

БИОЛОГИЯ

УДК 630*231

В.А. Усольцев^{1,2}, М.П. Воронов¹, К.В. Колчин²

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

**О НЕКОТОРЫХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЯХ В ОЦЕНКЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ В КОНТЕКСТЕ БИОГЕОГРАФИИ**



Ключевые слова: глобальное потепление, устойчивое развитие, биосферная роль лесов, биомасса деревьев, аллометрические модели, пробные площади, биологическая продуктивность, биогеография, весовая таксация, аддитивность уравнений.

Дан анализ проблемы оценки биологической продуктивности лесов в современном освещении с позиций биогеографии, развитие регрессионных (аллометрических) моделей в связи с переходом на весовую таксацию деревьев. Показаны неопределённости, связанные с применением «всеобщих» аллометрических моделей биомассы и их аддитивностью.

V.A. Usoltsev, M.P. Voronov, K.V. Kolchin

**ON SOME UNCERTAINTIES RELATED TO THE BIOLOGICAL PRODUCTIVITY
OF FORESTS IN THE CONTEXT OF BIOGEOGRAPHY**

Key words: global warming, sustainable development, biosphere role of forests, phyto-mass of trees, allometric models, sample plots, biological productivity, biogeography, tree weight inventory, equations additivity.

The problems of assessing the biological productivity of forests in the modern lighting from the standpoint of biogeography, the development of the regression (allometric) models in connection with the transition to the weight mensuration of trees. Some uncertainties associated with the local use of "generic" allometric models and their additivity have been shown. As additivity of tree biomass equations requires statistical analysis and software beyond the ordinary least squares method, but does not give higher indicators of equation adequacy compared to traditional methods, some questions arise: 1) what advantages give additive equations compared to conventional ones in theoretical and applied aspects, 2) do they have greater statistical meaning, rather than providing the estimates consistency only, 3) do additive systems of equations calculated at the levels of tree and forest give more correct distribution of tree biomass, as well as stand biomass and NPP, according to the main transcontinental climatic gradients, compared with existing patterns obtained with conventional methods using traditional equations? If positive answers of these questions will be received, this will create preconditions for the development of regional systems of taxation standards in the volume

and biomass indicators, compatible in their structure and a wide range of determinants, including climatic and ecological ones, and further - for geographically positioned species-specific mapping of biological productivity of Eurasian forests.

Усольцев Владимир Андреевич - доктор сельскохозяйственных наук, заслуженный лесовод России, профессор кафедры менеджмента и управления качеством Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН (Екатеринбург). Тел.: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Usoltsev Vladimir Andreyevich - Doctor of agricultural sciences, 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 (Yekaterinburg). Phone: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Воронов Михаил Петрович - кандидат технических наук, профессор кафедры менеджмента и управления качеством Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета (Екатеринбург). Тел.: (343)375-51-40; e-mail: mstrk@yandex.ru.

Voronov Mikhail Petrovich - PhD, Associate Professor of the Department of Quality Management at the Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: (343)375-51-40; e-mail: mstrk@yandex.ru.

Колчин Кирилл Владимирович – аспирант 2-го года обучения при Уральском государственном лесотехническом университете (Екатеринбург). Тел.: 8-999-567-20-33, e-mail: kirill_-92@mail.ru.

Kolchin Kirill Vladimirovich - Postgraduate of the Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: 8-999-567-20-33, e-mail: kirill_-92@mail.ru.

Введение

В последние годы мировая лесная экология переживает невиданный по масштабам информационный всплеск в оценке биологической продуктивности лесов в связи с наблюдаемыми с 1960-80-х годов изменениями климата (Будыко, 1977), предсказанными ещё в конце XIX века в работах «отца глобального потепления» Сванте Аррениуса (Arrhenius, 1896). Нынешний ажиотаж вокруг проблемы нарушенного углеродного баланса биосферы и сомнительных надежд на его восстановление путем тотального облесения планеты переходит в русло общей парадигмы устойчивого развития (sustainable development), в рамках которой на первый план выступает биосферно-стабилизирующая функция лесов, а ресурсно-сырьевое лесопользование рассматривается как подчиненная задача (Уткин, 1995). Оценка биологической продуктивности, или углероддепонирующей способности лесов, выходит на глобальный уровень, и ее повышение является одним из основных факторов стабилизации климата, однако «наше понимание изменений наземной фитомассы остается рудиментарным» (Houghton et al., 2009. P. 1).

Названная парадигма органично включает в себя также традиционно экологическую функцию выполнения лесами их санитарно-гигиенической, рекреационной и средозащитной роли, проблему замены ископаемого топлива альтернативными источниками, в том числе возобновляемой лесной органикой, и проблему будущего обеспечения человека белком – пищей растительного и животного происхождения. Леса являются наиболее емким резервуаром основного биогена планеты – углерода и определяют по существу функционирование биосферы, поскольку «пределы роста» цивилизации в немалой степени определяются продукционными пределами биосферы, в том

числе лесного покрова. Поэтому «требуется знать величину возможного оптимального продуцирования органического вещества в отдельных климатических зонах... Не менее важно решить вопрос о том, будет ли достигнут абсолютный предел производства органической массы...» (Вальтер, 1975).

Фитомасса лесов – неотъемлемая составляющая в решении проблемы устойчивого развития и является одним из основных индикаторов в климатических исследованиях (Wojinski et al., 2014; Müller et al., 2015). После сведения лесов в результате рубок и пожаров бывшие лесные площади становятся активным источником парниковых газов как в бореальных (Софронов и др., 2000; Shvidenko et al., 2011; Замолотчиков и др., 2013), так и в тропических лесах (Achard et al., 2002). В Индонезии, например, территории, лишившиеся лесов в результате интенсивных рубок с 2000 по 2010 годы, дают выброс парниковых газов, составляющий 80% общего их выброса в стране (Rutishauser et al., 2013). Аналогичный процесс идет в результате распашки целинных степей в лесостепной и степной зонах Евразии (Титлянова, 2000).

В настоящее время разработана и успешно осуществляется международная программа, инициированная, в частности, FAO, Программой ООН по окружающей среде (UNEP) и другими международными организациями, с аббревиатурой UN-REDD, а также её продвинутая версия REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation), цель которой – минимизация последствий изменения климата путём снижения эмиссий вследствие сведения и деградации лесов, путём повышения способности лесного покрова к депонированию и консервации атмосферного углерода и путём увеличения их биоразнообразия и повышения экологических функций (Dickson, Miles, 2010; Knowles et al., 2010; Teobaldelli, 2010a,b). Фитомасса лесов является основным «драйвером» сукцессионных изменений во вторичных лесах (Lohbeck et al., 2015), при этом скорость восстановления фитомассы лесов существенно опережает темпы восстановления биоразнообразия (Martin et al., 2013). Но биосфера может оставаться в стабильном состоянии и не деградировать лишь до тех пор, пока снижение ее биоразнообразия протекает медленнее, чем уменьшение общей биомассы биосферы (Свирижев, 1989). Множится количество «красных книг» (снижается биоразнообразие) и происходит вырубка естественных лесов на огромных территориях (снижается биомасса планеты), однако обе эти тенденции не подчиняются достаточно корректному количественному анализу, и мы не можем пока определить границы устойчивости биосферы.

В России корректная оценка углеродного баланса существующих лесов, а также лесов, заселяющих бывшие земли сельскохозяйственного пользования, лесных площадей, возобновляющихся после рубок и повальных пожаров, практически невозможна вследствие колоссальных неопределённостей при оценке расходной части углеродного цикла в лесных экосистемах. Более точно о балансе углерода можно судить по временной динамике фитомассы лесов, или по разности её оценок за определённый период (Софронов и др., 2000), в том числе в связи с климатическими флуктуациями и трендами (Kirilyanov et al., 2003; Nemani et al., 2003; Dai et al., 2013). Правда, для России и в этом случае имеется существенная неопределённость оценок в связи с тем, что информация о наших лесах в 80% случаев имеет просроченную давность в 20 и более лет (Трейфельд, 2013).

Состояние оценки биологической продуктивности лесных фитоценозов в аспекте биогеографии

На основе фактических данных о чистой первичной продукции (ЧПП) по зональному (широтному) профилю планеты установлены максимальные значения ЧПП в экваториальной области со снижением в направлении обоих полюсов (рис. 1 и 2) (Anderson et al., 2006; Huston, Wolverton, 2009), и такая же закономерность представлена на

рис. 3, характеризующем интенсивность почвенного дыхания по трансконтинентальному зональному градиенту.

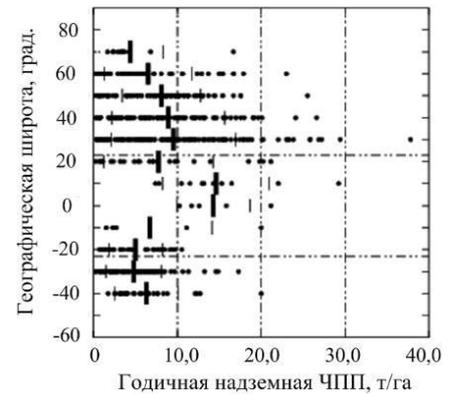
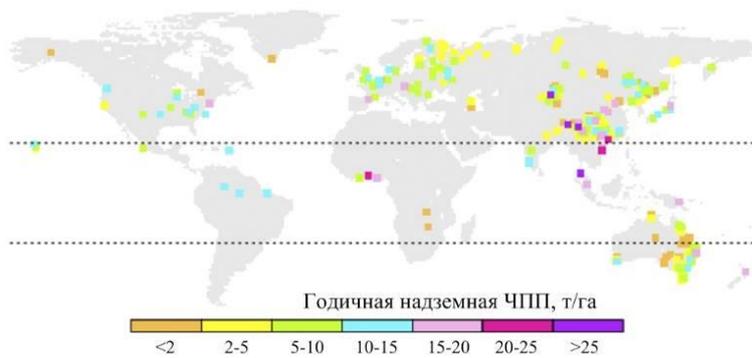


Рис. 1. Глобальное распределение годичной надземной ЧПП спелых насаждений планетарных лесов (Huston, Wolverton, 2009).

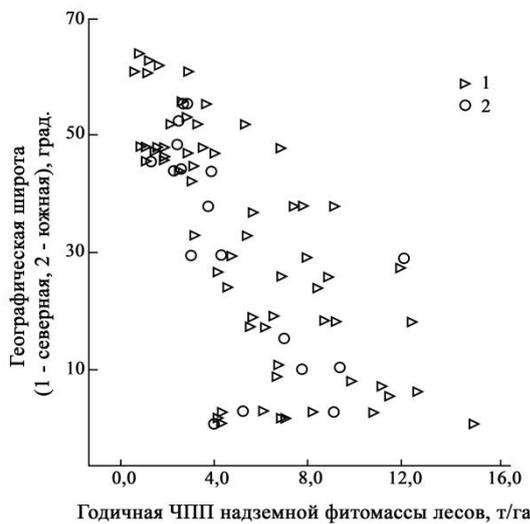


Рис. 2. Распределение годичной ЧПП надземной фитомассы лесов (т/га) от тропиков к полюсам (по: Anderson et al., 2006).

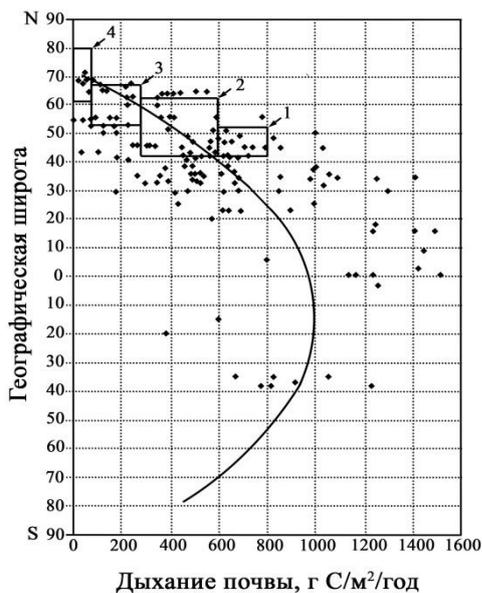


Рис. 3. Географическое распределение дыхания почв мира: 1 – чернозёмы; 2 – степные почвы; 3 – почвы тайги; 4 – мерзлотные почвы (по: Наумов, 2009).

Это свидетельствует о единой основе функционирования лесных экосистем, когда процессы депонирования атмосферного углерода (приходная часть углеродного цикла) взаимосвязаны с интенсивностью разложения органического вещества (расходная часть цикла). Более того, Г. Лундегорд (1937) показал, что интенсивность «фактора углекислоты» (Kohlensäurefaktor) можно косвенно установить через «абсолютное почвенное дыхание» и что «фактор углекислоты в значительной степени является эдафическим фактором» (Lundegårdh, 1927).

Однако закономерности, представленные на рис. 1 и 2, получены, во-первых, по обезличенному породному составу и, во-вторых, без учёта основных морфометрических показателей лесных фитоценозов, которые варьируют в естественных условиях в широком диапазоне, перекрывающем диапазон варьирования ЧПП под влиянием собственно температуры и осадков. По этой же причине оказалось невозможным проследить чёткие зависимости ЧПП от температуры и особенно – от количества осадков (рис. 4) (Luysaert et al., 2007). Тем не менее, в Китае для кедра корейского удалось установить значимые видоспецифичные связи ЧПП (как увеличение фитомассы кедровников за последние 50 лет) как с минимальными температурами в преддверии сезона роста, так и с осадками в его ходе (Fang et al., 2016). Установлена связь фитомассы с температурой также в гумидном поясе равнинных лесов планеты (Larjavaara, Muller-Landau, 2011).

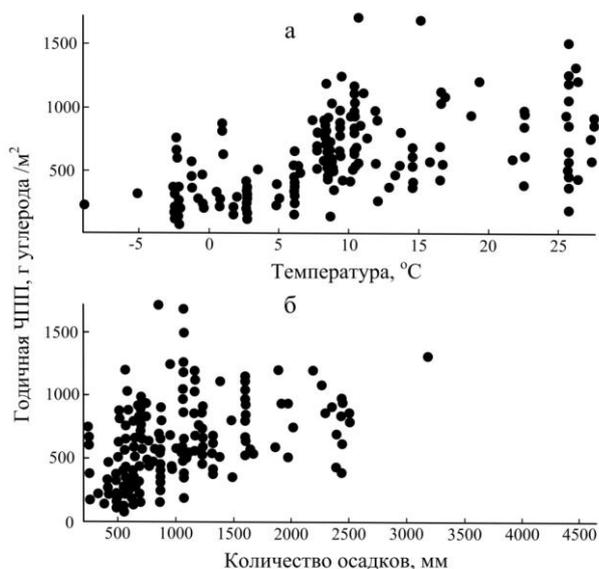


Рис. 4. Зависимость годичной ЧПП по углероду по данным 513 местообитаний 8 биомов Земного шара от среднегодовой температуры (а) и среднегодового количества осадков (б) (Luysaert et al., 2007).

В последние годы с целью уточнения подобных оценок для территории Евразии создана наиболее продвинутая база данных о фитомассе (более 8 тыс. определений) и ЧПП (более 2,6 тыс. определений) лесных экосистем, полученных на лесных пробных площадях (Усольцев, 2001; Usoltsev, 2013). На её основе были установлены статистически значимые видоспецифичные трансконтинентальные закономерности измене-

ния фитомассы и ЧПП в связи с зональностью территории и континентальностью климата (Усольцев, 2001, 2002, 2003, 2007, 2016a). Однако к настоящему времени выявились некоторые недостатки названного подхода и полученных результатов.

Во-первых, в качестве одного из градиентов принята природная зональность, обозначенная в уравнениях порядковым номером в направлении с севера на юг, что не сопрягается с имеющимися картами изменения локализации природных зон при глобальном потеплении (Кобак, Кондрашева, 1992).

Во-вторых, в формулу индексов континентальности входит географическая широта, и она же фактически опосредует природную зональность; тем самым, включённые в многофакторные уравнения в качестве независимых переменных природная зональность и индекс континентальности климата оказываются взаимно коррелированными, что, несмотря на статистическую значимость уравнений, не обеспечивает устойчивости оценок фитомассы и ЧПП.

В-третьих, впервые применённые в подобных исследованиях рекурсивные уравнения для фитомассы и ЧПП функционально не связаны и характеризуются односторонней направленностью, при которой закономерности, присущие ЧПП, накладываются на закономерности, полученные для фитомассы, но не наоборот. В связи с упомянутой разницей в объёме исходных данных закономерности изменения ЧПП при таком наложении корректируются закономерностями изменения фитомассы (вследствие более широкой представленности последней) и становятся более устойчивыми по сравнению с закономерностями, рассчитанными только по данным ЧПП (Усольцев, 2007,

2016a). Таким образом, при расчете трансконтинентальных уравнений зависимости фитомассы и ЧПП от климатически обусловленных факторов не обеспечивается их функциональная совместимость, или так называемая компатибельность (*compatibility*), которая позволяла бы получать уравнения для фитомассы по известным уравнениям для ЧПП и, что наиболее актуально, получать уравнения для ЧПП по известным уравнениям для фитомассы, поскольку в базах данных определений ЧПП в несколько раз меньше, чем фитомассы.

В-четвёртых, подобные системы уравнений не гармонизированы путём обеспечения принципа аддитивности, предполагающего, что суммарная фитомасса фракций, полученная по «фракционным» уравнениям, должна быть равна значению общей фитомассы, полученному по общему уравнению, что является частным случаем выше упомянутой проблемы компатибельности (Demaershalk, 1972; Burkhardt, Sprinz, 1984; Reed, Green, 1984; Green, Reed, 1985; Knoebel et al., 1986; Byrne, Reed, 1986; Tarp-Johansen et al., 1997; Silva et al., 2006). Примеры подобной гармонизации на уровне дровостоев уже имеются (Bi et al., 2010).

Состояние оценки фитомассы лесных деревьев в аспекте биогеографии

Пробные площади – это всегда участки относительно равномерной горизонтальной структуры, лишённые вкраплений полей и крупных «окон». К тому же у исследователей всегда имеется тенденция к отбору наиболее «привлекательных» насаждений (*attractive forests*) с «величественным» эффектом (*majestic effect*) (Sheil, 1995; Chave et al., 2004). Поэтому данные пробных площадей не отражают всего многообразия возрастной, видовой и морфологической структуры лесов, существенно изменяющейся со временем в реальных лесорастительных условиях, они характеризуют некую потенциальную продуктивность лесного покрова, поэтому оценки баланса углерода по временной динамике фитомассы лесов и ЧПП на лесопокрытых площадях с использованием баз подобных данных не будут устойчивыми.

Более корректную информацию о запасах фитомассы и органического углерода в ней, а также об их изменениях во времени и пространстве, дают аллометрические уравнения, вначале получившие распространение в биологии (Huxley, 1932; Gould, 1966; Zar, 1968; Ищенко, 1969; Мина, Клевезаль, 1976; Кофман, 1986; Гелашвили и др., 2013), а затем – в описании зависимостей той или иной фракции фитомассы от одного или нескольких массообразующих показателей дерева. Известны десятки разных структурных форм уравнений и тысячи самих уравнений такого типа, опубликованных в соответствующих сводках (см.: Усольцев, 2016б).

Несопоставимость различных структурных форм уравнений исключает какую-либо возможность их географического анализа в связи с определяющими биопродуктивность лесов климатическими факторами, например, с уровнем ФАР, гидротермическим коэффициентом, континентальностью климата и т.п. Для такого анализа необходима база данных о фактической структуре фитомассы деревьев, взятых так называемым «деструктивным» методом на пробных площадях. Подобные базы данных для лесов Евразии к настоящему времени сформированы (Усольцев, 2016б; Usoltsev, 2016; Schepaschenko et al., 2017). При наличии базы данных о структуре фитомассы деревьев появляется возможность разработки «всеобщих» видоспецифичных аллометрических уравнений, распределённых по трансконтинентальным климатическим градиентам и ориентированных на локальное применение.

Проблема состоит в оптимизации степени «всеобщности» таких уравнений, т.е. нахождения некоторого конечного их количества, каждое из которых в локальных условиях применения характеризовалось бы минимальными смещениями оценок. В упомянутых сводках представлены в основном уравнения для надземной фитомассы

деревьев, тогда как они должны быть «фракционными», т.е. рассчитанными по каждой из фракций (ствол, ветви, хвоя, корни), имеющих разное количество элементов питания, разную скорость круговорота веществ и разный вклад в годовичную продукцию. Поэтому уравнения, приемлемые для использования только по надземной фитомассе в целом, могут быть не приемлемы по фракционному составу, поскольку при одной и той же надземной фитомассе соотношение фракций в разных условиях существенно изменяется (Усольцев, 1985; Vi et al., 2004; Wolf et al., 2011). Сказанное означает наличие ещё одной проблемы – проблемы гармонизации уравнений путём соблюдения выше упомянутого принципа аддитивности, предполагающего, что суммарная фитомасса фракций, полученная по «фракционным» уравнениям, должна быть равна значению фитомассы, полученному по общему уравнению.

Развитие регрессионных (аллометрических) моделей в связи с переходом на весовую таксацию деревьев

Наука о количественной оценке лесных ресурсов – лесная таксация – изначально была ориентирована только на ствольную древесину, измеряемую в единицах объёма. Лишь в конце XIX века в Европе появились первые данные о фитомассе крон деревьев (Flury, 1892; Hartig, 1896), имевшие целью вовлечение в ресурсный потенциал всех компонентов дерева. В СССР идея комплексного использования древесных ресурсов стала реализовываться в 1930-1950-е годы путём количественной оценки лесосечных отходов и древесной зелени (охвоённых побегов) (Рейхардт, 1934; Солодкий, 1958), и были установлены первые зависимости и составлены соответствующие таблицы для оценки массы крон по известному диаметру ствола как в ресурсоведческой (Иевинь, Дикельсон, 1962; Томчук Р., Томчук Г., 1966; Усольцев, 1971), так и в биопродукционной (Яблоков, 1934; Коссович, 1940; Челядинова, 1941; Савина, 1941) ориентациях.

В США использование весовых единиц вместо кубометров и досковых футов при учете круглого леса и древесной щепы стало развиваться более интенсивно, чем потребление продуктов их переработки, начиная с 1955 года (Taras, 1956; Young et al., 1964). Этому способствовало развитие соответствующей техники и оборудования. Позднее в штате Мэн (США) возникла инициатива по получению в весовых единицах количества древесного волокна (клетчатки) из лесосечных отходов как дополнительного ресурса (рис. 5) вследствие проявившейся уже тогда тенденции превышения объемов заготовки относительно годовичного прироста древесного запаса (Young, Chase, 1965).

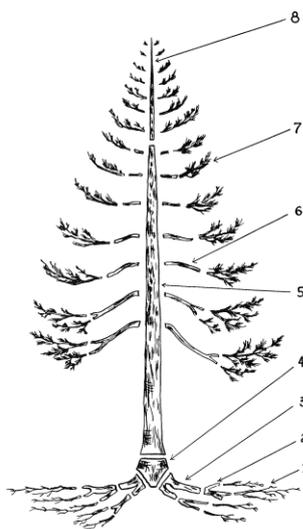


Рис. 5. Схема деления дерева на фракции, подлежащие весовому учёту (Young et al., 1964): 1 – корни тоньше 1 дюйма, 2 – средние корни, от 1 до 4 дюймов, 3 – крупные корни, толще 4 дюймов, 4 – пень, 5 – ликвидный ствол толщиной в верхнем отрубе до 4 дюймов, 6 – крупные ветви, толще 1 дюйма, 7 – тонкие ветви с хвоей, тоньше 1 дюйма, 8 – верхушка ствола.

В нашей стране необходимость весового метода учёта заготовленной древесины появилась в 1960-70-е годы в связи с переходом на вывозку стволов (хлыстов) на большегрузных автомобилях большими пачкам, в которых точно определить объёмы стволов было невозможно. Информация о весе такой пачки со специального взвешивающего устройства крана передавалась на пульт управления оператора, и затем с использованием разработанных переводных коэффициентов получа-

ли величину её объёма (Тамаркин, 1968; Тишкин, 1977).

Уже первые американские таблицы по оценке древесного волокна в стволе, ветвях и корнях включали два входа и составлялись на основе аллометрических уравнений с двумя независимыми переменными – диаметром ствола и высотой дерева (Young et al., 1963). Теория аллометрических моделей к тому времени уже получила известность (Thompson, 1917; Huxley, 1932; Reeve, Huxley, 1945). Аллометрические уравнения для оценки фитомассы деревьев, составляющих лесное сообщество, в течение последних 60-70 лет активно публикуются в экологической и лесной литературе в связи с необходимостью знаний о продукционном потенциале лесов, круговороте элементов питания, а также необходимых при оценке энергетического эквивалента фитомассы и депонирования углерода лесным покровом (Vi et al., 2004).

Сегодня общепризнанным стал метод построения аллометрических уравнений, связывающих общую фитомассу дерева и его фракций (таких, как древесина и кора ствола, ветви, листва, корни) с диаметром ствола или с диаметром и высотой ствола, с использованием логарифмической линеаризации данных и расчета характеристик уравнений методом наименьших квадратов (Kittredge, 1944; Baskerville, 1972; Satoo, Madgwick, 1982; Clutter et al., 1983; Overman et al., 1994; Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Broad, 1998; Burrows et al., 2000; O'Grady et al., 2000; Ketterings et al., 2001).

Предложены тысячи подобных уравнений для бореальных, умеренных, тропических, субтропических и полуаридных лесов (Schroeder et al., 1997; Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Návar et al., 2002). Если на начальных этапах применения и анализа таких уравнений основное внимание уделялось подбору «лучшей» модели (Schreuder, Swank, 1971), то в дальнейшем всё более осознавалась важность статистической значимости и устойчивости её характеристик (состоятельности оценок) (Chiyenda, Kozak, 1984), хотя в последнее время эти неопределённости пытаются разрешить комплексно, учитывая и то, и другое (Zasada et al., 2008; Sileshi, 2014; Daryaei, Sohrabi, 2015; Zhuo et al., 2016).

О проблеме аддитивности регрессионных уравнений

Различные фракции фитомассы дерева (ствол, кора, ветви, листва, корни) обладают разной скоростью круговорота веществ, разным химизмом и, следовательно, характеризуются разным вкладом в годовую продукцию. Обычно уравнения рассчитываются отдельно для каждой фракции без учета того, что, во-первых, имеется логическое несоответствие между оцененной по уравнениям суммарной фитомассой фракций и фитомассой, оцененной по общему уравнению для всего дерева, и, во-вторых, существует внутренняя корреляция между фракциями фитомассы данной совокупности модельных деревьев. В результате все опубликованные уравнения фитомассы рассчитаны без соблюдения принципа их аддитивности (Parresol, 1999, 2001).

Несоблюдение принципа аддитивности в таблицах фитомассы деревьев, составленных по соответствующим уравнениям, отмечалось уже в первых работах, посвященных оценке фитомассы деревьев по их легко измеряемым морфологическим показателям (Young et al., 1964). При соблюдении принципа аддитивности коэффициенты «фракционных» уравнений, рассчитанных для каждой фракции отдельно, путём последовательного суммирования дают в итоге значения соответствующих коэффициентов общего уравнения для массы всего дерева (Kurucz, 1969; Kozak, 1970; Cunia, Briggs, 1984, 1985; Návar et al., 2004), даже в случаях, когда число независимых переменных хотя бы в одном из «фракционных» уравнений меньше, чем в общем уравнении (Chiyenda, Kozak, 1984), и коэффициенты всех полученных уравнений непротиворечивы (Návar et al., 2004). Показатели адекватности (коэффициент детерминации и стан-

дартная ошибка) общего уравнения рассчитываются по специальным формулам на основе полученных характеристик «фракционных» уравнений.

Правда, есть некоторая потеря адекватности при оценке общей фитомассы дерева с соблюдением принципа аддитивности вследствие принудительного согласования регрессионных коэффициентов (показатели адекватности, оцененные по сумме квадратных остатков, в обычных (неаддитивных) уравнениях несколько выше, чем в аддитивных уравнениях), однако проверка по критерию Фишера показывает, что это различие обычно статистически не значимо (Návar et al., 2004). Полагают, что если в таблицах фитомассы, составляемых на основе регрессионных уравнений, аддитивность фракций не предусматривается, то можно использовать обычные (неаддитивные) уравнения (Chiyenda, Kozak, 1984). Предложено несколько процедур расчёта аддитивных уравнений разной структуры, но вследствие сопоставимости получаемых результатов неважно, какая из них применяется, и её выбор представляет пример субъективного решения (Cunia, Briggs, 1985).

Заключение

Фитомасса лесов – неотъемлемая составляющая в решении проблемы устойчивого развития, она является основным «драйвером» сукцессионных изменений во вторичных лесах, однако скорость восстановления их фитомассы существенно опережает темпы восстановления биоразнообразия, что означает снижение устойчивости биосферы, постепенную её деградацию и угрозу для существования человека. Поэтому снятие неопределённостей, связанных с оценкой биопродукции и биоразнообразия лесного покрова, имеет непреходящую ценность.

На основе сформированной базы данных о фитомассе и ЧПП лесов установлены статистически значимые видоспецифичные трансконтинентальные закономерности их изменения в связи с зональностью территории и континентальностью климата. Однако выявились некоторые недостатки названного подхода и полученных результатов. Во-первых, в качестве одного из градиентов принята природная зональность, обозначенная в уравнениях порядковым номером в направлении с севера на юг, что не сопрягается с имеющимися картами изменения локализации природных зон при глобальном потеплении.

Во-вторых, в формулы индекса континентальности входит географическая широта, и она же фактически опосредует природную зональность; тем самым, включённые в многофакторные уравнения в качестве независимых переменных природная зональность и индекс континентальности климата оказываются взаимно коррелированными, что не обеспечивает устойчивости оценок фитомассы и ЧПП.

В-третьих, не обеспечивается их функциональная совместимость, или так называемая компатибельность, которая позволяла бы получать уравнения для фитомассы по известным уравнениям для ЧПП и, что наиболее актуально, получать уравнения для ЧПП по известным уравнениям для фитомассы, поскольку в базах данных определений ЧПП в несколько раз меньше, чем фитомассы.

В-четвёртых, подобные системы уравнений не гармонизированы путём обеспечения принципа аддитивности, предполагающего, что суммарная фитомасса фракций, полученная по «фракционным» уравнениям, должна быть равна значению общей фитомассы, полученному по общему уравнению, что является частным случаем выше упомянутой проблемы компатибельности.

Необходимо подобрать для географического анализа фитомассы лесов такие климатические и экологические характеристики территории всей Евразии, которые бы обеспечивали для показателей биопродуктивности устойчивые взаимосвязи с ними, а

также – возможность видоспецифичного картирования фитомассы и ЧПП с использованием ГИС-технологий.

Для корректной оценки фитомассы и ЧПП на единице площади необходимы столь же корректные аллометрические уравнения для фитомассы деревьев. В литературе широко обсуждается возможность применения «всеобщих» аллометрических уравнений в локальных условиях, но только для надземной фитомассы деревьев, тогда как они должны быть «фракционными», т.е. рассчитанными по каждой из фракций. Поэтому уравнения, приемлемые для использования только по надземной фитомассе в целом, могут быть неприемлемы по фракционному составу, поскольку при одной и той же надземной фитомассе соотношение фракций в разных условиях существенно изменяется (Vi et al., 2004). Отсюда – проблема гармонизации уравнений путём соблюдения выше упомянутого принципа аддитивности, предполагающего, что суммарная фитомасса фракций, полученная по «фракционным» уравнениям, должна быть равна значению фитомассы, полученному по общему уравнению.

Поскольку обеспечение аддитивности уравнений фитомассы требует статистического анализа и программного обеспечения, выходящих за пределы обычного метода наименьших квадратов, но не даёт более высоких показателей адекватности уравнений по сравнению с традиционным методом, возникают вопросы: 1) какие преимущества дают аддитивные уравнения по сравнению с обычными в теоретическом и прикладном аспектах, 2) имеют ли они более весомый статистический смысл, нежели обеспечение лишь непротиворечивости оценок, и 3) даст ли использование аддитивных систем уравнений, рассчитанных на уровне дерева и древостоя, более корректные закономерности распределения фитомассы и ЧПП древостоев, а также фитомассы деревьев, по основным климатическим трансконтинентальным градиентам по сравнению с имеющимися закономерностями, полученными обычными методами с использованием традиционных уравнений?

Если будут получены положительные ответы на перечисленные вопросы, это создаст предпосылку для разработки региональных систем таксационных нормативов в объёмных и весовых показателях, совместимых по своей структуре и широкому кругу определяющих факторов, в том числе климатических и экологических, и далее – для геопозиционного видоспецифического картирования биологической продуктивности лесов Евразии.

Авторы выражают признательность кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН Григорию Борисовичу Кофману за полезные замечания, высказанные им в ходе подготовки рукописи.

Список использованной литературы

- Будыко М.И. Глобальная экология. М.: «Мысль», 1977. 328 с.
Вальтер Г. Растительность земного шара. Т. 3. М.: «Прогресс», 1975. 429 с.
Гелашвили Д.Б., Иудин Д.И., Розенберг Г.С., Якимов В.Н., Солнцев Л.А. Фракталы и мультифракталы в биоэкологии. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2013. 370 с.
Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 36-49.
Иевинь И.К., Дикельсон Э.О. Масса крон осины, берёзы и ели в кисличниках Латвии // Лесное хозяйство. 1962. № 4. С. 20-23.

Ищенко В.Г. Применение аллометрических уравнений в популяционной экологии животных // Тр. Института экологии растений и животных УрО РАН. Вып. 71. Вопросы эволюционной и популяционной экологии животных. Свердловск, 1969. С. 8-15.

Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю. Изменения локализации природных зон при глобальном потеплении // Экология. 1992. № 3. С. 9-18.

Коссович Н.Л. Влияние рубок ухода на ассимиляцию, освещение и прирост ели в елово-лиственном древостое // Рубки ухода за лесом. Л.: ЦНИИЛХ, 1940. С. 90-135.

Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 211 с.

Люддегорд Г. Влияние климата и почвы на жизнь растений (пер. с нем.). М.: Сельхозгиз, 1937. 387 с.

Мина Н.В., Клевезаль Г.А. Рост животных. М.: Наука, 1976. 291 с.

Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.

Рейхардт А.Ю. Лесные отходы как сырьё для ширпотреба // Лесная индустрия. 1934. № 7. С. 45-48.

Савина А.В. Изучение влияния рубок ухода на световой режим и энергию ассимиляции в сосновом насаждении // Физиологические исследования древесных пород / Труды ВНИИЛХ. 1941. Вып. 21. С. 5-29.

Свирижев Ю.М. Коэволюция человека и биосферы: современная глобалистика и концепции русской классической школы // Онтогенез. Эволюция. Биосфера. М.: Наука, 1989. С. 254-264.

Солодкий Ф.Т. О кормовом использовании древесной зелени // О зелёном веточном корме. Л.: ЛЛТА, 1958. Вып. 1 (9). С. 5-15.

Софронов М.А., Швиденко А.З., Голдаммер И.Г., Волокитина А.В. Влияние пожаров на баланс углерода в бореальной зоне Северной Евразии: создание информационной базы для моделей // Лесоведение. 2000. № 4. С. 3-8.

Тамаркин М.Л. О весовом методе учета древесного сырья // Лесная промышленность. 1968. № 7. С. 15.

Титлянова А.А. Освоение лесостепной и степной зон Западной Сибири увеличило эмиссию углерода // Степной бюллетень. 2000. № 8. С. 35-37.

Тишкин В.И. Учёт хлыстов методом взвешивания // Лесная промышленность. 1977. № 7. С. 21-22.

Томчук Р.И., Томчук Г.Н. Древесная зелень и ее кормовое использование. М.: Лесная промышленность, 1966. 241 с.

Трейфельд Р.Ф. Пора разобраться в приоритетах // Лесн. газета. 2013. 3 декабря.

Усольцев В.А. Березовые сучья – сырьё для производства древесностружечных плит // Информатор ЛатНИИЛХП. Рига, 1971. С. 78-83.

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. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 708 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>).

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>).

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 406 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3303>).

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>).

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 лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016б. 336 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).

Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. 1995. № 5. С. 3-20.

Челядинова А.И. Количество и характер развития хвои в сосновом насаждении // Физиологические исследования древесных пород / Труды ВНИИЛХ. 1941. Вып. 21. С. 30-50.

Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослестехиздат, 1934. 128 с.

Achard F., Eva H.D., Stibig H.-J., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau J.-P. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests // Science. 2002. Vol. 297. P. 999-1002.

Anderson K.J., Allen A.P., Gillooly J.F., Brown J.H. Temperature-dependence of biomass accumulation rates during secondary succession // Ecology Letters. 2006. No. 9. P. 673-682.

Arrhenius Svante. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground // Philosophical Magazine. 1896. Vol. 41. P. 237-276.

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

Bi H., Turner J., Lambert M.J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia // Trees. 2004. Vol. 18. P. 467-479.

Bi H., Long Y., Turner J., Lei Y., Snowdon P., Li Y., Harper R., Zerihun A., Ximenes F. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D.Don) plantations // Forest Ecology and Management. 2010. Vol. 259. P. 2301-2314.

Bojinski S., Verstraete M., Peterson T.C., Richter C., Simmons A., Zemp M. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014. Vol. 95. No. 9. P. 1431-1443.

Broad L.R. Allometry and growth // Forest Science. 1998. Vol. 44. No 3. P. 458-464.

Burkhart H.E., Sprinz P.T. Compatible cubic volume and basal area projection equations for thinned old-field loblolly pine plantations // Forest Science. 1984. Vol. 30. No. 1. P. 86-93.

Burrows W.H., Hoffmann M.B., Compton J.F., Back P.V., Tait L.J. Allometric relationships and community biomass estimates for some dominant eucalypts in Central Queensland woodlands // Australian Journal of Botany. 2000. Vol. 48. P. 707-714.

Byrne J.C., Reed D.D. Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine // Forest Science. 1986. Vol. 32. No. 2. P. 423-443.

Chave J., Condit R., Aguilar S., Hernandez A., Lao S., Perez R. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates // Phil. Trans. Royal Soc. London B. 2004. Vol. 359. P. 409-420.

Chiyenda S.S., Kozak A. Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14. P. 441-446.

Clutter J.L., Forston J.C., Pienaar L.V., Brister G.H., Bailey R.L. Timber management: A quantitative approach. New York: Wiley, 1983. 333 p.

Cunia T., Briggs R.D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results // Canadian Journal of Forest Research. 1984. Vol. 14. P. 376-384.

Cunia T., Briggs R.D. Forcing additivity of biomass tables: use of the generalized least-square method // Canadian Journal of Forest Research. 1985. Vol. 15. P. 23-28.

Dai L., Jia J., Yu D.P., Lewis B.J., Zhou L., Zhou W.M., Zhao W., Jiang L.H. Effects of climate change on biomass carbon sequestration in old-growth forest ecosystems on Changbai Mountain in Northeast China // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 300. P. 106–116.

Daryaei A., Sohrabi H. Additive biomass equations for small diameter trees of temperate mixed deciduous forests // Scandinavian Journal of Forest Research. 2015. Vol. 31. No. 4. P. 394-398.

Demaerschalk J.P. Converting volume equations to compatible taper equations // Forest Science. 1972. Vol. 18. P. 241-245.

Dickson B., Miles L. (eds). Proceedings of the UN-REDD workshop on identifying and promoting ecosystem co-benefits from REDD+. 27-29 April 2010, Kaetsu Centre, Cambridge. Prepared on behalf of the UN-REDD Programme. - UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK. 2010. 32 p.

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

Flury Ph. Untersuchungen über das Verhältniss der Reisigmasse zur Derbholzmasse // Mitt. Schweiz. Centralanstalt Forstl. Versuchswesen. 1892. Bd. 2. S. 25-32.

Gould S. Allometry and size in ontogeny and phylogeny // Biological Reviews. 1966. Vol. 41. P. 587-640.

Green E.J., Reed D.D. Compatible tree volume and taper equations for pitch pine // North. Journal of Applied Forest. 1985. Vol. 2. P. 14-16.

Hartig R. Wachstumsuntersuchungen an Fichten // Forstlich-Naturwissenschaftl. Zeitschrift. 1896. Bd. 5. S. 1-15; 33-45.

Houghton R.A., Hall F., Goetz S.J. Importance of biomass in the global carbon cycle // J. of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. P. 1 - 13 (G00E03, doi:10.1029/2009JG000935).

Huston M.A., Wolverton S. The global distribution of net primary production: resolving the paradox // Ecological Monographs. 2009. V. 79. No. 3. P. 343–377 (http://www.academia.edu/244228/The_global_distribution_of_net_primary_production_resolving_the_paradox).

Huxley J. Problems of relative growth. Methuen & Co., London, 1932. 296 p.

Ketterings Q.M., Coe R., Noordwijk M. van, Ambagau Y., Palm C.A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 146. P. 199-209.

Kirdyanov A., Hughes M., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic // Trees - Structure and Function. 2003. Vol. 17. P. 61–69.

Kittredge J. Estimation of amount of foliage of trees and stands // J. of Forestry. 1944. Vol. 42. No. 11. P. 905-912.

Knoebel B.R., Burkhardt H.E., Beck D.E. A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar // Forest Science Monograph. 1986. Vol. 27. 62 p.

Knowles T., McCall M., Skutsch M., Theron L. Preparing community forestry for REDD+: engaging local communities in the mapping and MRV requirements of REDD+ // Xianli Zhu et al. (Eds.). Pathways for Implementing REDD+: experiences from carbon markets and communities. UNEO. Perspectives series 2010. P. 141-151 (<http://doc.utwente.nl/96809/>).

Kozak A. Methods for ensuring additivity of biomass components by regression analysis // The Forestry Chronicle. 1970. Vol. 46. No. 5. P. 402–404.

Kurucz J. Component weights of Douglas-fir, western hemlock, and western red cedar biomass for simulation of amount and distribution of forest fuels. University of British Columbia, Forestry Department, M.F. thesis. 1969. 116 p.

Larjavaara M., Muller-Landau H.C. Temperature explains global variation in biomass among humid old-growth forests // *Global Ecology and Biogeography*. 2012. Vol. 21. P. 998–1006.

Lohbeck M., Poorter L., Martinez-Ramos M., Bongers F. Biomass is the main driver of changes in ecosystem process rates during tropical forest succession // *Ecology*. 2015. Vol. 96. P. 1242–1252.

Lundegårdh H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth // *Soil Science*. 1927. Vol. 23, No. 6. P. 417–453.

Luyssaert S., Inglis I., Jung M. et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database // *Global Change Biology*. 2007. Vol. 13. P. 2509–2537 (doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x).

Martin P.A., Newton A.C., Bullock J.M. Carbon pools recover more quickly than plant biodiversity in tropical secondary forests // *Proceedings of the Royal Society: B (Biological Sciences)*. 2013. Vol. 280. P. 1–8 (<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.2236>).

Müller A., Weigelt J., Götz A., Schmidt O., Alva I.L., Matuschke I., Ehling U., Beringer T. The role of biomass in the sustainable development goals: A reality check and governance implications. IASS Working Paper. Potsdam: Institute for Advanced Sustainability Studies, 2015. 36 p.

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 y Bosques*. 2004. Vol. 10. No. 2. P. 17–28.

Návar Ch.J.J., Nájera J., Jurado E. Biomass estimation equations in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico // *J. of Arid Environments*. 2002. Vol. 52. P. 167–179.

Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J., Myneni R.B., Running S.W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 // *Science*. 2003. Vol. 300. P. 1560–1563.

O'Grady A.P., Chen X., Eamus D., Hutley L.B. Composition, leaf area index and standing biomass of eucalypt open forests near Darwin in the Northern Territory, Australia // *Australian Journal of Botany*. 2000. Vol. 48. P. 629–638.

Overman J.P.M., Witte H.J.L., Saldarriaga J.G. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest // *J. Trop. Ecol.* 1994. Vol. 10. P. 207–218.

Parresol B.R. Additivity of nonlinear biomass equations // *Canadian Journal of Forest Research*. 2001. Vol. 31. P. 865–878.

Parresol B.R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparison // *Forest Science*. 1999. Vol. 45. P. 573–593.

Reed D.D., Green E.J. Compatible individual tree taper and volume ratio equations // *Forest Science*. 1984. Vol. 30. P. 977–990.

Reeve E., Huxley J. Some problems in the study of allometric growth // *Essays on growth and form*. Oxford: Univ. Press, 1945. P. 121–156.

Rutishauser E., Noor'an F., Laumonier Y., Halperin J., Rufi'ie, Hergoulch K., Verchot L. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 307. P. 219–225.

Satoo T., Madgwick H.A.I. Forest biomass. Nyhoff-Junk, The Hague, 1982. 152 p. (Forestry Sciences, No. 6).

Schepaschenko D., Shvidenko A., Usoltsev V.A., Lakyda P., Luo Y., Vasylyshyn R., Lakyda I., Myklush Y., See L., McCallum I., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A dataset of

forest biomass structure for Eurasia // Scientific Data. 2017. Vol. 4. Article No 170070. DOI: 10.1038/sdata.2017.70.

Schreuder H.T., Swank W.T. A comparison of several statistical models in forest biomass and surface area estimation // Forest biomass studies. Proc. of IUFRO Section 25, Young H.E. (ed.). College of Life Sci. and Agric., Univ. of Maine at Orono, ME. 1971. P. 125-136.

Schroeder P., Brown S., Mo J., Birdsey R., Cieszewski C. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data // Forest Science. 1997. Vol. 43. P. 424-434.

Sheil D. A critique of permanent plot methods and analysis with examples from Budoongo forest, Uganda // Forest Ecology and Management. 1995. Vol. 77. P. 11-34.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Vaganov E.A., Sukhinin A.I., Maksyutov S.S., McCallum I., Lakyda I.P. Impact of wildfire in Russia between 1998-2010 on ecosystems and the global carbon budget // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 441. Part 2. P. 1678-1682.

Sileshi G.W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures // Forest Ecology and Management. 2014. Vol. 329. P. 237-254.

Silva A.L., Campos J.C.C., Leite H.G., Souza A.L., Lopes P.F. Growth and yield prediction using the modified Buckman model // Revista Árvore, Viçosa-MG. 2006. Vol. 30. No. 5. P. 787-793 (<http://www.redalyc.org/html/488/48853012/>).

Taras M.A. Buying pulpwood by weight as compared with volume measure. USDA Forest Service, Southeast Forest Exper. Station. 1956. Paper 74. 11 p.

Tarp-Johansen M.J., Skovsgaard J.P., Madsen S.F., Johannsen V.K., Skovgaard I. Compatible stem taper and stem volume functions for oak (*Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Matt.) Liebl.) in Denmark // Ann. Sci. For. 1997. Vol. 54. P. 577-595.

Teobaldelli M., Doswald N. From REDD to REDD-plus: Implications for Measuring, Reporting and Verification (MRV). UN-REDD Programme. Cambridge, 2010a. 38 p.

Teobaldelli M., Doswald N., Dickson B. Monitoring for REDD+: carbon stock change and multiple benefits // Multiple Benefits Series 3. Prepared on behalf of the UN-REDD Programme. UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK. 2010b. 23 p.

Ter-Mikaelian M.T., Korzukhin M.D. Biomass equations for sixty-five North American tree species // Forest Ecology and Management. 1997. Vol. 97. P. 1-24.

Thompson D.A.W. On growth and form. Cambridge: Univ. Press, 1917. 793 p.

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 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).

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 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103>).

Wolf A., Ciais P., Bellassen V., Delbart N., Field C.B., Berry J.A. Forest biomass allometry in global land surface models // Global Biogeochemical Cycles. 2011. Vol. 25. Issue 3. GB3015. P. 1-16 (doi:10.1029/2010GB003917).

Young H.E., Gammon C.B., Hoar L.E. Potential fiber from red spruce and red maple logging residues // Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). 1963. Vol. 46. P. 256-259.

Young H. E., Strand L., Altenberger R. Preliminary fresh and dry weight tables for seven tree species in Maine. Maine Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin 12. 1964. 76 p.

Young H.E., Chase A.J. Fiber weight and pulping characteristics of the logging residue of seven tree species in Maine // Maine Agricultural Experiment Station. University of Maine. Technical Bulletin 17. 1965. 44 pp.

Zar J.R. Calculation and miscalculation of the allometric equation as a model in biological data // *BioScience*. 1968. Vol. 18. No. 12. P. 1118-1120.

Zasada M., Bronisz K., Bijak Sz., Wojtan R., Tomusiak R., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L. Wzory empiryczne do określania suchej biomasy nadziemnej części drzew i ich komponentów (Empirical formulae for determination of the dry biomass of aboveground parts of the tree) // *Sylvan*. 2008. No.3. P. 27–39 (польск. с англ. резюме).

Zhuo L., Tao H., Wei H., Chengzhen W. Compatible models of carbon content of individual trees on a *Cunninghamia lanceolate* plantation in Fujian Province, China // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. No. 3: e0151527. (doi:10.1371/journal.pone.0151527).

Рецензент статьи: профессор Уральского государственного лесотехнического университета, доктор с.-х. наук В.А. Азарёнок.