e^{0,1072X6}e^{0,0904X7}e^{0,2088X8}$ |
| Mar | $Pc = \frac{1}{1 + 0.2955 \ D^{-1,6855} H^{2,3516} D^{0,1120 (\ln H)_e} \ 0,0866 \times I_e \ 0,1705 \times I_e \ 0,6860 \times I_e \ 0,0425 \times I_e \ 0,1628 \times I_e \ 0,1690 \times I_e \ 0,1210 \times I_e \ 0,0866 \times I_e \ 0,1705 \times I_e \ 0,1705 \times I_e \ 0,1628 \times I_e$ |
| 7 | $P_S = \frac{1}{1+3,3836\ D\ \text{i},6855} \\ H^{-2,3516}D^{-0,1120(\ln H)_e} - 0,0866 \\ XI_e^{-0,1705} \\ XI_e^{-0,6860} \\ XI_e^{-0,1628} \\ XI_e^{-0,1628} \\ XI_e^{-0,1628} \\ XI_e^{-0,1690} \\ XI_e^{-0,1628} \\ XI_e^{-0,1690} \\ XI_e^{-0,16$ |
| Mar | $Pf = \frac{1}{1 + 2.2088 \ D^{-0.2479} H^{-0.2134} D^{0.2413(lnH)}_{e^{-0.0386XI}_{e^{-0.5868XZ}_{e^{-0.3782X3}_{e^{-0.242X4}_{e^{-0.5242X4}_{e$ |
| 3a | $Pb = \frac{1}{1 + 0.4527 \ D^{\ 0.2479} H^{\ 0.2134} D^{\ -0.2413(\ln H)_e} 0.0386 \text{X} I_e \ 0.5868 \text{X} 2_e - 0.2242 \text{X} 4_e - 0.5258 \text{X} 5_e - 0.2149 \text{X} 6_e - 0.1991 \text{X} 7_e - 0.2350 \text{X} 8}$ |
| Mar | $P_{W} = \frac{1}{1 + 1,3091 \ D^{-0,3706} H^{-0,7283} D^{0,1376(\ln H)}_{e} \ 0,0648 X I_{e} \ 0,0270 X Z_{e}^{-0,0535 X Z_{e}} \ -0,2128 X I_{e} \ 0,0635 X Z_{e}^{-0,0046 X I_{e}} \ 0,0646 X I_{e}^{-0,1997 X R}} \times P_{S}$ |
| 36 | $Pbk = \frac{1}{1 + 0,7639 \ D^{0,3706} H^{0,7283} D^{-0,1376(\ln H)}_e - 0,0648 XI_e^{-0,0270 XZ_e} 0,0535 X3_e^{-0,2128 X4_e} - 0,0635 X5_e^{-0,0046 X6_e} 0,0914 X7_e^{-0,1997 X8}} - \times P_S$ |

Таблица 5. Таблица для определения аддитивной фитомассы деревьев осины по высоте и диаметру ствола в таёжной зоне европейской части России.

| Н, | Фракции фито- | | | | иаметр ств | | - | |
|----------|----------------------|-------|-------|-------|------------|--------|--------|----|
| 11, M | массы | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 30 |
| IVI | Общая фито- | | | 14 | 10 | 22 | 20 | 30 |
| | масса | 7,94 | 22,32 | 44,10 | - | - | - | - |
| | Корни | 1,89 | 5,35 | 10,61 | - | - | - | - |
| | Надземная | 6,05 | 16,97 | 33,48 | - | - | - | - |
| | Крона | 2,67 | 11,35 | 26,42 | - | - | - | - |
| 6 | Листва | 0,81 | 2,90 | 6,03 | - | - | - | - |
| | Ветви | 1,86 | 8,44 | 20,39 | - | - | - | - |
| | Ствол в коре | 3,38 | 5,62 | 7,06 | - | - | - | - |
| | Древесина ствола | 2,63 | 4,44 | 5,63 | - | - | - | - |
| | Кора ствола | 0,75 | 1,18 | 1,44 | - | - | - | - |
| | Общая фито- масса | 9,66 | 27,99 | 56,41 | 95,20 | - | - | - |
| | Корни | 2,07 | 5,87 | 11,64 | 19,41 | - | - | - |
| | Надземная | 7,59 | 22,12 | 44,77 | 75,79 | - | - | - |
| | Крона | 1,05 | 6,38 | 19,15 | 41,04 | - | - | - |
| 10 | Листва | 0,32 | 1,61 | 4,24 | 8,22 | - | - | - |
| | Ветви | 0,73 | 4,77 | 14,91 | 32,82 | - | - | - |
| | Ствол в коре | 6,54 | 15,74 | 25,62 | 34,76 | - | - | - |
| | Древесина ствола | 5,35 | 12,95 | 21,13 | 28,74 | - | - | - |
| | Кора ствола | 1,19 | 2,80 | 4,49 | 6,02 | - | - | - |
| | Общая фито- масса | 10,99 | 32,49 | 66,34 | 113,08 | 173,10 | - | - |
| | Корни | 2,20 | 6,21 | 12,32 | 20,55 | 1,31 | - | - |
| | Надземная | 8,79 | 26,27 | 54,02 | 92,53 | 142,20 | - | - |
| | Крона | 0,46 | 3,24 | 11,11 | 26,81 | 52,58 | - | - |
| 14 | Листва | 0,14 | 0,81 | 2,41 | 5,22 | 9,37 | - | - |
| | Ветви | 0,32 | 2,43 | 8,69 | 21,59 | 43,21 | - | |
| | Ствол в коре | 8,33 | 23,03 | 42,91 | 65,72 | 89,62 | - | |
| | Древесина ствола | 7,00 | 19,38 | 36,13 | 55,35 | 75,49 | - | - |
| | Кора ствола | 1,32 | 3,65 | 6,78 | 10,37 | 14,13 | - | - |
| | Общая фито- масса | - | 36,31 | 74,89 | 128,59 | 198,01 | 283,63 | - |
| | Корни | - | 6,48 | 12,84 | 21,40 | 2,29 | 45,16 | - |
| | Надземная | - | 29,83 | 62,05 | 107,19 | 165,84 | 238,47 | - |
| 10 | Крона | - | 1,79 | 6,51 | 16,69 | 34,73 | 62,88 | - |
| 18 | Листва | - | 0,44 | 1,39 | 3,18 | 6,03 | 10,09 | - |
| | Ветви | - | 1,35 | 5,12 | 13,51 | 28,70 | 52,78 | - |
| | Ствол в коре | ı | 28,04 | 55,54 | 90,50 | 131,11 | 175,59 | |
| | Древесина ствола | - | 23,97 | 47,42 | 77,19 | 111,73 | 149,54 | - |

| Н, | Фракции фито- | | | Ді | иаметр ствола, см 18 22 26 30 13,31 19,38 26,05 - 142,49 220,44 316,99 432,71 22,08 2,92 46,54 62,21 120,41 187,27 270,45 370,50 10,73 23,05 43,11 72,98 2,01 3,92 6,75 10,64 8,72 19,13 36,35 62,34 109,68 164,22 227,35 297,52 94,44 141,18 195,20 255,17 15,24 23,04 32,15 42,35 155,19 241,04 347,75 476,02 22,64 3,25 47,69 63,71 132,55 207,04 300,06 412,30 7,23 15,82 30,15 52,02 1,34 2,65 4,63 7,42 5,90 13,18 25,52 44,60 125,32 191,22 269,92 360,28 | | | | | | | | |
|----|----------------------|---------------------|------|-------|--|--------|--------|--------|--|--|--|--|--|
| M | массы | 6 10 14 18 22 26 30 | | | | | | | | | | | |
| | Кора ствола | - | 4,07 | 8,12 | 13,31 | 19,38 | 26,05 | - | | | | | |
| | Общая фито- масса | ı | ı | 82,49 | 142,49 | 220,44 | 316,99 | 432,71 | | | | | |
| | Корни | - | - | 13,26 | 22,08 | 2,92 | 46,54 | 62,21 | | | | | |
| | Надземная | ı | - | 69,24 | 120,41 | 187,27 | 270,45 | 370,50 | | | | | |
| | Крона | ı | - | 4,06 | 10,73 | 23,05 | 43,11 | 72,98 | | | | | |
| 22 | Листва | ı | - | 0,86 | 2,01 | 3,92 | 6,75 | 10,64 | | | | | |
| | Ветви | ı | - | 3,20 | 8,72 | 19,13 | 36,35 | 62,34 | | | | | |
| | Ствол в коре | ı | - | 65,18 | 109,68 | 164,22 | 227,35 | 297,52 | | | | | |
| | Древесина ствола | - | - | 56,23 | 94,44 | 141,18 | 195,20 | 255,17 | | | | | |
| | Кора ствола | - | - | 8,95 | 15,24 | 23,04 | 32,15 | 42,35 | | | | | |
| | Общая фито- масса | - | - | - | 155,19 | 241,04 | 347,75 | 476,02 | | | | | |
| | Корни | - | - | - | 22,64 | 3,25 | 47,69 | 63,71 | | | | | |
| | Надземная | - | - | - | 132,55 | 207,04 | 300,06 | 412,30 | | | | | |
| | Крона | - | - | - | 7,23 | 15,82 | 30,15 | 52,02 | | | | | |
| 26 | Листва | - | - | - | 1,34 | 2,65 | 4,63 | 7,42 | | | | | |
| | Ветви | ı | - | - | 5,90 | 13,18 | 25,52 | 44,60 | | | | | |
| | Ствол в коре | ı | - | - | 125,32 | 191,22 | 269,92 | 360,28 | | | | | |
| | Древесина ствола | - | - | - | 108,71 | 165,54 | 233,26 | 310,88 | | | | | |
| | Кора ствола | - | - | - | 16,60 | 25,68 | 36,66 | 49,40 | | | | | |

Результаты сопоставления (**табл. 8**) свидетельствуют о том, что аддитивные уравнения не только внутренне непротиворечивы, но и обладают примерно одинаковыми показателями адекватности по сравнению с независимыми уравнениями. Отметим также, что при реализации принципа аддитивности цель повышения адекватности получаемых моделей по отношению к традиционным моделям по всем фракциям фитомассы не ставилась.

Таблица 8. Сравнение показателей адекватности независимых и аддитивных

уравнений фитомассы деревьев Populus

| Показатели | | Фракции фитомассы* | | | | | | | | | | |
|------------|-------|---|-------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
| Показатели | Pt | Pa | Pr | Ps | Pw | Pbk | Pc | Pb | Pf | | | |
| | | | Незав | исимые у | уравнени | Я | | | | | | |
| R^2 | 0,987 | Независимые уравнения 0,987 0,996 0,876 0,997 0,996 0,935 0,961 0,960 0,880 | | | | | | | | | | |
| | | Аддитивные уравнения | | | | | | | | | | |
| R^2 | 0,987 | 0,994 | 0,817 | 0,993 | 0,993 | 0,939 | 0,960 | 0,958 | 0,884 | | | |

^{*} Обозначения см. уравнение (1).

Соотношение фактических значений и значений, полученных расчётом по независимым и аддитивным моделям фитомассы деревьев (**puc. 3**), показывает степень коррелированности названных показателей, а также отсутствие видимых различий в структуре остаточных дисперсий, полученных по двум названным моделям.

Таблица 7. Характеристика «приведенных» аллометрических уравнений для фитомассы деревьев осины и тополей

| adjR² | 0,9,4 | | 0,995 | 0,971 | | 0,977 | 966,0 | | 0,965 | 0,970 | | 966,0 | 0,982 |
|---|--------------------------------|---------|----------------------------|--------------------|---------|------------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| , , , , , , , , , , , , , , , , , , , | e ^{0,1642} <i>x</i> 8 | | | e -0,0462 X8 | | | e ^{0,1258} / ₈ | | | e 0,2468 X8 | | | e -0,1138 X8 |
| | e 0,0328 X7 | | - | e -0,0329 X7 | | | e 0,1078 X7 | | | e -0,0609 X7 | | | e -0,1794 X7 |
| | e -0,0562 X6 | | | e -0,1481 X6 | | e 0,1170 X6 | e -0,0520 X6 | | e -0,0607 X6 | e ^{0,1542} X6 | | e -0,0282 <i>X6</i> | e -0,0236 X6 |
| ×Ζ | e 0,0194 X5 | | e 0,0115 <i>X</i> 5 | e -0,0351 X5 | | e -0,1209 X5 | e 0,0419 X5 | | e -0,5908 X5 | e -0,0650 X5 | | e 0,0320 X5 | e 0,0955 X5 |
| уравнени | e -0,0188 X4 | | e -0,0158 X4 | e -0,1122 X4 | | e 0,0424 X4 | e -0,0001 X4 | | e -0,1484 X4 | e 0,0758 X4 | | e 0,0248 X4 | e -0,1880 X4 |
| Компоненты регрессионных уравнений | e -0,5612 <i>X</i> 3 | IIIar 1 | e -0,5978 X3 | e -0,4457 X3 | IIIar 2 | e -1,1459 X3 | e -0,4599 X3 | IIIar 3a | e -1,4419 X3 | e -1,0637 <i>X</i> 3 | IIIar 36 | e -0,2999 X3 | e -0,3534 X3 |
| енты регр | e 0,3735 X2 | | e 0,0997 X2 | e 0,7464 X2 | | e -0,0518 X2 | e 0,1187 X2 | | e 0,2389 X2 | e -0,3479 X2 | | e 0,0926 X2 | e ^{0,1197 X2} |
| Компон | e -0,0495 XI | | e -0,0210 XI | e -0,1324 XI | | e -0,0767 XI | e 0,0099 XI | | e -0,0520 XI | e -0,0906 XI | | e -0,0088 XI | e 0,0560 XI |
| | $D^{0,1166~({ m In}H)}$ | | $D^{0,1350 \text{ (In}H)}$ | $D^{0,0271}$ (InH) | | $D^{0,0440({ m In}H)}$ | D 0,1560 (InH) | | $D^{-0,1492 \text{ (InH)}}$ | $D^{0,0921 \text{ (InH)}}$ | | $D^{0,1256 (\ln H)}$ | $D^{0,2632 \text{ (InH)}}$ |
| | $H^{0,1743}$ | | H 0,2527 | H 0,0816 | | $H^{-1,6373}$ | H 0,7143 | | H-1,3435 | H-1,5569 | | H 0,8344 | $H^{0,1061}$ |
| j | D 1,8140 | | D 1,7725 | D 1,9735 | | D 3,1299 | D 1,4444 | | D 3,2836 | $D^{3,0356}$ | | | 1 |
| | 0,1549 | | 0.1020 | 0,0444 | | 0.1615 | 0,0477 | | 0.0423 | 0,0935 | | 0,0318 D 1,5031 | 0.0417 |
| фидомассы фидомассы | P_{i} | | P_a | P, | | P | P | | Pr | P_h | | P_{w} | Ph |

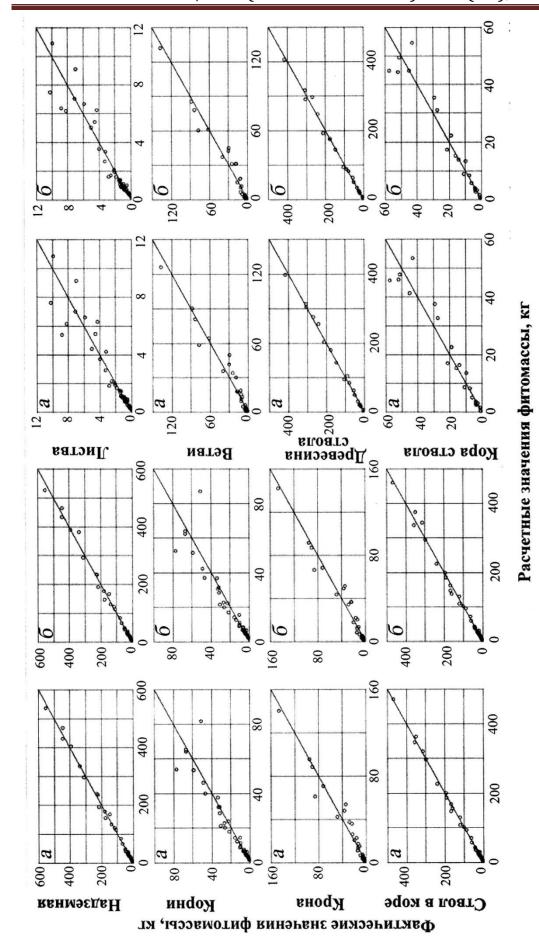


Рис. 3. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчётом по независимым (а) и аддитивным (б) уравнениям фитомассы деревьев Populus

2.

Аддитивная модель фитомассы на уровне древостоев

Рассчитаны исходные аллометрические модели

$$\ln P_i = a_i + b_i (\ln A) + c_i (\ln A)^2 + d_i (\ln H) + e_i (\ln D) + f_i (\ln N) + \sum g_{ij} X_i, \tag{4}$$

где P_i — масса i-й фракции, т/га; A — возраст древостоя, лет; H — средняя высота древостоя, м; D — средний диаметр стволов, см; N — густота древостоя, тыс. экз/га; a-g — регрессионные коэффициенты; i — индекс фракций фитомассы: общей (t), надземной (a), корней (r), кроны (c), ствола в коре (s), листвы (f), ветвей (b), древесины ствола (w) и коры ствола (bk); j - индекс $(\kappa \circ d)$ в блоке фиктивных переменных, кодирующих 10 экорегионов, от 0 до 9 (см. **табл. 2**).

Модель (4) после потенцирования приведена к виду

$$P_i = a_i A^{bi} A^{ci(\ln A)} H^{di} D^{ei} N^{fi} e^{\sum gijXj}$$
(5)

Характеристика уравнений (4), полученная их аппроксимацией по фактическим данным фитомассы, после введения поправок на логарифмическое преобразование по Γ . Л. Баскервилю (Baskerville, 1972) и последующего потенцирования согласно (5) приведена в **табл. 9**. Все регрессионные коэффициенты уравнений (4) при численных переменных значимы на уровне вероятности $P_{0.95}$ и выше, и уравнения адекватны исходным данным.

Полученные уравнения (5) (табл. 9) модифицированы согласно выше изложенному алгоритму трёхшагового пропорционального взвешивания, и окончательный вид трансконтинентальной аддитивной модели фракционного состава фитомассы осиновых и тополевых древостоев приведен в табл. 10. Модель действительна в диапазоне фактических данных возраста древостоев, средней высоты, среднего диаметра ствола и густоты древостоев, приведенных в табл. 2, и характеризуется двойной гармонизацией: одна из которых обеспечивает принцип аддитивности фракций фитомассы, а вторая связана с вводом фиктивных переменных, локализующих модель по экорегионам Евразии.

На следующем этапе исследования выполнено сопоставление адекватности построенной аддитивной модели (см. табл. 10) и независимых уравнений, показанных в табл. 9. Для корректного сопоставления по модифицированному массиву исходных данных аппроксимированы уравнения (5), и их окончательный вид дан в табл. 11. Как аддитивная модель, так и независимые уравнения, протабулированы по фактическим массообразующим показателям массива фактических данных, и полученные расчетные значения фитомассы сопоставлены с фактическими по показателю R^2 . Результаты сопоставления адекватности двух методов моделирования сведены в табл. 12 и свидетельствуют о том, что показатели адекватности двух систем уравнений близки между собой. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчётом по независимым и аддитивным моделям фитомассы древостоев (рис. 4), показывает степень коррелированности названных показателей и отсутствие видимых различий в структуре остаточных дисперсий, полученных по двум названным моделям. Большая или меньшая величина R^2 двух сравниваемых моделей определяется неравномерной дисперсией и случайным положением фактических значений фитомассы наиболее продуктивных древостоев в доверительном диапазоне, а также из-за их малого числа при наибольшем вкладе в остаточную дисперсию (см. рис. 4).

Таблица 9. Характеристика независимых (исходных) аллометрических уравнений для древостоев Populus

| adjR² | 0,941 | 0,926 | 0,884 | | 0,706 | 0,940 | | 0,625 | 0,741 | | 0,944 | 0,900 |
|------------------------------------|------------------------|--------------|---------------------|----------|--------------|---------------------|------|---------------------|--------------|--------|----------------------|----------------------|
| | e -0,1974 <i>X9</i> | e -0,3746 X9 | e -0,0932 <i>X9</i> | | e -0,1100 X9 | e -0,4256 <i>X9</i> | | e -0,5952 <i>X9</i> | e 0,1811 X9 | | e -0,2004 <i>X</i> 9 | e -0,1908 <i>X9</i> |
| | e -0,4461 <i>X8</i> | 20.00 | e -0,2593 X8 | | | e -0,2957 X8 | | | e -0,7813 X8 | | $\overline{}$ | e 0,0061 X8 |
| | e -0,3754 <i>X7</i> | | T | | | e -0,1102 <i>X7</i> | | - | e -0,1626 X7 | | - | e -0,3576 <i>X</i> 7 |
| | e -0,4512 <i>X6</i> | | + | 1 | | e -0,2937 X6 | 1 | _ | e -0,5191 X6 | | $\overline{}$ | e -0,4703 X6 |
| | e ^{0,1124 X5} | e -0,1352 X5 | 1 | 1 | | e -0,1563 X5 | 1 | \vdash | e -0,0553 X5 | ı | | e -0,2488 X5 |
| ах уравне | e ^{0,1212 X4} | e -0,0515 X4 | 1 | 1 | | e -0,0028 X4 | 1 | | e -0,4023 X4 | | - | e -0,3775 X4 |
| Компоненты регрессионных уравнений | e -0,1329 X3 | - | + | 1 | | e -0,0529 X3 | 1 | | e -0,2422 X3 | Шar 36 | e -0,2036 X3 | e 0,2057 X3 |
| ненты рег | e -0,1116 <i>X2</i> | e -0,0480 X2 | - | | _ | _ | | e -0,0820 X2 | e -0,0604 X2 | | e -0,1883 X2 | e -0,1739 X2 |
| Компон | e -0,2124 XI | -0,1788 XI | 1X 0 | 1 | e -0,2566 X1 | + | | e -0,0373 X1 | e -0,3470 XI | | e -0,2941 XI | e -0,2812 XI |
| | N ^{0,7278} | N 0,5133 | +- | | N 0,3619 | 1000 | | N 0,3727 | N 0,4274 | | N 0,6475 | |
| | D 1,4217 | 0,9816 | D 1,4371 | | D 1,1417 | D 1,0832 | | $D^{0,9155}$ | D 1,2555 | | $D^{0,8992}$ | D 1,0653 |
| | H 0,6266 | H 0,9428 | H 0,8556 | | H 0,1697 | Н 1,1110 | | H 0,3299 | H 0,1210 | | H 1,3109 | $H^{0,7320}$ |
| | A 0,1895 | 4 0,0643 | A 0,0063 | | A -0,1122 | A 0,1132 | | A -0,5437 | A 0,1242 | | A 0,2233 | A 0,1745 |
| | -1,4525 | 0.0172 | -3 1790 | 2,711,62 | -0 2793 | -2.0633 | 2006 | -0 4315 | -1.4747 | | 8579 6- | -3,0307 |
| фитомассы Фитомассы | P_{t} | Q | Pa | | b | P | | P | P | | D | |

Таблица 10. Трехшаговая аддитивная модель фракционного состава фитомассы древостоев осины и тополей, реализованная по принципу пропорционального взвешивания

| $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | | $p \leftarrow 1.4525 4^{0,1895} H^{0,6266} D^{1,4217} N^{0,7278} P^{0,6266} D^{1,4217} N^{0,7278} P^{0,6266} D^{1,116X2} P^{0,6266} D^{1,62124X7} P^{0,6266} D^{1,6217} P^{0,6266} D^{1,$ | |
|--|----------------|--|----|
| Pr = | | | Τ- |
| Pr = $Pc =$ $Pf =$ $Pb =$ $Pb =$ $Pb =$ | IIIar | $141,9579\ A\ ^{-0,2259}H\ ^{0,2603}D\ ^{0,0487}N\ ^{0,1502}e\ ^{-0,0548XI}\ ^{e}\ ^{0,1301X2}e\ ^{0,2150X3}e\ ^{0,4389X4}e\ ^{0,6956X5}e\ ^{-0,1410X6}e\ ^{-0,1835X7}e\ ^{0,2234X8}e\ ^{0,1348X9}$ | |
| Pc = Pc = Pc = Pb = Pb = Pb = Pbk | , - | | |
| Pc = Pc = Ps = Ps = Pb = Pb = Pbk | | $\frac{17}{1+0.5108} \frac{1}{A} \frac{0.2259}{0.2259} \frac{1}{H} - \frac{0.2603}{0.2259} \frac{1}{H} - \frac{0.0487}{0.00487} \frac{1}{A} - \frac{0.1301}{0.00487} \frac{1}{A} - \frac{0.215023}{0.00487} \frac{1}{A} - \frac{0.21502}{0.00487} \frac{1}{A} - \frac{0.21502}{0.00$ | |
| $P_{S}=$ $P_{S}=$ $P_{S}=$ $P_{W}=$ $P_{W}=$ | | | |
| Ps= $Pf=$ $Pb=$ $Pw=$ $Pbk=$ | Mar | $1.4_{1}422\ A^{0,4776}H^{1,8496}D^{-1,1537}N^{-0,0127}e^{-0,0949XI}\ e^{0,0159X2}e^{0,5068X3}e^{-0,2762X4}e^{-0,3984X5}e^{-0,1354X6}e^{0,5175X7}e^{0,2470X8}e^{0,0020X9}$ | |
| Pf = Ph = | 7 | | |
| Pf = 1 $Pb = 1$ $Pw = 1$ $Pb = 1$ | | $1.3 - 1+0.2414 A^{-0.4776} H^{-1.8496} D^{-1.1537} N^{0.0127} e^{-0.0159XZ} e^{-0.5068X3} e^{-0.5068X3} e^{-0.3984X5} e^{-0.3984X5} e^{-0.5175X7} e^{-0.5175X7} e^{-0.5470X8} e^{-0.0020X9} - xFa$ | - |
| Pb = Pb = Pw = Pb = Pbk = Pb | | | _ |
| Pb = Pw = Pw = Pbk = P | Mar | | |
| Pw = Pbk = | 3a | | Г |
| Pw=-1 $Pbk=$ | | $1 + 0,7076 + 4^{-0,2735} + 4^{0,2065} + 2^{0,4817} + 4^{0,2065} + 2^{0,0261} + 2^{0,0284} + 2^{0,3359} + 2^{0,3247} + 2^{0,3247} + 2^{0,3145} + 2^$ | |
| Pbk = 1 | | | Т |
| Pbk = | Mar | $1 + 1,1326 + \frac{0.0487}{1} + \frac{0.5789}{1} D 0,1660 N - \frac{0.0155}{2} 0,0129 X I = \frac{0.0145 X Z}{2} 0,4093 X 3 e - \frac{0.1513 X 4}{2} - \frac{0.0781 X 5}{2} - \frac{0.1957 X 6}{2} - \frac{0.2493 X 7}{2} 0,3904 X 8 e 0,0096 X 9 - \frac{0.1513 X 4}{2} - \frac{0.0781 X 5}{2} - \frac{0.0957 X 6}{2} - \frac{0.0483 X 7}{2} - \frac{0.0964 X 8}{2} - \frac{0.0096 X 9}{2} - 0.0096$ | |
| $\frac{1}{1+0} \times 8299 \times 4^{0.0487} \times 10^{0.5789} \times 10^{-0.1660} \times 10^{0.0155} \times 10^{0.014522} \times 10^{0.0409333} \times 10^{0.0151334} \times 10^{0.078135} \times 10^{0.0195736} \times 10^{0.0249337} \times 10^{0.0390438} \times 10^{0.019573} \times 10^{0.019573$ | 36 | | _ |
| 3 3 3 3 3 3 1 7 11 11/2000 | | $1+0,8829 \ A^{0,0487}H^{0,5789}D^{-0,1660}N^{0,0155}e^{-0,0129XI}e^{-0,0145X2}e^{-0,4093X3}e^{0,1513X4}e^{0,0781X5}e^{0,1957X6}e^{0,2493X7}e^{-0,3904X8}e^{-0,0096X9}$ | |

0,585

0,944

| | | | | | | | \vdash | ŀ | | \neg | 1 | | \dashv | |
|---|------------------------------------|--------------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|------|---------------------|------------------------|-----|---------------|--------------------------|--|
| | | e -0,1974 X9 | | e -0,2281 <i>X9</i> | e -0,0932 <i>X9</i> | e -0,2512 <i>X9</i> | e -0,2493 <i>X9</i> | | e -0,6588 <i>X9</i> | e -0,0903 X9 | | e -0,2004 X9 | e -0,1908 A9 | |
| | | e -0,4461 X8 | | e -0,4827 X8 | e -0,2593 X8 | e -0,6854 X8 | e -0,4384 X8 | | e -0,4350 X8 | e -0,7750 X8 | | e -0,3844 X8 | e 0,0061 x8 | |
| | | e -0,3754 X7 | | | e -0,5135 X7 | | e -0,2084 X7 | | | e -0,8312 X7 | | | e -0,3576.X7 | |
| snInd | | e -0,4512 X6 | | _ | e -0,5738 X6 | | e -0,4398 X6 | | | e -0,3928 X6 | | | e -0,4703 X6 | |
| Таблица 11. Характеристика «приведенных» аллометрических уравнений фитомассы для древостоев Populus | Ä | e 0,1124 X5 6 | 1 | | e 0,6511 <i>X5</i> | | e -0,0916 X5 | | | e 0,3790 X5 | 9 1 | $\overline{}$ | e -0,2488 X5 | |
| ы для древ | Компоненты регрессионных уравнений | e ^{0,1212 X4} e | 1 | \vdash | e 0,4633 X4 e | | e -0,0240 X4 e | 8 11 | | e 0,3048 X4 6 | | \vdash | e -0,3775 X4 e | |
| фитомасс | сионных | e -0,1329 <i>X</i> 3 e | 1 | \vdash | e 0,0393 X3 e | | e -0,0183 X3 e | | - | e -0,3616 <i>X</i> 3 e | | Н | e ^{0,2057 X3} e | |
| равнений | гы регрес | e -0,1116 X2 e - | 1 | - | e -0,0147 X2 e | | e -0,1547 <i>X</i> 2 e - | | | e -0,1004 X2 e - | | - | e -0,1739 X2 e | |
| ских у | понент | | 1 | | | | | 1 | $\overline{}$ | | | | | |
| метриче | Ком | e -0,2124 XI | - | | e -0,2610 XI | e -0,1356 XI | e -0,2305 XI | | e -0,1921 XI | e -0,1660 XI | | e -0,2941 XI | e -0,2812 XI | |
| иых» алло | | N 0,7278 | | N 0,6906 | N 0,8408 | N 0,7293 | N 0,7166 | | N 0,7628 | N 0,7343 | | N 0,6475 | N 0,6320 | |
| риведенн | | D 1,4217 | | D 1,3884 | $D^{1,4371}$ | - | $D^{1,1873}$ | | D 1,9471 | D 2,4288 | | D 0,8992 | D 1,0653 | |
| истика «п | | H 0,6266 | | H 0,5953 | H 0,8556 | H-0,8127 | H 1,0369 | | | H -0,8110 | | H 1,3109 | $H_{0,7320}$ | |
| Карактери | | A 0,1895 | | A 0,2322 | A 0,0063 | A -0,1791 | A 0,2985 | | A -0,3594 | A -0,0859 | | _ | A 0,1745 | |
| ица 11. Х | | -1.4525 | , | -1.6237 | -3,1790 | -0.6632 | -2,7471 | | -1.0533 | | | -2,6758 | -3,0307 | |
| Табл | филомассы Фракции | P. | | P | P, | P | Ps | | P | Ph | | P_{w} | P_{bk} | |

0,936

0,941

 $adjR^2$

0,769

Табл. 13. Характеристика рекурсивной системы вспомогательных уравнений для массообразующих показателей

| adjR² | 0,694 | 0,938 | 0,867 | |
|------------------------------------|------------|------------|---------------------|--|
| | 0,7180 X9 | 0,5308 X9 | -0,5215 X9 | |
| | -0,5463 X8 | 0,1607 X8 | 0- 8X 8690,0 LX | |
| | -0,4869 X7 | 0,0033 X7 | 0,6883 X7 0 | |
| | -0,4924 X6 | -0,1783 X6 | 0,1768 X6 | |
| ий | -0,3819 X5 | 0,0866 X5 | 0,2522 X5 | |
| ых уравнен | -0,2697 X4 | -0,0549 X4 | 0,2654 X4 0,2522 X5 | |
| грессионн | -0,9051 X3 | 0,2341 X3 | -0,6512 X3 | |
| Компоненты регрессионных уравнений | -0,3767 X2 | 0.0873 X2 | 0,2175 X2 | |
| Комі | -0.2786 XI | -0.1042 XI | 0,2832 XI | |
| | | | -1.6102 lnD | |
| | | 1.0652 lnH | Hul 0009'0 | |
| | 0.6922 In | 0.2345 InA | -0.1809 InA | |
| | 0.6521 | -1.1126 | 3.6774 | |
| Массообра- зующие показатели | Н | Unl | ΛηΙ | |

Таблица 12. Сравнение показателей адекватности независимых и аддитивных уравнений фитомассы древостоев *Populus*, рассчитанных с их регионализацией путем введения фиктивных переменных

| Показатели | | | | Фракці | ии фитом | иассы* | | | |
|------------|-------|-------|--------|----------|----------|--------|-------|-------|-------|
| Показатели | Pt | Pa | Pc | Pf | Pb | Pr | Ps | Pw | Pbk |
| | | | Незави | симые у | равнения | F | | | |
| R^2 | 0,832 | 0,829 | 0,775 | 0,507 | 0,797 | 0,576 | 0,788 | 0,792 | 0,908 |
| | | | Аддит | ивные уј | равнения | [| | | |
| R^2 | 0,832 | 0,829 | 0,774 | 0,500 | 0,795 | 0,575 | 0,798 | 0,563 | 0,840 |

Построенная аддитивная модель (см. **табл. 10**) включает четыре численных независимых переменных. При табулировании ее возникает проблема, которая заключается в том, что мы можем задать из четырех переменных только возраст древостоя, а остальные три переменные могут быть введены в таблицу лишь в виде расчетных величин, полученных системой вспомогательных рекурсивных уравнений. Такие уравнения рассчитаны по исходному массиву фактических данных и показаны в **табл. 13**. Результаты последовательного табулирования уравнений в **табл. 13** и **10** представляют громоздкую таблицу. Поэтому сравнительный анализ структуры фитомассы осины и тополей разных экорегионов ограничим возрастом 40 лет (**табл. 14**).

Согласно **табл. 14**, наибольшими значениями фитомассы характеризуются плантации осины Давида в Японии (467 т/га) и осины обыкновенной в Западной Европе (270 т/га), растущие в регионах, прилегающик к тихоокеанскому и атлантическому побережьям, а наименьшие (71 т/га) — древостоям тополя белого в степной зоне юга России. Несколько более высокие показатели фитомассы - у осины на северном и южном пределах Средней Сибири (92-97 т/га), а в остальных регионах евразийского ареала общая фитомасса осинников находится в пределах 161-255 т/га.

Показатели фитомассы разных экорегионов различаются не только по абсолютной величине, но и по соотношениям массы разных фракций; например доля листвы в надземной фитомассе максимальная у осины и тополя лавролистного (3,7-4,1 %) на юге Средней Сибири и минимальная - 1,0% у осины Давида в Японии и 1,9-2,0% у осины обыкновенной в Западной Европе и в тургайской степи, а в остальных регионах евразийского ареала составляет от 2,3 до 3,0%.

Заключение

Таким образом, впервые на уникальных по объёму базам фактических данных о фитомассе деревьев и древостоев рода *Populus* L. разработаны трансевразийские аддитивные модели фитомассы осины и тополей, и тем самым решена проблема совмещения аддитивности и всеобщности моделей. В модели фитомассы деревьев, во-первых, устранена внутренняя противоречивость «фракционных» и общего уравнения, и, вовторых, она учитывает региональные (и соответственно, видовые) различия равновеликих деревьев как по величине общей, надземной и подземной фитомассы, так и по ее фракционной структуре.

Аддитивная модель фитомассы древостоев гармонизирована также по двум уровням, один из которых обеспечивает принцип аддитивности фракций фитомассы, а второй связан с вводом «фиктивных» переменных, локализующих модель по экорегионам Евразии. Полученная модель демонстрирует различия фитомассы древостоев не только по абсолютным ее значениям для стволов, хвои, ветвей и корней, но и по их соотношениям, т.е. по структуре фитомассы. Предложенные модели и соответствующие таблицы для оценки фитомассы деревьев и древостоев рода *Populus* дают возможность определения их фитомассы в различных экорегионах Евразии по данным измерительной таксации.

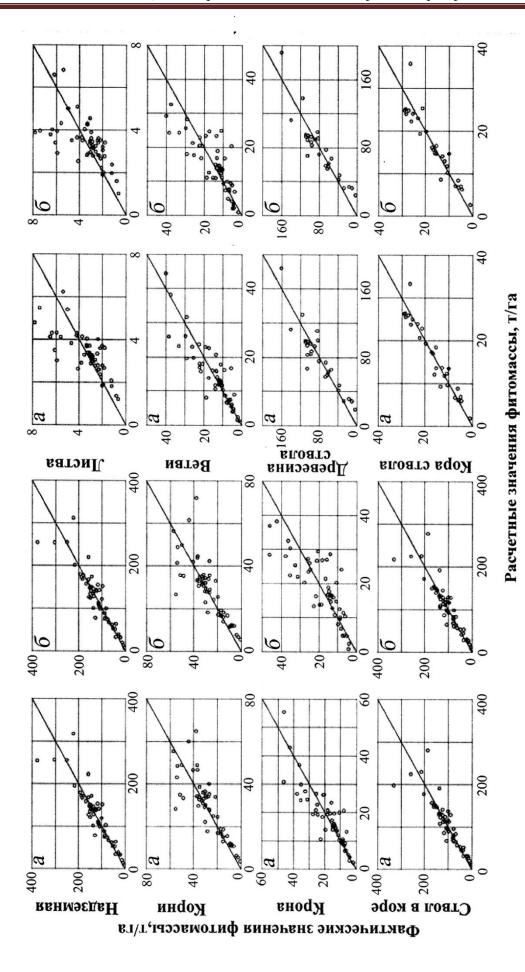


Рис. 4. Соотношение фактических значений и значений, полученных расчётом по независимым (а) и аддитивным (б) уравнениям фитомассы древостоев Populus

Таблица 14. Фрагменты аддитивной таблицы фитомассы для древостоев Populus в возрасте 40 лет по экорегионам и соответствующим

| видам. | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------------------|--------------|-------|----------|-------|-------|---|-----------|----------|-----------|-----------|-------|------|
| Эко- | ۶ | 7.7 | , | N, Tbic. | | | Фитомасса в абсолютно сухом состоянии, т/га | а в абсол | ютно сух | ом состоя | нии, т/га | | |
| регион | Бид | <i>Н</i> , м | D, CM | экз/га | Pt | Pa | Pc | Pf | Pb | Pr | Ps | P_W | Pbk |
| 3CE | P. tremula L. | 24,7 | 23,7 | 8,0 | 270,2 | 216,0 | 30,1 | 4,2 | 25,9 | 54,1 | 186,0 | 160,9 | 25,0 |
| EPceB | P. tremula L. | 18,7 | 15,9 | 1,7 | 180,6 | 144,2 | 16,1 | 3,6 | 15,5 | 36,4 | 125,1 | 106,8 | 18,3 |
| ЕРюг | P. tremula L. | 16,9 | 17,3 | 1,3 | 175,4 | 137,8 | 24,9 | 3,4 | 21,4 | 37,6 | 112,9 | 95,3 | 17,6 |
| ЕРюг | P. alba L. | 10,0 | 11,4 | 8,0 | 46,9 | 38,1 | 8,2 | 6,0 | 2,7 | 8,8 | 29,8 | 22,1 | 1,7 |
| 3CT | P. tremula L. | 18,8 | 16,9 | 1,5 | 255,0 | 175,2 | 19,5 | 3,5 | 16,1 | 1,61 | 155,7 | 135,9 | 19,9 |
| ЗСст | P. tremula L. | 16,8 | 17,2 | 1,4 | 223,4 | 140,8 | 25,1 | 3,2 | 21,9 | 82,6 | 115,7 | 0,66 | 16,7 |
| CCceB | P. tremula L. | 15,1 | 11,8 | 2,2 | 97,3 | 6,08 | 12,2 | 2,4 | 8,6 | 16,3 | 68,7 | 8,65 | 8,9 |
| ССюг | P. tremula L. | 15,2 | 14,2 | 2,7 | 160,5 | 134,0 | 22,8 | 5,0 | 17,8 | 26,5 | 111,1 | 97,1 | 14,0 |
| ССюг | P. laurifolia L. | 14,3 | 15,6 | 1,2 | 91,6 | 72,5 | 11,0 | 3,0 | 8,0 | 19,1 | 61,5 | 47,6 | 13,9 |
| Яп | P. davidiana L. | 50,6 | 86,7 | 0,1 | 467,3 | 364,9 | 63,8 | 3,8 | 60,1 | 102,4 | 301,1 | 265,8 | 35,3 |
| | | | | | | | | | | | | | |

Список использованной литературы

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. 336 с. ISBN 978-5-94984-568-4 (http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696).

Усольцев В.А., Цепордей И.С. Шубаири С.О.Р., Дар Дж.А., Часовских В.П. Аддитивные аллометрические модели фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен как основа региональных таксационных нормативов для Евразии // Эко-потенциал. 2018. № 1 (21). С. 27-47 (http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/7261).

Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. P. 49-53.

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.

Tang S., Zhang H., Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model // Scientia Silvae Sinica. 2000. Vol. 36. P. 19–27 (in Chinese with English abstract).

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University. 2016. ISBN 978-5-94984-600-1 (http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103).

Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and re-harmonized. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. ISBN 978-5-94984-438-0 (http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059).

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Рецензент статьи: доктор сельскохозяйственных наук, профессор С.В. Залесов.