

УДК 630*231

*В.А. Усольцев^{1,2}, С.О.Р. Шубаири³, Дж.А. Дар⁴,
В.П. Часовских¹, Е.В. Марковская¹*

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург

² Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

³ Nanjing Forestry University, Nanjing Shi, Jiangsu Sheng, China

⁴ Biodiversity Conservation Lab., Department of Botany, Sagar, M.P., India

ПОСТРОЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ БИОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ

Ключевые слова: *биомасса деревьев, регрессионное моделирование, лесообразующие древесные виды, экорегионы, Евразия, фиктивные переменные.*

По материалам впервые сформированной базы данных о фитомассе (кг) более 7300 модельных деревьев 30 лесообразующих древесных видов Евразии, измеренной на пробных площадях и охватывающей территорию 22 стран, разработаны региональные регрессионные модели фитомассы деревьев, включающие в качестве предикторов диаметр и высоту ствола. Кодировка экорегионов, в которых взяты модельные деревья, блоковыми фиктивными переменными и ввод их в уравнение фитомассы дерева наряду с диаметром и высотой ствола, характеризует степень «дистанцирования», или отличия величины фитомассы равновеликих деревьев в каждом экорегионе от исходного. Тем самым экорегионы ранжируются по величине фитомассы равновеликих деревьев. Предложенные серии подеревных региональных моделей позволяют оценивать фитомассу на 1 га лесопокрытой площади по данным измерений диаметра и высоты дерева. Они составлены лишь для тех древесных видов, которые широко представлены в разных экорегионах.

V.A. Usoltsev, S.O.R. Shobairi, J.A. Dar, V.P. Chasovskikh, E.V. Markovskaya

DESIGNING REGIONAL REGRESSION MODELS TO ESTIMATING THE STRUCTURE OF SINGLE TREE BIOMASS OF FOREST SPECIES IN EURASIA

Key words: *tree biomass, regression modeling, forest-forming species, ecoregions, Eurasia, dummy variables.*

When using the materials for the first time compiled database of biomass (kg) more than 7300 single trees of 30 forest species in Eurasia, that were measured on sample plots and covering 22 countries, regional regression models of tree biomass, including tree stem diameter and height as predictors are developed. Coding of ecoregions, on that model trees were taken, with block dummy variables and putting them in tree biomass equations along with stem diameter and height, characterizes the degree of their "distancing", or difference of biomass magnitude of equally-sized trees in each ecoregion from the original one. Thus ecoregions are ranked by the biomass value of equally-sized trees. The proposed series of regional models allows to evaluate the biomass on 1 ha of forest covered area after measurements of diameter and height of trees. They are only for those tree species, which are widely represented in different ecoregions of Eurasia.

Введение

По мнению многих исследователей, для описания изменчивости фитомассы деревьев (P_i) достаточно одного диаметра ствола на высоте груди (D) согласно аллометрической зависимости $\ln P_i \sim \ln D$. Они единодушны в выводе о возможном широком использовании обобщенных уравнений фитомассы подобного типа (Tritton, Hornbeck, 1981; Pastor et al., 1984; Singh, 1986; Feller, 1992; Son et al., 2001). Однако многие авторы считают некорректной экстраполяцию обобщенных моделей фитомассы на другие регионы (Wirth et al., 2004; Muukkonen, Mäkipää, 2006).

Методические вопросы и обоснование структуры модели

Поскольку нет единодушия в отношении применимости обобщенных моделей фитомассы деревьев, на примере сосны обыкновенной выполнено специальное исследование зависимости ошибки аллометрической модели фитомассы дерева от уровня обобщения исходных данных и от количества включенных в неё независимых переменных (Усольцев, 2016а). Для этой цели использованы фактические данные фитомассы 1260 модельных деревьев сосны обыкновенной естественного и искусственного происхождения, полученные на территории бывшего СССР разными исследователями (табл. 1).

Таблица 1

Сводная таблица объектов исследования по регионам и происхождению сосняков

Авто-то-ры*	Регион	Подзона	Происхождение**	Число пробных площадей	Число модельных деревьев
1	Бор Аман-Карагай	Сухая степь	Е	12	119
2	Бор Ара-Карагай	Сухая степь	Е	14	140
3	Казахский мелкосопочник	Сухая степь	Е	5	96
4	Бор Аман-Карагай	Сухая степь	К	21	206
5	Сухой Лог	Предлесостепь	К	5	38
6	Саргатское	Лесостепь	К	9	71
7	Красноярск-Канск	Лесостепь	Е	8	254
8	Архангельская обл.	Северная тайга	Е	19	163
9	Южная Карелия	Средняя тайга	Е	7	113
10	Московская обл.	Смешанные леса	Е	7	60
Итого				107	1260

*Авторы: Усольцев, 1997 (1-4); Усольцев и др. 2006 (5-6); Семечкина, 1978 (7); Молчанов, 1971 (8); Казимиров и др., 1977 (9); Молчанов, 1974а,б (10).

**Происхождение: Е - естественные сосняки, К – культуры сосны обыкновенной.

Фактические данные о фитомассе модельных деревьев сосны использованы для решения вопроса о степени приемлемости моделей разного уровня обобщения для адекватной оценки фитомассы на 1 га насаждения. Для расчета ошибок определения надземной фитомассы на 1 га с помощью аллометрических моделей $\ln P_i \sim \ln D$ было выделено несколько уровней обобщения, полученных путём последовательного суммирования региональных данных, представленных в табл. 1. Фитомасса на 1 га рассчитана в древостоях каждой из 107 пробных площадей с нарастающим уровнем обобщения. Каждое из полученных расчетных определений сопоставлялось с фактическим запасом фитомассы на 1 га, полученным по тем же рядам распределения, но не на основе аллометрических моделей разного уровня, а по фактическим определениям фитомассы на каждой пробной площади отдельно. Результаты расчета стандартной ошибки опреде-

ления фитомассы на 1 га по моделям шести нарастающих уровней обобщения по отношению к фактическим значениям фитомассы показали тенденцию ее увеличения по мере повышения уровня обобщения аллометрической модели с коэффициентом корреляции 0,59. Если на 1-м уровне обобщения средняя ошибка составила 14% в диапазоне от 11 до 16%, но на 5-6-м уровнях – 20% в диапазоне от 17 до 26% (рис. 1а).

Схема анализа однофакторной аллометрической зависимости $\ln P_i \sim \ln D$ продублирована на основе двухфакторной модели надземной фитомассы, в которую включены диаметр ствола и возраст дерева (A), т.е. $\ln P_i \sim \ln D, \ln A$ (Усольцев и др., 2006). Если при использовании однофакторной модели стандартная ошибка возрастала от 14% на первом уровне обобщения до 19-20% - на 5-6 уровнях (см. рис. 1а), то при использовании двухфакторной модели ошибка, во-первых, снизилась до 12% и во-вторых, ее величина стала независимой от уровня обобщения (см. рис. 1б). Следовательно, чтобы расширить область применения аллометрической модели фитомассы, нужно, как минимум, ввести второй предиктор – возраст дерева либо коррелированную с ним высоту ствола.

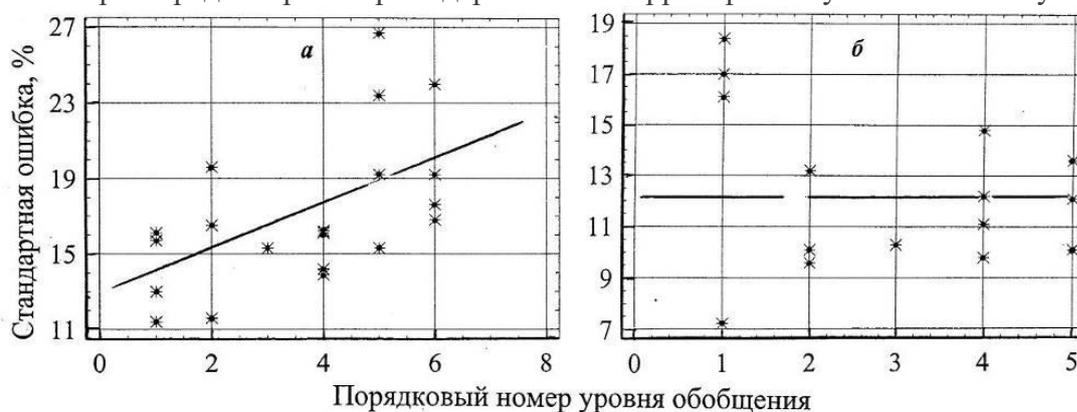


Рис. 1. Стандартная ошибка определения надземной фитомассы на 1 га по отношению к значениям фитомассы, полученным по модельным деревьям каждой пробной площади, в зависимости от уровня обобщения моделей (а - по однофакторной аллометрической модели и б – по двухфакторной модели) (Усольцев, 2016а).

Нормативная база лесной таксации с изначальных времён базировалась на стереометрической оценке объема ствола по легко измеряемым диаметру и высоте с коррекцией на его полндревесность. Уравнение Спурра (Prodan, 1965), широко применяемое в лесной таксации для оценки объема ствола, включает в себя в качестве предиктора так называемый видовой цилиндр D^2H , или произведение квадрата диаметра ствола на высоту дерева H , т.е. основные массообразующие показатели ствола. Слабая изменчивость полндревесности обусловила высокую адекватность уравнения при оценке не только объема, но и массы ствола: при одном и том же значении D^2 масса ствола увеличивается прямо пропорционально его высоте

По молчаливому согласию ряд зарубежных и отечественных исследователей (Ogawa et al., 1965; Семечкина, 1978; Уткин, 1982, и др.) этот агрегированный предиктор стали повсеместно применять и при оценке массы кроны, хотя каких-либо убедительных предпосылок для такого переноса нет: при одной и той же величине D^2 масса кроны дерева с увеличением его высоты не возрастает подобно массе ствола, а напротив, снижается. В совокупности древостоев разного возраста это объясняется сдвигом рангового положения дерева одного и того же диаметра с возрастом древостоя, а в совокупности древостоев разной производительности – бóльшим развитием ассимиляционного аппарата с ухудшением условий произрастания при одинаковой толщине деревьев.

Очевидно, что видовой цилиндр может дать устойчивую оценку массы кроны лишь при средних значениях высоты деревьев, а при максимальных и минимальных неизбежны смещения. Более адекватна в таком случае структура уравнений с положи-

тельной константой при D и отрицательной – при H . В условиях реального эксперимента некорректность структуры уравнения с видовым цилиндром в качестве предиктора при оценке массы кроны проявляется в меньшей его детерминированности по сравнению с уравнением, имеющим в качестве предиктора только диаметр D . Расчет таких уравнений по совокупности 320 модельных деревьев в сосняках, взятых в диапазоне пяти классов возраста и пяти классов бонитета, дал значения R^2 для массы хвой при оценке её по D^2H и по D соответственно 0,669 и 0,758, и для массы ветвей – соответственно 0,810 и 0,870 (Усольцев, 1988). Подобная закономерность проявилась также при оценке массы крон по совокупности 104 деревьев, сплошь вырубленных в 45-летнем березняке: R^2 для массы листвы составил соответственно 0,925 и 0,939, для массы ветвей 0,899 и 0,924 (Усольцев, 1985, 2004). К аналогичному выводу пришли при разработке аллометрических уравнений фитомассы деревьев для европейской России А.И. Уткин с соавторами (1996). Однако, вопреки логике, они при составлении таблиц применили структуру модели с видовым цилиндром, «руководствуясь его преимущественным использованием при определении запасов фитомассы, а следовательно, и удобством при сравнении результатов разных авторов» (с. 42).

Исходя из изложенного, в нашем исследовании от применения видового цилиндра пришлось отказаться и вводить в уравнения фитомассы всех фракций (ствол, ветви, листва, хвоя, корни) диаметр ствола и высоту дерева порознь, как две независимые переменные, иногда с учётом совместного их действия в виде произведения переменных.

География пробных площадей с фактическими данными фитомассы деревьев

Распределение местоположений пробных площадей с определениями фитомассы деревьев показано на рис. 2-12, но только для тех лесообразующих пород Евразии, данные по которым имеют достаточно широкое распространение по экорегионам. Специфика условий произрастания в них, в том числе климатических, позволяет разработать региональные таксационные нормативы для оценки фитомассы деревьев.

Обозначения регионов на рис. 2-12:

СЕш – Средне-Европейская провинция, широколиственные леса; **СРср** – Скандинавско-Русская провинция, средняя тайга; **СРюж** – Скандинавско-Русская провинция, южная тайга; **СРшш** – Скандинавско-Русская провинция, хвойно-широколиственные леса; **СРш** – Скандинавско-Русская провинция, широколиственные леса; **СРст** – Скандинавско-Русская провинция, степь; **ВРсев** – Восток Русской равнины, северная тайга; **ВРср** – Восток Русской равнины, средняя тайга; **ВРюж** – Восток Русской равнины, южная тайга; **ВРш** – Восток Русской равнины, широколиственные леса; **ВРст** – Восток Русской равнины, степь; **УРсев** – Уральская провинция, северная тайга; **УРср** – Уральская провинция, средняя тайга; **УРюж** – Уральская провинция, южная тайга; **ЗСср** – Западно-Сибирская равнинная провинция, средняя тайга; **ЗСюж** – Западно-Сибирская равнинная провинция, южная тайга; **ЗСлс** – Западно-Сибирская равнинная провинция, лесостепь; **ЗСст** – Западно-Сибирская равнинная провинция, степь; **ССсев** – Средне-Сибирская плоскогорная провинция, северная тайга; **ССср** – то же, средняя тайга; **ССюж** – то же, южная тайга; **ВСср** – Восточно-Сибирская горноравнинная провинция, средняя тайга; **ЗБср** – Забайкальская горная провинция, средняя тайга; **ЗБюж** – то же, южная тайга; **АСюж** – Алтае-Саянская горная провинция, южная тайга; **АСлс** – Алтае-Саянская горная провинция, лесостепь; **ЯПшш** – Япония, Хонсю, хвойно-широколиственные леса; **ПЧсуб** – Причерноморская провинция, субтропики.

Здесь и далее: **I** – южная граница тундры; **II** – южная граница подзоны северной тайги; **III** – южная граница подзоны средней тайги; **IV** – южная граница подзоны южной тайги; **V** – южная граница хвойно-широколиственных лесов; **VI** – юго-восточная граница широколиственных лесов; **VII** – южная граница лесостепи; **VIII** – южная граница степи (Базилевич, Родин, 1967). **IX** – границы лесохозяйственных провинций Сибири. Выделены провинции (Курнаев, 1973; Смагин и др., 1978; Коротков, 1978): **A** – Средне-Европейская; **B** – Скандинавско-Русская (включая юг Русской равнины); **C** – Восток Русской равнины (включая Западно-Казахстанскую провинцию на юге); **D** – Уральская; **E** – Западно-Сибирская (включая Восточно-Казахстанскую провинцию на юге); **F** – Средне-Сибирская; **G** – Восточно-Сибирская; **H** – Дальний Восток; **I** – Забайкальская горная; **J** – Алтае-Саянская горная; **K** – Центрально-Хангайская; **L** – Японские острова; **M** – Причерноморская; **N** – Кавказско-Малоазиатская; **O** – Памиро-Тяньшаньская. Каждая точка на схеме соответствует одной или нескольким территориально сближенным пробным площадям.

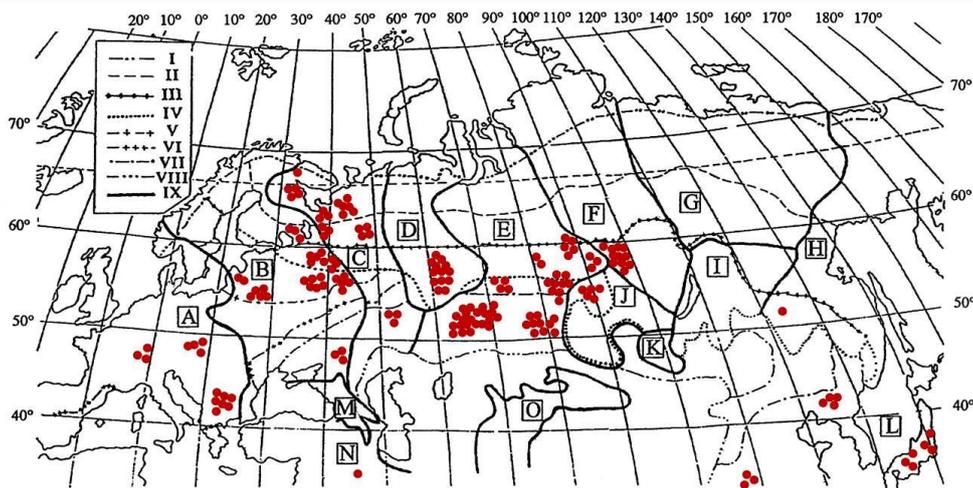


Рис. 2. География фактических данных о фитомассе деревьев двухвойных сосен.

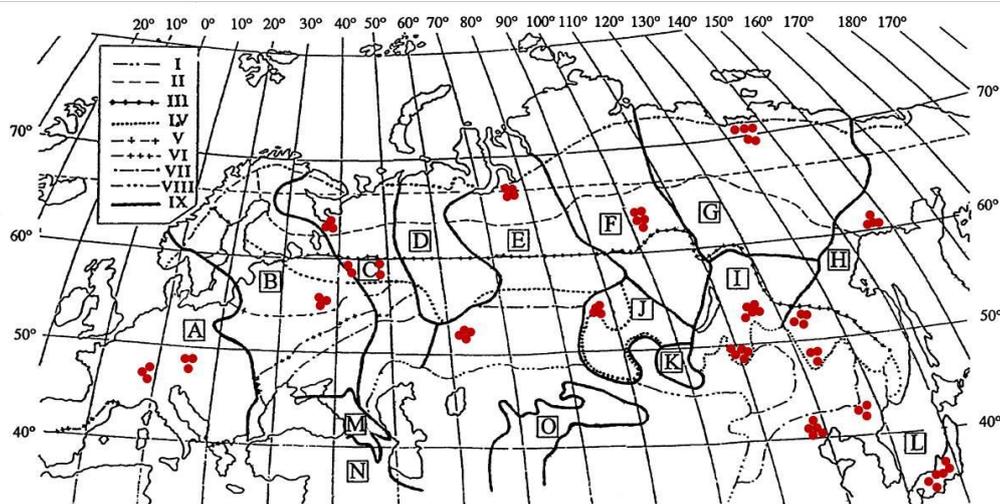


Рис. 3. География фактических данных о фитомассе деревьев лиственниц.

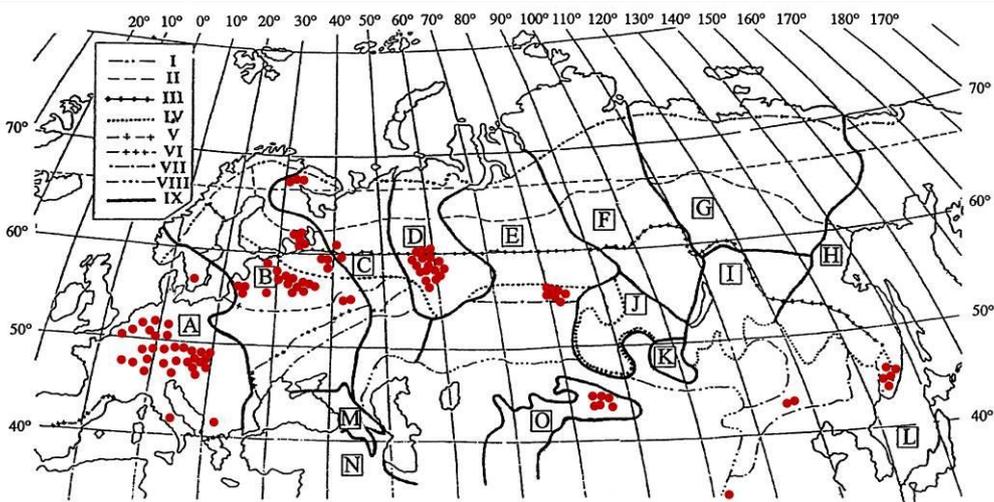


Рис. 4. География фактических данных о фитомассе деревьев елей.

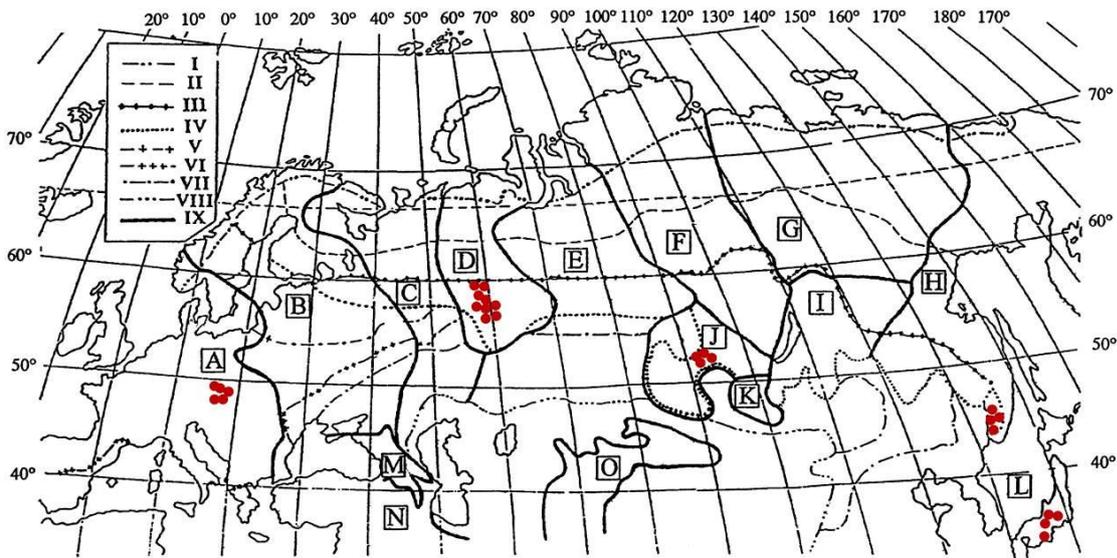


Рис. 5. География фактических данных о фитомассе деревьев пихт.

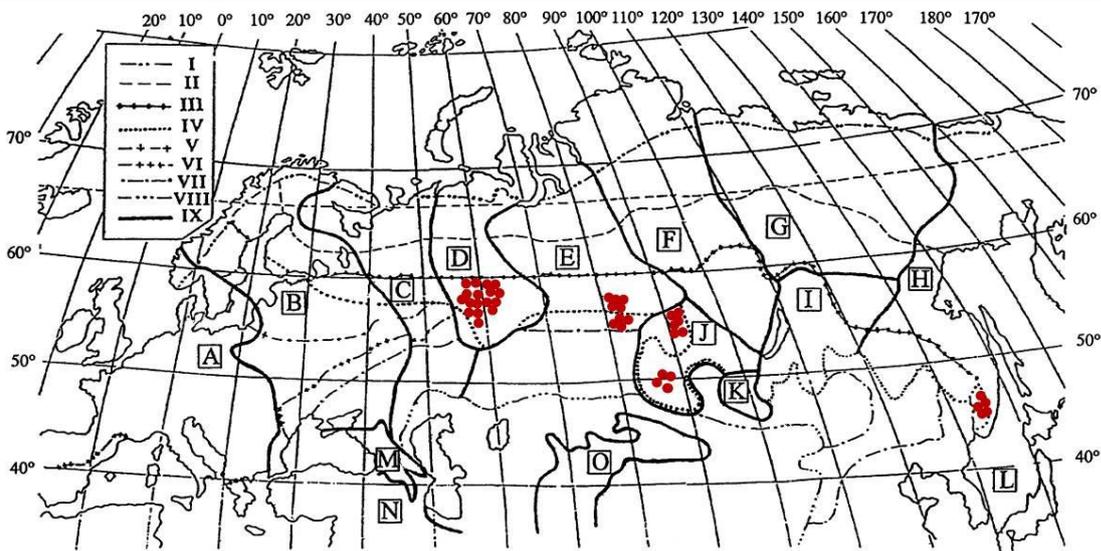


Рис. 6. География фактических данных о фитомассе деревьев 5-хвойных сосен (кедров).

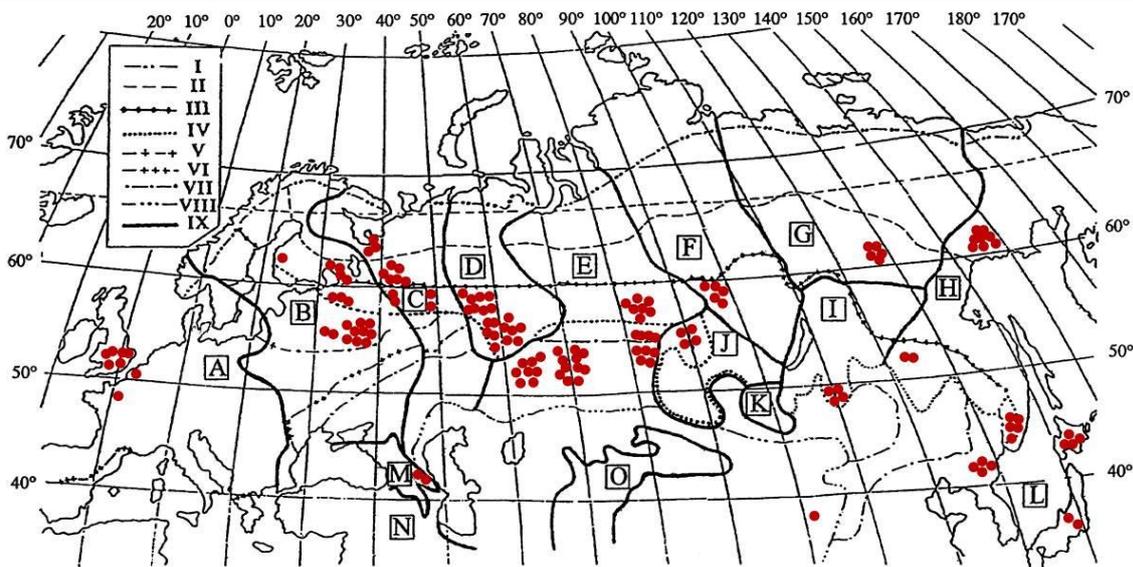


Рис. 7. География фактических данных о фитомассе деревьев берёз.

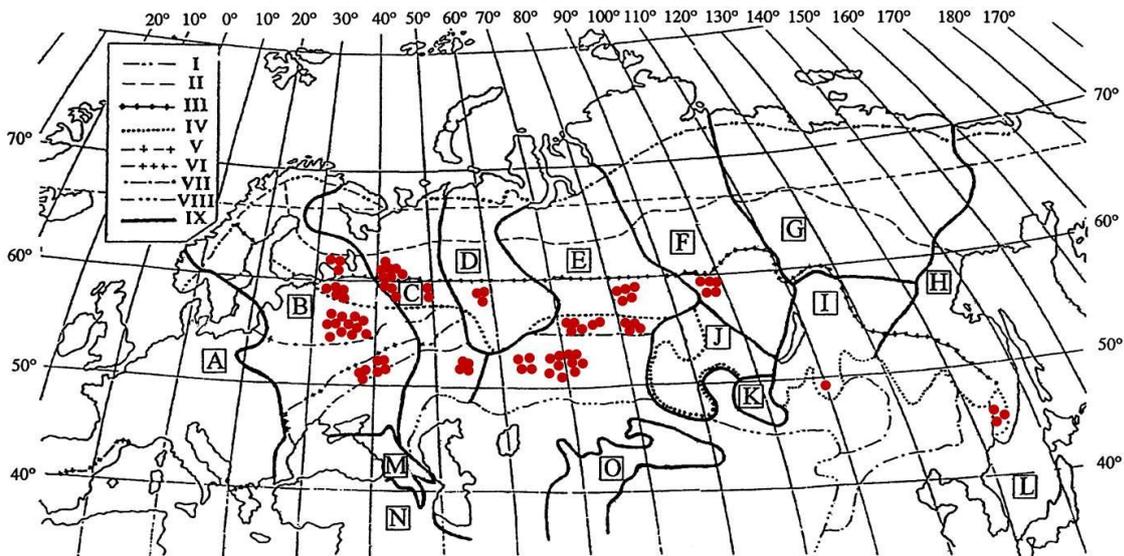


Рис. 8. География фактических данных о фитомассе деревьев осин и тополей.

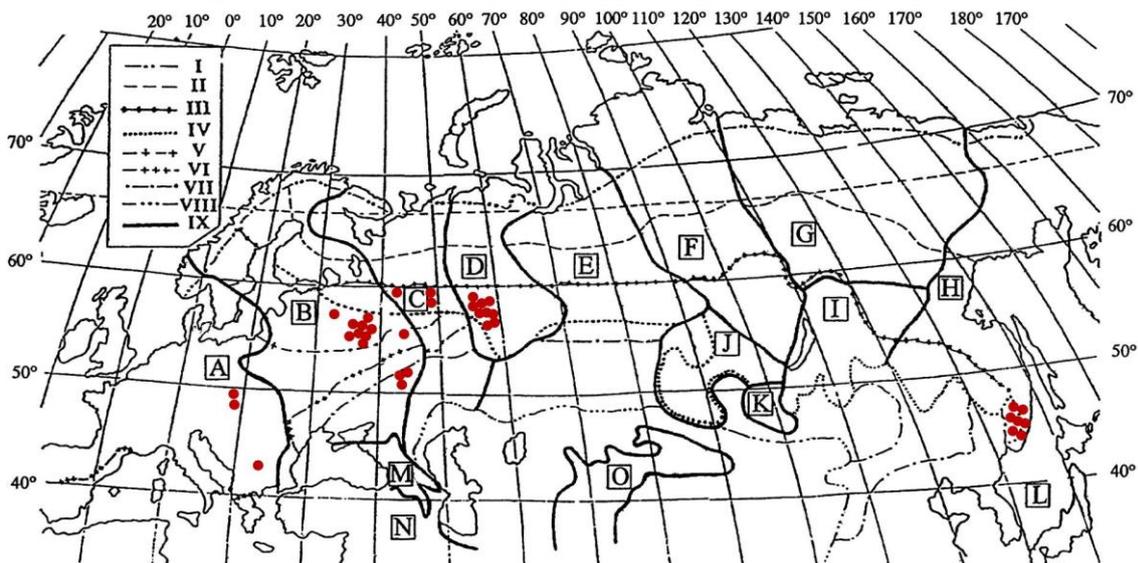


Рис. 9. География фактических данных о фитомассе деревьев лип.

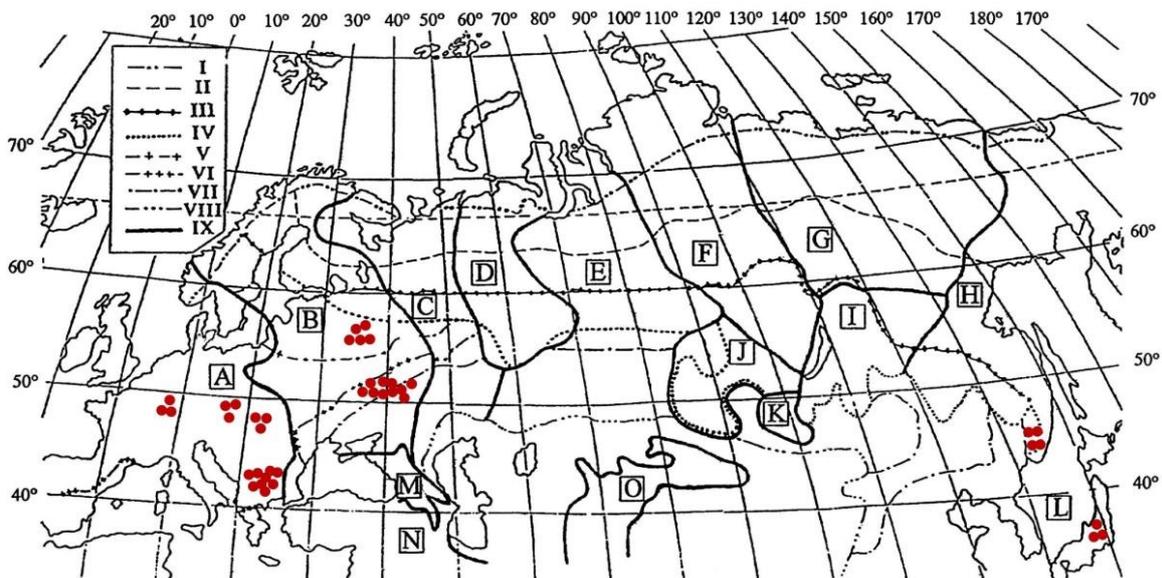


Рис. 10. География фактических данных о фитомассе деревьев дубов.

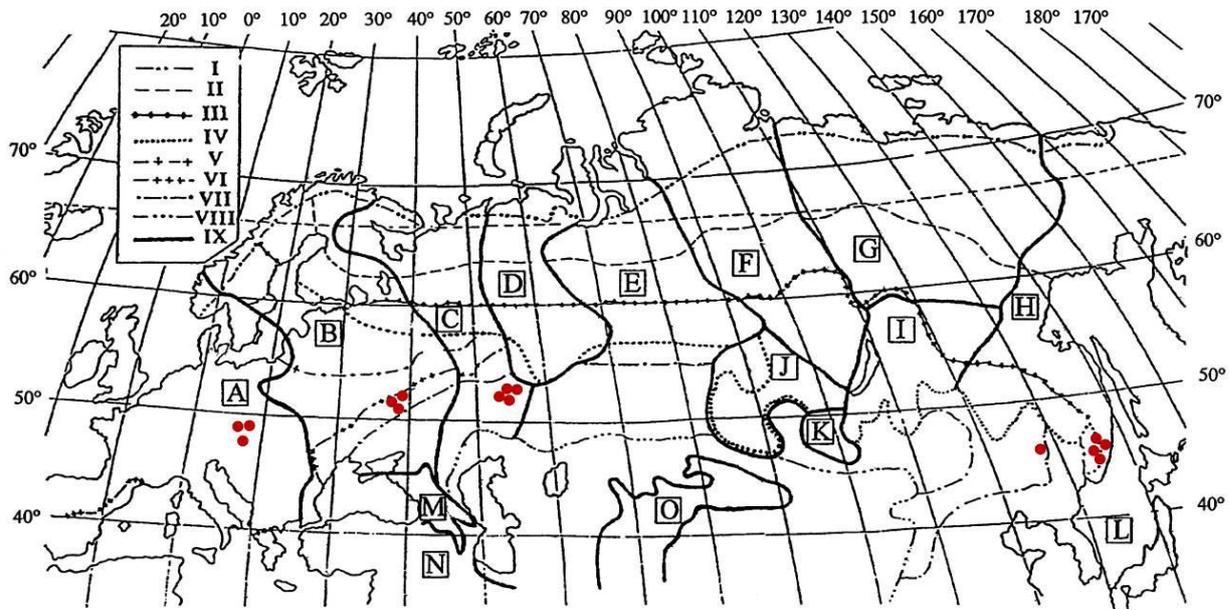


Рис. 11. География фактических данных о фитомассе деревьев ясеней.

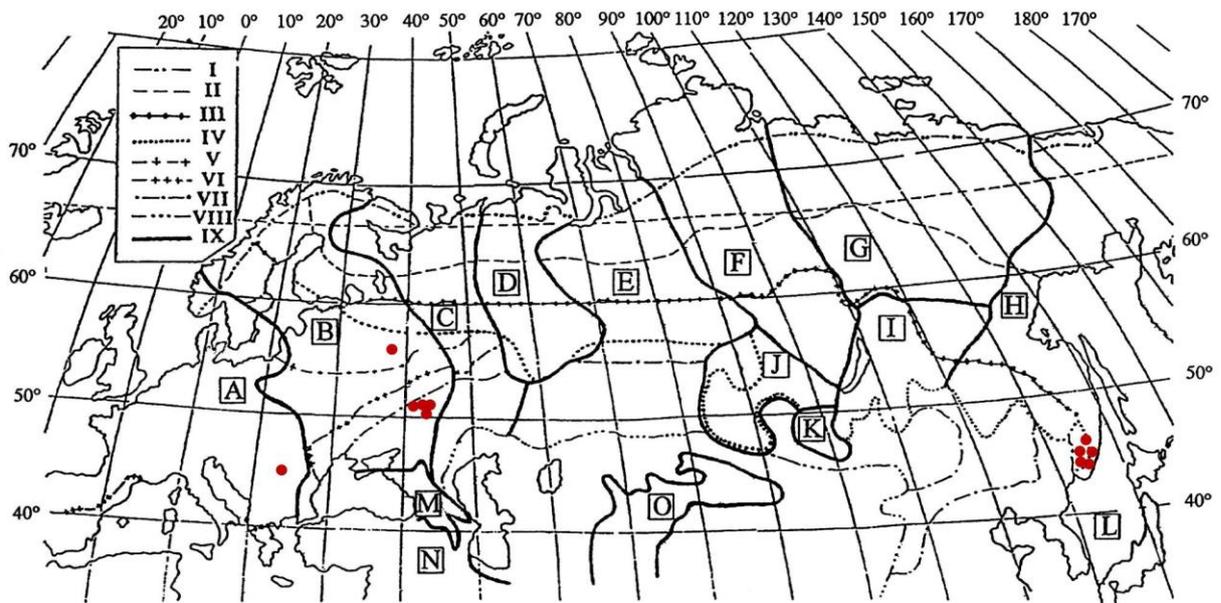


Рис. 12. География фактических данных о фитомассе деревьев клёнов.

Кодирование региональных массивов данных о фитомассе деревьев блоковыми фиктивными переменными

Экорегiónы, или области относительно плотного расположения пробных площадей с определениями фитомассы деревьев, закодированы блоковыми фиктивными переменными (Дрейпер, Смит, 1973). Эти фиктивные переменные (*dummy variables*), введённые затем в уравнение фитомассы дерева наряду с диаметром и высотой ствола, характеризуют степень «дистанцирования», или отличия величины фитомассы равновеликих деревьев в каждом экорегиионе от исходного (нулевого). Тем самым экорегиионы ранжируются по величине фитомассы равновеликих деревьев.

Ниже приводятся схемы кодирования региональных массивов данных о фитомассе деревьев лесообразующих пород Евразии.

Двухвойные сосны (*Pinus sylvestris*, *P. densiflora*, *P. nigra*, *P. tabulaeformis*, *P. taeda*, *P. thunbergii*)

Регион	Блочные фиктивные переменные																
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
СЕш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРср	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРюж	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРхш	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРст	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРсев	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРср	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРст	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
УРюж	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСюж	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСлс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ЗСст	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ССюж	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
АСлс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ДВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
КМ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Кит	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ЯПш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Лиственницы (*L. sibirica*, *L. cajanderi*, *L. sukaczewii*, *L. leptolepis*, *L. gmelinii*, *L. olgensis*, *L. decidua*)

Регион	Блочные фиктивные переменные												
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
СЕш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРсев	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВРюж	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСсев	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСст	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ССср	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
АСлс	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ВСсев	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ЗБюж	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ДВсев	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ДВюж	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
КИТхш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ЯПш	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Ели (*Picea abies*, *P. obovata*, *P. schrenkiana*, *P. jezoensis*, *P. purpurea*, *P. koraiensis*)

Регион	Блочные фиктивные переменные						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
СЕш	0	0	0	0	0	0	0
СР	1	0	0	0	0	0	0
ВРсев	0	1	0	0	0	0	0
УРюж	0	0	1	0	0	0	0
ЗСлс	0	0	0	1	0	0	0
ПТ	0	0	0	0	1	0	0
ДВаян *	0	0	0	0	0	1	0
Кит	0	0	0	0	0	0	1

Пихты (*Abies sibirica*, *A. alba*, *A. veitchii*, *A. holophylla*, *A. nephrolepis*, *A. firma*)

Регион	Блочные фиктивные переменные				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
СЕш	0	0	0	0	0
УРюж	1	0	0	0	0
АС	0	1	0	0	0
ДВцел*	0	0	1	0	0
ДВбел*	0	0	0	1	0
Кит	0	0	0	0	1

*ДВаян - ель аянская, ДВцел - пихта цельнолистная, ДВбел - пихта белокорая.

Кедры (*Pinus sibirica*,
P. koraiensis)

Регион	Блоковые фиктивные переменные	
	X ₁	X ₂
УРюж	0	0
ЗСлс	1	0
ДВхш	0	1

Берёзы (*Betula alba*, *B. platyphylla*, *B. fruticosa*, *B. costata*, *B. dahurica*, *B. ermanii*)

Регион	Блоковые фиктивные переменные											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
СЕ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СР	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВР	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
УР	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗСлс	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ЗБ	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ДВсев	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ДВплат	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ДВжелт	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ДВчёрн	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
КАВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ЯП	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Кит	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Осины и тополя (*Populus tremula*, *P. nigra*,
P. davidiana).

Регион	Блоковые фиктивные переменные								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
СРср	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0	0	0	0	0	0
СРлс	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ВРср	0	0	1	0	0	0	0	0	0
УРюж	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ЗСюж	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ЗСст	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ССюж	0	0	0	0	0	0	1	0	0
ЗБюж	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ДВхш	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Липы (*Tilia cordata*,
T. parvifolia, *T. tomentosa*,
T. amurensis, *T. mandshurica*).

Регион	Блоковые фиктивные переменные					
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
СЕш	0	0	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0	0	0
СРст	0	1	0	0	0	0
ВРюж	0	0	1	0	0	0
УРюж	0	0	0	1	0	0
ДВам*	0	0	0	0	1	0
ДВман*	0	0	0	0	0	1

* ДВам – липа амурская, ДВман – липа маньчжурская

Дубы (*Quercus robur*, *Q. rubra*,
Q. longipes, *Q. sessiliflora*, *Q. frainetto*,
Q. petraea, *Q. mongolica*, *Q. serrata*)

Регион	Блоковые фиктивные переменные							
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
СЕчер*	0	0	0	0	0	0	0	0
СЕКрас*	1	0	0	0	0	0	0	0
СЕвар*	0	1	0	0	0	0	0	0
СЕСкал*	0	0	1	0	0	0	0	0
СЕвенг*	0	0	0	1	0	0	0	0
СРхш	0	0	0	0	1	0	0	0
СРст	0	0	0	0	0	1	0	0
ДВхш	0	0	0	0	0	0	1	0
Яп	0	0	0	0	0	0	0	1

Ясени (*Fraxinus excelsior*, *F. lanceolata*,
F. mandshurica)

Регион	Блоковые фиктивные переменные		
	X ₁	X ₂	X ₃
СЕш	0	0	0
СРлс	1	0	0
ВРст	0	1	0
ДВхш	0	0	1

Клёны (*Acer platanoides*,
A. campestre, *A. mandshuricum*,
A. mono)

Регион	Блоковые фиктивные переменные			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
СЕш	0	0	0	0
СРхш	1	0	0	0
СРст	0	1	0	0
ДВман**	0	0	1	0
ДВмелк**	0	0	0	1

* Дубы: СЕчер - черешчатый, СЕКрас - красный, СЕвар - вардимский, СЕСкал - скальный, СЕвенг – венгерский;

**Клёны: ДВман – маньчжурский, ДВмелк – мелколистный.

Регрессионные модели фитомассы деревьев

Уравнения для оценки фитомассы деревьев, включающие в качестве независимых переменных диаметр ствола и высоту дерева, а также один из блоков фиктивных переменных, приведенных выше, имеют общий вид:

$$\ln Pi = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln H)^2 + a_3(\ln D) + a_4(\ln D)^2 + a_5(\ln D \cdot \ln H) + \sum(a_i X_j). \quad (1)$$

Здесь и далее: P_i – масса i -й фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг (ствола, ветвей, листвы или хвои, надземная и подземная, соответственно P_{st} , P_{br} , P_f , P_a , P_r). Поскольку в аллометрической модели константа масштабирования (аллометрическая константа) изменяется по мере увеличения размера дерева (Poorter et al., 2015) и зависимость более корректно описывается функцией Корсуня-Бакмана (Korsun, 1935; Backman, 1938), в аллометрическую модель (1) введены переменные $(\ln H)^2$ и $(\ln D)^2$. Однако нужно иметь в виду, что в подобных случаях модель может описывать случайные отклонения на пределах диапазонов варьирования переменных, и соотношения фракций (особенно надземной и подземной фитомассы) в таком случае могут быть несогласованными (негармонизированными) (Jacobs, Cunia, 1980).

Ввиду того, что данных о массе корней существенно меньше, чем о фитомассе надземных фракций, в регрессионное уравнение для корней дополнительно включена в качестве независимой переменной надземная фитомасса. Тем самым, масса корней связывается с надземной фитомассой, но эта связь корректируется влиянием высоты и диаметра ствола:

$$\ln Pr = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln D) + a_3(\ln Pa) + \sum(a_i X_j). \quad (2)$$

Поскольку данные фитомассы сосен представлены как из естественных древостоев, так и из культур, в уравнение дополнительно включена бинарная переменная X , кодирующая принадлежность дерева к естественным древостоям ($X = 0$) или культурам ($X = 1$):

$$\ln Pi = a_0 + a_1(\ln H) + a_2(\ln H)^2 + a_3(\ln D) + a_4(\ln D)^2 + a_5(\ln D \cdot \ln H) + a_6 X + \sum(a_i X_j). \quad (3)$$

Ввод бинарной переменной в (3) для сосен в данном случае обусловлен тем, что эта модель не включает фактор густоты – основное отличие естественных сосняков и культур, особенно на первых этапах их роста.

Ниже даны характеристики уравнений (1)-(3) для каждого древесного вида.

1. Двухвойные сосны, естественные насаждения и культуры

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (2) и (3)						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(P_{st})$, кг	-3,6890	2,0545	-0,2963	0,8358	0,0986	0,1911	-
$\ln(P_{br})$, кг	-5,6715	1,6683	-0,6355	1,6969	0,2351	0,1194	-
$\ln(P_f)$, кг	-5,1903	0,7538	-0,6874	2,1059	-0,1218	0,5484	-
$\ln(P_a)$, кг	-3,2080	1,5307	-0,1631	1,2716	0,1799	-0,0429	-
$\ln(P_r)$, кг	-0,8373	-0,1659	-	0,1485	-	-	1,0011
	$a_7 X$	$a_8 X_1$	$a_9 X_2$	$a_{10} X_3$	$a_{11} X_4$	$a_{12} X_5$	$a_{13} X_6$
$\ln(P_{st})$, кг	0,0224	0,0918	-0,2966	-0,2293	0,7375	0,0902	0,0913
$\ln(P_{br})$, кг	0,2265	0,3720	0,2449	-0,1857	0,7428	-0,2783	0,3929
$\ln(P_f)$, кг	0,4473	0,7490	0,8306	0,3343	-0,6621	0,3130	0,5400

$\ln(Pa)$, кг	0,0964	0,1657	-0,1222	-0,1529	0,6043	0,0528	0,1363
$\ln(Pr)$, кг	-0,8257	-0,6192	-0,8956	-0,4407	0,1386	-0,9319	-0,5635
	$a_{14}X_7$	$a_{15}X_8$	$a_{16}X_9$	$a_{17}X_{10}$	$a_{18}X_{11}$	$a_{19}X_{12}$	$a_{20}X_{13}$
$\ln(Pst)$, кг	-0,0629	-0,1599	0,1206	-0,2532	-0,1719	-0,3290	-0,1511
$\ln(Pbr)$, кг	0,4724	0,0446	-0,2091	0,0015	-0,1656	-0,2364	0,6164
$\ln(Pf)$, кг	1,0944	0,4177	0,3586	0,4990	0,3100	0,2601	0,3522
$\ln(Pa)$, кг	0,3285	-0,0837	0,1056	-0,1525	-0,1188	-0,2887	0,0872
$\ln(Pr)$, кг	0,1542	-1,3488	-0,8084	-1,0624	-0,1432	-0,7283	0,1338
	$a_{21}X_{14}$	$a_{22}X_{15}$	$a_{23}X_{16}$	$a_{24}X_{17}$	R^2	SE	
$\ln(Pst)$, кг	-0,2509	-0,2765	-0,0892	0,3149	0,991	0,25	
$\ln(Pbr)$, кг	0,5088	-0,3688	0,3093	0,6030	0,957	0,55	
$\ln(Pf)$, кг	0,6664	0,2807	0,5017	0,5204	0,931	0,59	
$\ln(Pa)$, кг	-0,1177	-0,1944	0,0153	0,3969	0,988	0,29	
$\ln(Pr)$, кг	-0,0015	-0,0871	0,1097	0,4118	0,990	0,33	

Для остальных древесных пород выполнен расчет уравнений (1) и (2).

2. Лиственницы

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$	
$\ln(Pst)$, кг	-1,8110	-0,6893	0,6115	2,1250	0,1641	-0,4934	-	
$\ln(Pbr)$, кг	-0,5380	-1,1466	-1,5002	1,2242	-1,1965	3,0528	-	
$\ln(Pf)$, кг	-3,5492	1,1774	-1,9580	0,2320	-1,0580	3,0405	-	
$\ln(Pa)$, кг	-0,9083	-0,9365	0,2978	1,9939	-0,0703	0,0959	-	
$\ln(Pr)$, кг	-1,8010	-0,1132	-	0,6267	-	-	0,6769	
	a_7X_1	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	$a_{12}X_6$	$a_{13}X_7$	
$\ln(Pst)$, кг	-0,0513	-0,4015	-0,2352	-0,0838	-0,0086	-0,0736	0,0127	
$\ln(Pbr)$, кг	0,1231	0,6671	-0,4311	-0,7047	-0,4368	-0,2504	-0,0412	
$\ln(Pf)$, кг	0,5680	1,0806	0,4948	-0,1657	0,2153	0,7951	0,4399	
$\ln(Pa)$, кг	-0,0417	-0,1957	-0,2308	-0,1593	-0,0551	-0,0302	0,0860	
$\ln(Pr)$, кг	-1,4084	-0,1514	-0,5138	-0,5060	0,0112	-0,0734	0,1976	
	$a_{14}X_8$	$a_{15}X_9$	$a_{16}X_{10}$	$a_{17}X_{11}$	$a_{18}X_{12}$	$a_{19}X_{13}$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,2044	-0,0738	-0,0054	-0,1319	-0,3556	-0,0803	0,992	0,18
$\ln(Pbr)$, кг	-0,5444	-0,4648	-0,2909	-0,6420	-0,5336	-0,4936	0,908	0,53
$\ln(Pf)$, кг	0,3065	0,2795	0,1629	-0,2173	0,9563	-0,1630	0,903	0,46
$\ln(Pa)$, кг	0,1263	-0,0870	-0,0242	-0,1993	-0,3449	-0,1420	0,991	0,17
$\ln(Pr)$, кг	0,3491	0,3252	1,3740	0,6654	0,6617	0,4690	0,949	0,46

3. Ели

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$	a_7X_1
$\ln(Pst)$, кг	-1,5825	-	1,0777	1,1507	0,8585	-1,6076	-	-0,1219
$\ln(Pbr)$, кг	-2,3973	-	0,3456	1,0454	0,6754	-0,8323	-	0,2325
$\ln(Pf)$, кг	-1,9283	0,2959	-0,3642	0,6811	0,1711	0,3436	-	0,0120
$\ln(Pa)$, кг	-0,5079	-0,6070	1,1167	1,4008	0,8830	-1,6516	-	-0,0978
$\ln(Pr)$, кг	-2,0089	-0,0768	-	0,1360	-	-	1,0408	0,3916
	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	$a_{12}X_6$	$a_{13}X_7$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,1888	-0,2055	-0,1167	0,2171	0,2039	0,5795	0,992	0,21

$\ln(Pbr)$, кг	0,4092	0,4631	0,1368	0,3460	0,2147	0,9232	0,877	0,60
$\ln(Pf)$, кг	-0,2548	0,2872	-0,4459	0,2841	-0,6338	0,3645	0,910	0,46
$\ln(Pa)$, кг	0,1386	-0,0183	-0,2262	0,2052	0,0608	0,4979	0,986	0,24
$\ln(Pr)$, кг	0,5315	0,3865	0,8125	0,3064	0,3673	0,2822	0,972	0,40

4. Пихты

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,8766	2,0012	0,9513	0,3330	1,2636	-2,1284	-
$\ln(Pbr)$, кг	-3,0409	1,5502	1,3283	0,8008	2,0928	-3,5482	-
$\ln(Pf)$, кг	-2,6597	0,9569	-	0,5874	0,7777	-0,7485	-
$\ln(Pa)$, кг	-1,7903	1,7037	0,8611	0,3671	1,2970	-2,0844	-
$\ln(Pr)$, кг	-2,0653	-0,7469	-	1,1233	-	-	0,8153
	a_7X_1	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,1357	-0,8893	-0,0019	-0,1708	0,0643	0,995	0,19
$\ln(Pbr)$, кг	-0,2718	-2,2767	-0,0599	-0,2367	-0,6273	0,968	0,42
$\ln(Pf)$, кг	0,0956	-1,2137	-0,1671	0,0068	-0,0129	0,954	0,43
$\ln(Pa)$, кг	-0,1399	-1,1991	-0,0496	-0,1629	-0,0623	0,992	0,22
$\ln(Pr)$, кг	0,1233	-0,1524	0,2489	0,1907	0,3053	0,987	0,27

5. Кедрь

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,7649	1,8622	-0,3999	0,3351	-	0,4846	-
$\ln(Pbr)$, кг	-3,7675	1,9299	-0,3734	0,7687	-	0,2017	-
$\ln(Pf)$, кг	-3,3510	1,2725	-0,2592	0,9429	-	0,1084	-
$\ln(Pa)$, кг	-1,9274	1,5808	-0,3348	0,6276	-	0,3481	-
$\ln(Pr)$, кг	0,4333	-1,2002	-	-	-	-	1,2556
	a_7X_1	a_8X_2	R^2	SE			
$\ln(Pst)$, кг	0,2503	0,3252	0,991	0,30			
$\ln(Pbr)$, кг	0,3078	0,3985	0,955	0,63			
$\ln(Pf)$, кг	0,7505	0,5062	0,940	0,55			
$\ln(Pa)$, кг	0,2829	0,2968	0,986	0,33			
$\ln(Pr)$, кг	-1,3898	0,0887	0,996	0,17			

6. Берёзы

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,8338	1,2639	-0,2003	0,9009	-0,0670	0,4320	-
$\ln(Pbr)$, кг	-2,4735	0,4290	-0,9885	0,3627	-0,5885	1,9908	-
$\ln(Pf)$, кг	-2,9630	0,0458	-1,1086	0,2154	-0,8435	2,3199	-
$\ln(Pa)$, кг	-2,4085	0,8589	-0,1019	1,0826	-0,0231	0,3463	-
$\ln(Pr)$, кг	-1,0749	-0,5953	-	0,9772	-	-	0,7501
	a_7X_1	a_8X_2	a_9X_3	$a_{10}X_4$	$a_{11}X_5$	$a_{12}X_6$	$a_{13}X_7$
$\ln(Pst)$, кг	-0,1490	-0,2636	-0,1654	-0,1473	0,0906	-0,2369	0,1191
$\ln(Pbr)$, кг	-0,4457	-0,6821	-0,7716	-0,3831	-0,2403	0,3094	-0,1075

$\ln(Pf)$, кг	0,4098	0,4104	0,0348	0,5098	0,4632	0,9726	0,1971
$\ln(Pa)$, кг	-0,1566	-0,2446	-0,2700	-0,2237	0,0796	-0,0774	0,0623
$\ln(Pr)$, кг	-0,3712	-0,4212	-0,4883	-0,2095	-0,1441	-0,8753	-0,6396
	$a_{14} X_8$	$a_{15} X_9$	$a_{16} X_{10}$	$a_{17} X_{11}$	$a_{18} X_{12}$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,0654	0,0491	-0,1143	-0,1435	-0,0309	0,993	0,16
$\ln(Pbr)$, кг	0,4078	-0,3307	-0,1423	-0,1111	-0,3056	0,944	0,48
$\ln(Pf)$, кг	0,5117	-0,3736	0,3486	0,0672	-0,2596	0,913	0,46
$\ln(Pa)$, кг	0,1042	-0,0296	0,0058	-0,1110	-0,0828	0,980	0,28
$\ln(Pr)$, кг	-0,1746	-0,3000	-0,2279	-0,2299	0,0678	0,983	0,28

7. Осины и тополя

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)						
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,0058	-0,3269	0,4003	1,8013	0,1436	-0,2618	-
$\ln(Pbr)$, кг	-3,2301	0,3180	-1,0601	1,5883	-0,3806	1,4701	-
$\ln(Pf)$, кг	-1,5465	-1,6591	-0,8395	1,9750	-0,7833	1,8430	-
$\ln(Pa)$, кг	-0,8703	-1,4816	0,6450	2,4799	0,1888	-0,5062	-
$\ln(Pr)$, кг	-0,6357	-0,3145	-	-	-	-	0,9808
	$a_7 X_1$	$a_8 X_2$	$a_9 X_3$	$a_{10} X_4$	$a_{11} X_5$	$a_{12} X_6$	$a_{13} X_7$
$\ln(Pst)$, кг	-0,1591	0,0050	-0,1837	-0,0857	-0,2120	-0,1249	-0,1281
$\ln(Pbr)$, кг	0,0603	0,2632	0,0370	-0,1278	-0,1447	0,0286	0,0687
$\ln(Pf)$, кг	-0,0567	0,1302	-0,1218	-0,2438	-0,4550	-0,3153	0,1742
$\ln(Pa)$, кг	-0,1349	0,0492	-0,1329	-0,0722	-0,2253	-0,0957	-0,0953
$\ln(Pr)$, кг	-0,1254	0,5937	0,0046	0,0560	0,4688	0,1287	-1,2185
	$a_{14} X_8$	$a_{15} X_9$	R^2	SE			
$\ln(Pst)$, кг	-0,1374	-0,0993	0,994	0,14			
$\ln(Pbr)$, кг	0,0166	0,3797	0,955	0,42			
$\ln(Pf)$, кг	-0,3493	-0,1037	0,919	0,44			
$\ln(Pa)$, кг	-0,1211	-0,0299	0,993	0,16			
$\ln(Pr)$, кг	-0,0216	0,0543	0,973	0,40			

8. Липы

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln H)^2$	$a_3(\ln D)$	$a_4(\ln D)^2$	$a_5(\ln D \cdot \ln H)$	$a_6(\ln Pa)$	
$\ln(Pst)$, кг	-3,6924	1,0153	-	1,6708	-	0,0600	-	
$\ln(Pbr)$, кг	2,1265	-2,2223	-	0,3297	-	0,7552	-	
$\ln(Pf)$, кг	-3,5304	-0,7370	-	2,2408	-	0,0588	-	
$\ln(Pa)$, кг	-1,9163	0,3934	-	1,3247	-	0,2093	-	
$\ln(Pr)$, кг	0,7954	-1,6087	-	-	-	-	1,3616	
	$a_7 X_1$	$a_8 X_2$	$a_9 X_3$	$a_{10} X_4$	$a_{11} X_5$	$a_{12} X_6$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,0744	0,0702	-0,0044	-0,0676	0,2329	0,1557	0,983	0,18
$\ln(Pbr)$, кг	-0,5395	-0,3468	-1,4490	-0,6786	-0,1081	-0,2312	0,800	0,57
$\ln(Pf)$, кг	-0,6188	-0,7256	1,0274	-0,8997	0,1322	-0,4851	0,796	0,57
$\ln(Pa)$, кг	-0,1859	-0,2365	-0,1280	-0,1743	0,3402	0,0744	0,977	0,20
$\ln(Pr)$, кг	1,0767	1,0533	1,6137	0,8808	1,2553	0,7352	0,986	0,32

9. Дубы

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)							
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln D)$	$a_3(\ln D \cdot \ln H)$	$a_4(\ln Pa)$	$a_5 X_1$	$a_6 X_2$	
$\ln(Pst)$, кг	-2,1989	0,4291	1,7015	0,1037	-	0,1100	-0,2097	
$\ln(Pbr)$, кг	-2,6746	-1,3204	2,9567	0,1076	-	0,4258	0,0509	
$\ln(Pf)$, кг	-2,7996	-1,5672	3,0163	-0,0589	-	0,7051	0,0911	
$\ln(Pa)$, кг	-1,6047	0,0383	1,9695	0,0994	-	0,1551	-0,1898	
$\ln(Pr)$, кг	2,0114	-1,4417	-	-	1,1303	0,1771	-0,3587	
	$a_7 X_3$	$a_8 X_4$	$a_9 X_5$	$a_{10} X_6$	$a_{11} X_7$	$a_{12} X_8$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	0,0347	0,1158	-0,2472	0,0811	0,2089	-0,1174	0,997	0,14
$\ln(Pbr)$, кг	0,4220	0,0425	0,0911	0,1426	-1,9308	0,3072	0,972	0,41
$\ln(Pf)$, кг	0,2639	0,1731	-0,0706	0,2468	2,8010	0,4540	0,971	0,36
$\ln(Pa)$, кг	0,0863	0,0725	-0,2285	0,0597	0,3442	-0,0141	0,997	0,15
$\ln(Pr)$, кг	-0,5365	-0,4618	-0,4919	0,3770	0,0616	-0,5804	0,977	0,30

10. Ясени

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)				
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln D)$	$a_3(\ln D \cdot \ln H)$	$a_4(\ln Pa)$
$\ln(Pst)$, кг	-2,6643	0,8022	1,4275	0,1256	-
$\ln(Pbr)$, кг	3,8194	-3,8566	-0,0741	1,1830	-
$\ln(Pf)$, кг	2,1187	-3,7204	1,1360	0,6942	-
$\ln(Pa)$, кг	-1,2531	0,1088	1,1752	0,2913	-
$\ln(Pr)$, кг	1,0392	-0,6809	-	-	0,9205
	$a_5 X_1$	$a_6 X_2$	$a_7 X_3$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,3338	-0,0077	0,0398	0,999	0,11
$\ln(Pbr)$, кг	-0,7094	-0,4986	0,8560	0,950	0,66
$\ln(Pf)$, кг	0,2364	-0,2848	0,9014	0,905	0,63
$\ln(Pa)$, кг	-0,2454	0,0384	0,2933	0,998	0,11
$\ln(Pr)$, кг	-0,5179	-0,7452	-0,5045	0,997	0,14

11. Клёны

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные уравнений (1) и (2)					
	a_0	$a_1(\ln H)$	$a_2(\ln D)$	$a_3(\ln D \cdot \ln H)$	$a_4(\ln Pa)$	
$\ln(Pst)$, кг	-3,2086	0,9689	1,8050	0,0242	-	
$\ln(Pbr)$, кг	-3,4762	-1,1194	4,0409	-0,2313	-	
$\ln(Pf)$, кг	-2,7701	-1,6265	3,4130	-0,2345	-	
$\ln(Pa)$, кг	-2,4851	0,83	2,1317	0,0042	-	
$\ln(Pr)$, кг	-	-	-	-	-	
	$a_5 X_1$	$a_6 X_2$	$a_7 X_3$	$a_8 X_4$	R^2	SE
$\ln(Pst)$, кг	-0,3043	-0,0688	-0,2091	-0,0464	0,996	0,15
$\ln(Pbr)$, кг	0,3102	0,1242	0,1879	0,2357	0,976	0,40
$\ln(Pf)$, кг	1,4171	0,8259	0,7150	0,5552	0,976	0,25
$\ln(Pa)$, кг	-0,1393	0,0077	0,0049	0,0283	0,997	0,13
$\ln(Pr)$, кг	-	-	-	-	-	-

Заключение. В результате обсуждения проблемы применения аллометрических уравнений, предназначенных для оценки фитомассы деревьев, выявлено несколько неопределённостей.

- Для разных древесных видов в разных экорегионах применяются разные структурные формы уравнений, включающие в качестве независимых переменных или диаметр ствола, или площадь сечения, или его высоту, или интегральный показатель в виде произведения квадрата диаметра на высоту дерева, что исключает какую-либо возможность их регионального анализа.

- Использование упомянутой интегральной переменной, как показали специальные исследования на фактическом материале, совершенно неприемлемо для оценки массы кроны, поскольку оно дает меньшую точность оценки по сравнению с использованием только диаметра ствола. Тем не менее, при оценке фитомассы деревьев продолжается использование этой некорректной формы уравнения, приемлемой для оценки лишь объема и массы ствола.

- Не снята до сих пор неопределенность, связанная с приоритетом локальной или общей модели. На одних объектах утверждается приоритет локальных моделей и недопустимость обобщенных с приведением конкретных цифр, показывающих существенные смещения при их применении, а на других – доказывается прямо противоположное.

- Продолжается дискуссия на тему количества вводимых в модель переменных: одни утверждают, что чем больше переменных, тем точнее модель и шире область ее применения, а другие доказывают обратное, что дополнительные переменные отражают лишь локальные особенности местопроизрастания, что исключает их экстраполяцию на другие экорегионы.

На примере деревьев сосны обыкновенной разного возраста, размеров, происхождения, взятых из разных экорегионов Евразии, показано, что чем шире географическая область взятия этих модельных деревьев, включенных в однофакторное уравнение, тем больше ошибка при оценке фитомассы на единице площади в локальных условиях на основе подобного уравнения. Но при использовании двухфакторного уравнения размер области взятия модельных деревьев не влияет на ошибку, связанную с его применением.

Сформированная база данных о фитомассе деревьев лесообразующих пород Евразии (Усольцев, 2016а,б) дала возможность разработать региональные регрессионные модели для оценки структуры фитомассы деревьев лесообразующих древесных видов Евразии по диаметру ствола и высоте дерева. Кодировка экорегионов, в которых взяты модельные деревья, блоковыми фиктивными переменными (*dummy variables*) и ввод их в уравнение фитомассы дерева наряду с диаметром и высотой ствола, характеризует степень «дистанцирования», или отличия величины фитомассы равновеликих деревьев в каждом экорегионе от исходного (нулевого). Тем самым экорегионы ранжируются по величине фитомассы равновеликих деревьев.

Предложенная серия подеревных региональных моделей позволяет оценивать фитомассу на 1 га лесопокрытой площади по данным измерений диаметра и высоты дерева. Они составлены лишь для тех древесных видов, которые широко представлены в разных экорегионах. Точность предложенных моделей должна быть проверена на независимых выборках модельных деревьев, что станет возможным по мере получения дополнительных данных о фитомассе деревьев.

Список использованной литературы

Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.

Казимиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.

Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 275 с.

Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в сосняках беломошниках // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974а. С. 24-161.

Молчанов А.А. Продуктивность сосняков бруснично-мшистых в Прокудином бору Московской области // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974б. С. 78-140.

Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1978. 165 с.

Усольцев В.А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 216 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3376>).

Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).

Усольцев В.А. О применении регрессионного анализа в лесоводственных задачах // Лесная таксация и лесоустройство. 2004. № 1 (33). С. 49-55.

Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988. 253 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>).

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016а. 336 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных на рус. и англ. яз. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016б. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6102>).

Усольцев В.А., Канунникова О.В., Платонов И.В. Исследование ошибок при оценке углеродного пула лесов посредством аллометрических моделей // Современные проблемы устойчивого управления лесами, инвентаризации и мониторинга лесов. Матер. международной конфер. С.-Петербург: С.-ПбГЛТА, 2006. С. 363-370.

Уткин А.И. Методика исследований первичной биологической продуктивности лесов // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: Наука, 1982. С. 59-72.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, берёзы и осины в европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36-46.

Backman G. Drei Wachstumsfunktionen (Verhulst's, Gompertz', Backman's.) // Wilhelm Roux'Arch. Entwicklungsmechanik der Organismen. 1938. No 138. S. 37-58.

Feller M.C. Generalized versus site-specific biomass regression equations for *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* and *Thuja plicata* in Coastal British Columbia // Biores. Technol. 1992. Vol. 39. P. 9-16.

Jacobs M.W., Cunia T. Use of dummy variables to harmonize tree biomass tables // Canadian Journal of Forest Research. 1980. Vol. 10. No 4. P. 483-490.

Korsun F. Zivot normalniho porostu ve vzorcich // Lesn. Práce. 1935. Vol. 14. S. 335-342.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // Silva Fennica. 2006. Vol. 40. No. 4. P. 763-773.

Ogawa H., Yoda K., Ogino K., Kira T. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. 2. Plant biomass // Nature and Life in Southeast Asia. 1965. Vol. 4. P. 49-80.

Pastor J., Aber J.D., Melillo J.M. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some Northeast tree species // *Forest Ecology and Management*. 1984. Vol. 7. P. 265-274.

Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // *New Phytologist*. 2015. Vol. 208. Issue 3. P. 736-749 (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.13571/epdf>).

Prodan M. Holzmeßlehre. Frankfurt a.M.: J.D. Sauerländer's Verl., 1965. 644 s.

Singh T. Generalizing biomass equations for the boreal forest region of west-central Canada // *Forest Ecology and Management*. 1986. Vol. 17. P. 97-107.

Son Y., Hwang J.W., Kim Z.S., Lee W.K., Kim J.S. Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in central Korea // *Bioresource Technology*. 2001. Vol. 78. P. 251-255.

Tritton L.M., Hornbeck J.W. Biomass estimation for northeastern forests // *Ecol. Soc. Am. Bull.* 1981. Vol. 62. P. 106-107.

Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation // *Tree Physiology*. 2004. Vol. 24. P. 121-139.

Рецензент статьи: доктор сельскохозяйственных наук, профессор, проректор по научной работе Уральского государственного лесотехнического университета С.В. За-лесов.