

5. Loetsch F., Zohrer F., Haller K. Forest Inventory. – Munchen: BLV Verlagsgesellschaft, 1973. – Vol. 2. – 469 p.
6. Gusev I.I. Tolshchina i obem kory drevesnykh stvolov eli // Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo: Mezhvuz. sb. nauch. tr. – Krasnoyarsk, 1981. – С. 24-30.
7. Nakhabtsev I.A. Taksatsiya drevesnoy kory: metodicheskie ukazaniya i tablitsy protsentov kory. – L.: LTA, 1990. – 34 с.
8. Shevelev S.L., Evstafev V.N. Taksatsiya kory v listvennichnykh drevostoyakh tsentralnoy chasti Sredney Sibiri // Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo. – 2007. – № 1 (37). – S. 60-64.
9. Shevelev S.L., Butenko V.M. Zakonomernosti formirovaniya kory u derevev pikhty belokoroy // Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo. Mezhvuz. sb. nauch. tr. – Krasnoyarsk: KPI, 1991. – S. 126-130.
10. Bezzabotnov B.E. Sortimentnaya tablitsa pikhty / Letaksatsionnyy spravochnik dlya yuzhnotaezhnykh lesov Sredney Sibiri // pod red. Sheveleva S.L. – M.: VNILM, 2002. – S. 86.
11. Falaleev E.N. Sortimentnaya tablitsa dlya drevostoev pikhty Krasnoyarskogo kraya: spravochnoe posobie po taksatsii i ustroystvu lesov Sibiri / pod red. G.P. Motovilova. – Krasnoyarsk, 1966. – S. 113-119.
12. Falaleev E.N. Sortimentnaya tablitsa dlya pikhtovykh drevostoev Nizhnego techeniya r. Angary: spravochnoe posobie po taksatsii lesov Sibiri. T. 1 / pod red. E.N. Falaleeva. – Krasnoyarsk: STI, 1974. – S. 140.
13. Polyakov V.S. Sortimentno-sortnye tablitsy dlya raznovozrastnykh drevostoev pikhty levoberezhya srednego techeniya r. Eniseya: spravochnoe posobie po taksatsii i ustroystvu lesov Sibiri / pod red. G.P. Motovilova. – Krasnoyarsk, 1966. – S. 120.
14. Krasikova A.V. Sortimentnaya tablitsa dlya pikhtovykh drevostoev Krasnoyarskogo kraya: spravochnoe posobie po taksatsii lesov Sibiri. T. 1 / pod red. E.N. Falaleeva. – Krasnoyarsk: STI, 1974. – S. 138-139.
15. Falaleev E.N. Polevoy spravochnik taksatora / E.N. Falaleev, N.V. Pavlov, G.K. Subochev, A.C. Smolyanov, S.L. Shevelev, E.L. Bezzabotnov i dr. – Krasnoyarsk, 1983. – 55 s.
16. Antonaytis V., Zhadeykis R. Standarti-zatsiya v oblasti drevesnogo prirosta. – Kaunas, 1977. – 104 s.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.



УДК 630*231

В.А. Усольцев, К.В. Колчин, А.А. Маленко
V.A. Usoltsev, K.V. Kolchin, A.A. Malenko

О НЕОБХОДИМОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА АЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ЛЕСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ КАК ОСНОВЫ КОРРЕКТНОЙ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДОДЕПОНИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ЛЕСОВ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

ON THE NEED OF FORMULATION AND ANALYSIS OF ALLOMETRIC MODELS OF FOREST TREE BIOMASS AS A BASIS FOR CORRECT ASSESSMENT OF CARBON DEPOSITING FUNCTION OF FORESTS (ANALYTICAL REVIEW)

Ключевые слова: биосферная роль лесов, парниковые газы, экосистемные услуги, изменение климата, аллометрические модели, морфометрические показатели, фитомасса деревьев, пробные площади, лесообразующие породы.

Keywords: biospheric role of forests, greenhouse gases, ecosystem services, climate change, allometric models, morphometric indices, tree biomass, sampling plots, forest-forming species.

Леса играют ключевую роль в углеродном балансе биоты и стабилизации климата. Наиболее точно о балансе углерода в лесных экосистемах можно судить по разности её оценок за определённый период. Для подобных оценок имеются базы данных о фитомассе лесных экосистем, полученных разными исследователями на лесных пробных площадях, которые характеризуют некую потенциальную продуктивность лесного покрова, и оценки фитомассы на лесопокрытых площадях с использованием подобных баз данных оказываются неустойчивыми. Более корректную информацию о запасах фитомассы и органического углерода в ней, а также об их изменениях во времени и пространстве даёт база данных о фактической структуре фитомассы деревьев, взятых так называемым «деструктивным» методом на пробных площадях. Авторами сформирована подобная база данных, как основа разработки аллометрических моделей для последующей оценки фитомассы на лесных площадях. Однако даже многофакторные модели подеревной фитомассы не могут претендовать на всеобщее применение из-за расхождений, обусловленных принадлежностью данных к разным природным зонам и влиянием неучтенных факторов. Таким образом, применение аллометрических уравнений при оценке фитомассы насаждений более предпочтительно по сравнению с моделями, оценивающими фитомассу насаждений непосредственно, однако выбор той или иной аллометрической модели в каждом конкретном случае представляет большую проблему. Сформированная авторами база подеревных данных для лесообразующих пород Евразии даёт возможность снизить значительную долю неопределённости и разработать оптимальные аллометрические модели, применимые в заданных регионах России и в заданных диапазонах таксационных характеристик насаждений.

Forests play a key role in carbon balance of biota and in climate stabilization. Carbon balance in forest ecosystems may be measured most accurately by the difference between its estimates for a particular period of time. For such estimations, there are databases of biomass of forest ecosystems derived by different researchers on forest sampling plots that characterize some potential productivity of forest cover. The values of biomass on forest areas obtained using such databases will likely be unstable. More accurate information upon biomass and organic carbon in it, and their changes in time and space is provided by a database of actual structure of biomass of single trees obtained on sampling plots with the so-called "destructive" method. The authors formed such a database as a basis for designing allometric models used to subsequent estimating of biomass on forest areas. However, even a multiple allometric model of tree biomass cannot be qualified for general use because of estimate discrepancies arising from data belonging to different natural zones and the influence of unaccounted factors. Thus, the use of allometric equations when estimating forest biomass is more preferable in comparison with models assessing the forest stand biomass directly. However, the choice of one or other allometric model in each case presents a major problem. The database of single trees compiled by the authors for forest-forming species growing in Eurasia gives a possibility to reduce the significant share of the mentioned uncertainty and to develop optimal allometric models applicable to specified regions of Russia and in the specified ranges of taxation characteristics of forest stands.

Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., проф., Засл. лесовод России, Уральский государственный лесотехнический университет; гл. н.с., Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург. Тел.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Колчин Кирилл Владимирович, аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Маленко Александр Анатольевич, д.с.-х.н., зав. каф. лесного хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru

Usoltsev Vladimir Andreyevich, Dr. Agr. Sci., Prof., Ural State Forestry Engineering University; Chief Staff Scientist, Botanical Garden, Ural Branch, Rus. Acad. of Sci., Yekaterinburg. Ph.: (343) 354-61-59. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Kolchin Kirill Vladimirovich, post-graduate student, Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg. E-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Malenko Aleksandr Anatolyevich, Dr. Agr. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Forestry, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-63-52. E-mail: malenko51@mail.ru.

В России с каждым годом усугубляется ситуация с оценкой биосферной роли лесов, что делает практически невозможной легализацию их статуса в качестве экологического донора при межгосударственных расчетах по экосистемным услугам. В течение последних десятилетий из сельскохозяйственного оборота вышли огромные площади, интенсивно зарастающие лесами [1], о вкладе которых в углеродный бюджет ничего неизвестно. Начиная с 2006 г., с вводом в действие нового Лесного ко-

декса резко возросли площади сгоревших и незаконно вырубленных лесов. Кроме того, в последние десятилетия в России происходит значительное увеличение площадей сгоревших лесов в результате потепления климата [2]. О текущем состоянии таких площадей, а также о их вкладе в увеличение эмиссии парниковых газов также ничего неизвестно по причине ликвидации системы Государственного учёта лесного фонда.

Установлено, что после сведения лесов бывшие лесные площади становятся активным источником парниковых газов как в бореальных [3-5], так и в тропических лесах [6]. В Индонезии, например, территории, лишившиеся лесов в результате интенсивных рубок с 2000 по 2010 гг., дают выброс парниковых газов, составляющий 80% общего их выброса в стране [7]. Аналогичный процесс идет в результате распашки целинных степей в лесостепной и степной зонах Евразии [8].

В последние годы 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, а также путём повышения способности лесного покрова к депонированию и консервации атмосферного углерода, путём увеличения их биоразнообразия и повышения экологических функций [9-12].

Корректная оценка углеродного баланса лесов, заселяющих бывшие земли сельскохозяйственного пользования, лесных площадей, возобновляющихся после рубок и павальных пожаров, а также площадей существующих лесов, информация о которых в 80% случаев имеет просроченную давность в 20 лет по причине ликвидации системы Государственного учёта лесного фонда [13], практически невозможна (если использовать разность между статьями его бюджета – эмиссией и депонированием), 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 [3], а также в связи с климатическими флуктуациями и трендами [14-16].

Для подобных оценок имеются базы данных о фитомассе и чистой первичной продукции лесных экосистем, полученных разными исследователями на лесных пробных площадях [17-22]. Пробные площади – это всегда участки относительно равномерной горизонтальной структуры, лишённые вкраплений полей и крупных «окон». По мнению Дж. Чейва [23], у исследователей всегда имеется тенденция к отбору наибо-

лее «привлекательных» насаждений (attractive forests) с «величественным» эффектом (majestic effect), по Д. Шейлу [24]. В Болгарии такие участки называют представительными насаждениями [25]. Поэтому данные пробных площадей не отражают всего многообразия возрастной, видовой и морфологической структуры лесов в реальных лесорастительных условиях, характеризуют некую потенциальную продуктивность лесного покрова, и оценки фитомассы на лесопокрытых площадях с использованием подобных баз данных, скорее всего, оказываются завышенными.

Более корректную информацию о запасах фитомассы и органического углерода в ней, а также об их изменениях во времени и пространстве даёт подеревная база данных, т.е. данных о фактической структуре фитомассы деревьев, взятых так называемым «деструктивным» методом на пробных площадях. Первый опыт формирования подобной базы данных для лесов Евразии в количестве 7330 деревьев 30 древесных и кустарниковых пород уже имеется [26, 27].

Получаемая на пробных площадях информация о структуре фитомассы деревьев обычно «сжимается», т.е. приводится к виду уравнений зависимости той или иной фракции фитомассы от одного или нескольких массообразующих показателей дерева. Известны десятки разных структурных форм уравнений [28-43].

Наибольшее распространение при оценке фитомассы дерева по наиболее информативному массообразующему показателю – диаметру ствола – получила аллометрическая (степенная) зависимость, имеющая биологическое обоснование [44, 45] и дающая возможность оперативно определять фитомассу на единице площади, используя лишь данные сплошного перечёта деревьев по ступеням толщины. Со временем аллометрию стали применять в качестве многофакторной зависимости от двух (диаметр ствола и высота дерева), трех (диаметр, высота, возраст дерева) и более массообразующих, легко измеряемых показателей [32].

Проблеме применения аллометрических моделей при оценке фитомассы и депонируемого ею углерода в рамках программы UN-REDD в лесах американского континента в 2013 г. была посвящена специальная конференция [46]. Основным источником неопределённости при оценке лесной фитомассы лежит в выборе приемлемой аллометрической модели [23, 47]. Оценки фитомассы деревьев и древостоев могут раз-

личаться вдвое в зависимости от выбранной модели [48].

В настоящее время в разных странах и континентах проводятся интенсивные исследования применимости так называемых «всеобщих» аллометрических моделей (*generic, generalized, common models*), которые включали бы некий оптимальный набор независимых переменных, обеспечивающий аллометрической модели приемлемую точность при оценке фитомассы насаждений на региональном уровне [7, 34, 37, 46-56].

Наиболее «всеобщий» характер имеет теоретическая модель Г. Веста [57] как симбиоз двух теорий – пайп-модели и фракталов – с фиксированным показателем степени $8/3$ (или 2,67), предполагающая возможность применения к любой древесной породе или их совокупности в любых лесорастительных условиях. Д. Цианис и М. Менкуччини [58] вывели обобщенную аллометрическую модель на базе мировой сводки для нескольких древесных пород и установили, что она даёт более высокую точность оценки фитомассы по сравнению с теоретической моделью Г. Веста. Аналогичный вывод был нами получен в исследовании аллометрических уравнений разного уровня обобщения в сосновых насаждениях [59].

Г. Вайледен с соавторами [55] вывели региональные аллометрические модели по данным 480 деревьев разных пород Мадагаскара с уровнем их эндемизма более 95%, включающие кроме диаметра ствола также его высоту и базисную плотность древесины, и сопоставили их точность с аналогичной моделью Дж. Чейва с соавторами [54], полученной по данным 2410 деревьев разных тропических пород, и получили примерно одинаковый результат. При исследовании аллометрических уравнений разного уровня обобщения в сосновых насаждениях, включающих в качестве независимых переменных в одном случае только диаметр ствола, а во втором – диаметр и высоту дерева, установлено, что при повышении уровня обобщения в первом случае ошибка определения возрастает с 11 до 26%, а во втором случае не изменяется, оставаясь на уровне 19% [59]. Теоретически использование двухфакторной аллометрии по сравнению с однофакторной должно давать повышенную точность, особенно в случаях, когда высоты деревьев при одном и том же диаметре ствола в реальных условиях варьируют в большом диапазоне.

Х. Вирт с соавторами [53] исследовали аллометрическую модель надземной фитомассы, включающую три независимых переменных – диаметр ствола, высоту и возраст дерева, и сопоставили ее с многофакторными моделями, включающими характеристики конкурентных отношений, класс бонитета и высоту над уровнем моря. Исходная сводка данных фитомассы деревьев ели европейской в количестве 688 определений была сформирована из независимых выборок, взятых на 102 пробных площадях. Авторами сделан вывод, что даже многофакторные модели подеревной фитомассы, рассчитанные по большим и достаточно репрезентативным исходным сводкам данных, не могут претендовать на всеобщее применение из-за расхождений, обусловленных принадлежностью данных к разным природным зонам и влиянием неучтенных факторов.

Таким образом, применение аллометрических уравнений при оценке фитомассы насаждений более предпочтительно по сравнению с моделями, оценивающими фитомассу насаждений непосредственно, однако выбор той или иной аллометрической модели в каждом конкретном случае представляет большую проблему. Сформированная авторами база подеревных данных для лесообразующих пород Евразии [26, 27] даёт возможность снизить значительную долю неопределённости и разработать оптимальные аллометрические модели, применимые в заданных регионах России и в заданных диапазонах таксационных характеристик насаждений.

Библиографический список

1. Балашкевич Ю.А. Заращение бывших сельскохозяйственных земель древесной растительностью // Актуальные проблемы лесного комплекса. – Брянск: БГИТА, 2006. – Вып. 13. – С. 4-6.
2. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 50-61.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Achard F., Eva H.D., Stibig H.J., Maуах P., Gallego J., Richards T., Malingreau J.P. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests // Science. – 2002. – Vol. 297 (5583). – P. 999-1002.
7. 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.
8. Титлянова А.А. Освоение лесостепной и степной зон Западной Сибири увеличило эмиссию углерода // Степной бюллетень. – 2000. – № 8. – С. 35-37.
9. 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.
10. 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/>).
11. Teobaldelli M., Doswald N. From REDD to REDD-plus: Implications for Measuring, Reporting and Verification (MRV). Draft Paper. UN-REDD Programme. – Cambridge, 2010. – 38 p.
12. 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. – 2010. – 23 p.
13. Трейфельд Р.Ф. Пора разобраться в приоритетах // Лесная газета. – 2013. – 3 декабря.
14. 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. – 2003. – Vol. 17. – P. 61-69.
15. 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.
16. 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.
17. DeAngelis D.L., Gardner R.H., Shugart H.H. Productivity of forest ecosystems studied during the IBP: The woodlands data set // Reichle D. E. (ed.). Dynamic properties of forest ecosystems. IBP-23. – Cambridge: Univ. Press, 1981. – P. 567-672.
18. Cannell M.G.R. World forest biomass and primary production data. – London: Academic Press, 1982. – 391 p.
19. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.
20. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 708 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>).
21. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 570 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>).
22. Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and reharmonized. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013. – ISBN 978-5-94984-438-0 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).
23. Chave J., Condit R., Aguilar S., Hernandez A., Lao S., Perez R. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. – 2004. – Vol. 359 (1443). – P. 409-420.
24. Sheil D. A critique of permanent plot methods and analysis with examples from Budongo forest, Uganda // Forest Ecology and Management. – 1995. – Vol. 77. – P. 11-34.
25. Нинов Н. Постижения и задачи на изследованята в областта на биологичния кръговрат на елементите и веществата в екосистемите в България // Горскостопан-

- ска наука. – 1986. – Т. 23. – № 2. – С. 3-11 (болг.).
26. Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. – 336 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).
27. Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. CD-version in English and Russian. – Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2016. – ISBN 978-5-94984-600-1 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6103>).
28. Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. – М.: Гослесбумиздат, 1934. – 128 с.
29. Kittredge J. Estimation of amount of foliage of trees and stands // *J. of Forestry*. – 1944. – Vol. 42. – Vol. 11. – P. 905-912.
30. Усольцев В.А. Взаимосвязь некоторых таксационных элементов кроны и ствола у березы пушистой в Северном Казахстане // *Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана*. – 1971. – № 2. – С. 80-84.
31. 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>).
32. Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. – Новосибирск: Наука; Сибирское отделение, 1988. – 253 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>).
33. Усольцев В.А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 216 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3376>).
34. Crow T.R. Common regressions to estimate tree biomass in tropical stands // *Forest Science*. – 1978. – Vol. 24 (1). – P. 110-114.
35. Wang J.R., Zhong A.L., Kimmins J.P. Biomass estimation errors associated with the use of published regression equations of paper birch and trembling aspen // *North. J. Appl. For.* – 2002. – Vol. 19. – P. 128-136.
36. Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., Abaimov A.P. et al. Size-mass allometry and biomass allocation of two larch species growing in the continuous permafrost region in Siberia // *Forest Ecology and Management*. – 2006. – Vol. 222. – P. 314-325.
37. Case B.S., Hall R.J. Assessing prediction errors of generalized tree biomass and volume equations for the boreal forest region of west-central Canada // *Can. J. For. Res.* – 2008. – Vol. 38. – P. 878-889.
38. Hosoda K., Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // *J. For. Res.* – 2010. – Vol. 15 (5). – P. 299-306.
39. Zianis D., Xanthopoulos G., Kalabokidis K., Kazakis G., Ghosn D., Rousou O. Allometric equations for aboveground biomass estimation by size class for *Pinus brutia* Ten. trees growing in North and South Aegean islands, Greece // *European Journal of Forest Research*. – 2011. – Vol. 130 (2). – P. 145-160.
40. Stark H., Nothdurft A. and Bauhus J. Allometries for widely spaced *Populus* ssp. and *Betula* ssp. in nurse crop systems // *Forests*. – 2013. – Vol. 4. – P. 1003-1031.
41. Bijak Sz., Zasada M., Bronisz A., Bronisz K., Czajkowski M., Ludwisiak L., Tomusiak R., Wojtan R. Estimating coarse roots biomass in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland // *Silva Fennica*. – 2013. – Vol. 47 (2).
42. Cai S., Kang X., Zhang L. Allometric models for aboveground biomass of ten tree species in northeast China // *Ann. For. Res.* – 2013. – Vol. 56 (1). – P. 105-122.
43. Hossain M., Shaikh M.A., Saha C., Abdullah S.M.R., Saha S., Siddique M.R.H. Above-ground biomass, nutrients and carbon in *Aegiceras corniculatum* of the Sundarbans // *Open Journal of Forestry*. – 2016. – Vol. 6. – P. 72-81 (<http://www.scirp.org/journal/ojf>).
44. Huxley J. Problems of relative growth. – Methuen & Co.: London, 1932. – 296 p.
45. Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. – Новосибирск: Наука, 1986. – 211 с.
46. Cifuentes-Jara M., Henry M. Proceedings of the regional technical workshop on Tree Volume and Biomass Allometric Equations in South and Central America, 21-24 May 2013, UN-REDD MRV Report 12. Turrialba, Costa Rica, 2013. – 92 p.
47. Molto Q., Rossi V., Blanc L. Error propagation in biomass estimation in tropical forests // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2013. – Vol. 4. – P. 175-183.
48. Basuki T.M., Van Laake P.E., Skidmore A.K., Hussin Y.A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests // *Forest*

Ecology and Management. – 2009. – Vol. 257. – P. 1684-1694.

49. Schmitt M.D.C., Grigal D.F. Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh. // Can. J. For. Res. – 1981. – Vol. 11. – P. 837-840.

50. Ares A., Fownes J.H. Comparisons between generalized and specific tree biomass functions as applied to tropical ash (*Fraxinus uhdei*) // New Forests. – 2000. – Vol. 20. – P. 277-286.

51. 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.

52. Ben Brahim M., Gavaland A., Cabannes A. Generalized allometric regression to estimate biomass of *Populus* in short-rotation coppice // Scand. J. For. Res. – 2000. – Vol. 15. – P. 171-176.

53. 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.

54. Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Folster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riera B., Yamakura T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // Oecologia. – 2005. – Vol. 145. – P. 87-99.

55. Vieilledent G., Vaudry R., Andriamanohisoa S.F.D., Rakotonarivo O.S., Randrianasolo Z.H., Razafindrabe H.N., Bidaud Rakotoarivony C., Ebeling J., Rasamoelina M. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models // Ecological Applications. – 2012. – Vol. 22 (2). – P. 572-583.

56. Stas S.M., Rutishauser E., Chave J., Anten N.P.R., Laumonier Y. Estimating the aboveground biomass in an old secondary forest on limestone in the Moluccas, Indonesia: Comparing locally developed versus existing allometric models // Forest Ecology and Management. – 2017. – Vol. 389. – P. 27-34.

57. West G.B., Brown J.H., Engquist B.J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system // Nature. – 1999. – Vol. 400. – P. 664-667.

58. Zianis D., Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass // Forest Ecology and Management. – 2004. – Vol. 187. – P. 311-332.

59. 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. Междунар. конф. – СПб.: СПбГЛТА, 2006. – С. 363-370.

References

1. Balashkevich Yu.A. Zarastanie byvshikh selskokhozyaystvennykh zemel drevesnoy rastitelnost'yu // Aktualnye problemy lesnogo kompleksa. – Vyp. 13. – Bryansk: BGITA, 2006. – S. 4-6.

2. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii // Lesovedenie. – 2013. – № 5. – S. 50-61.

3. Sofronov M.A., Shvidenko A.Z., Gollammer I.G., Volokitina A.V. Vliyanie pozharov na balans ugleroda v boreal'noy zone Severnoy Evrazii: sozдание informatsionnoy bazy dlya modeley // Lesovedenie. – 2000. – № 4. – S. 3-8.

4. 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.

5. Zamolodchikov D.G., Grabovskiy V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V. Vliyanie pozharov i zagotovok drevesiny na uglerodnyy balans lesov Rossii // Lesovedenie. – 2013. – № 5. – S. 36-49.

6. 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 (5583). – P. 999-1002.

7. Rutishauser E., Noor'an F., Laumonier Y., Halperin J., Ruffie, Hergoualch 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.

8. Titlyanova A.A. Osvoenie lesostepnoy i stepnoy zon Zapadnoy Sibiri uvelichilo emissiyu ugleroda // Stepnoy byulleten. – 2000. – № 8. – S. 35-37.

9. 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.

10. 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. – R. 141-151 (<http://doc.utwente.nl/96809>).

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

12. 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. – 2010. – 23 p.

13. Treyfeld R.F. Pora razobratsya v prioritetakh // Lesnaya gazeta. – 2013. – 3 dekabrnya.

14. Kirdeyanov 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. – 2003. – Vol. 17. – P. 61-69.

15. 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.

16. 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.

17. DeAngelis D.L., Gardner R.H., Shugart H.H. Productivity of forest ecosystems studied during the IBP: The woodlands data set // Reichle D. E. (ed.). Dynamic properties of forest ecosystems. IBP-23. – Cambridge Univ. Press, 1981. – P. 567-672.

18. Cannell M.G.R. World forest biomass and primary production data. – London: Academic Press, 1982. – 391 p.

19. Bazilevich N.I. Biologicheskaya produktivnost ekosistem Severnoy Evrazii. – M.: Nauka, 1993. – 293 s.

20. Usoltsev V.A. Fitomassa lesov Severnoy Evrazii: baza dannykh i geografiya. – Ekaterinburg: UrO RAN, 2001. – 708 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>).

21. Usoltsev V.A. Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii. – Ekaterinburg: UrO RAN, 2010. – 570 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>).

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

23. Chave J., Condit R., Aguilar S., Hernandez A., Lao S., Perez R. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. – 2004. – Vol. 359 (1443). – P. 409-420.

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

25. Ninov N. Postizheniya i zadachi na izsledovaniyata v oblastta na biologichniya krgovrat na elementite i veshchestvata v ekosistemite v Blgariya // Gorskostopanska nauka. – 1986. – T. 23. – № 2. – S. 3-11 (bolg.).

26. Usoltsev V.A. Fitomassa modelnykh derevev lesoobrazuyushchikh porod Evrazii: baza dannykh, klimaticheski obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy. – Ekaterinburg: Uralskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskij universitet, 2016. – 336 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).

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

28. Yablokov A.S. Kultura listvennitsy i ukhod za nasazhdeniyami. – M.: Goslesbumizdat, 1934. – 128 s.

29. Kittredge J. Estimation of amount of foliage of trees and stands // J. of Forestry. – 1944. – Vol. 42. – Vol. 11. – P. 905-912.

30. Usoltsev V.A. Vzaimosvyaz nekotorykh taksatsionnykh elementov krony i stvola u berezy pushistoy v Severnom Kazakhstane // Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki Kazakhstana. – 1971. – № 2. – S. 80-84.

31. Usoltsev V.A. Modelirovanie struktury i dinamiki fitomassy drevostoev. - Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyarskogo un-ta, 1985. - 191 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>).
32. Usoltsev V.A. Rost i struktura fitomassy drevostoev. - Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otd-nie, 1988. - 253 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3352>).
33. Usoltsev V.A. Bioekologicheskie aspekty taksatsii fitomassy derevev. - Ekaterinburg: UrO RAN, 1997. - 216 s. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3376>).
34. Crow T.R. Common regressions to estimate tree biomass in tropical stands // *Forest Science*. - 1978. - Vol. 24 (1). - P. 110-114.
35. Wang J.R., Zhong A.L., Kimmins J.P. Biomass estimation errors associated with the use of published regression equations of paper birch and trembling aspen // *North. J. Appl. For.* - 2002. - Vol. 19. - P. 128-136.
36. Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., Abaimov A.P., et al. Size-mass allometry and biomass allocation of two larch species growing in the continuous permafrost region in Siberia // *Forest Ecology and Management*. - 2006. - Vol. 222. - P. 314-325.
37. Case B.S., Hall R.J. Assessing prediction errors of generalized tree biomass and volume equations for the boreal forest region of west-central Canada // *Can. J. For. Res.* - 2008. - Vol. 38. - P. 878-889.
38. Hosoda K., Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // *J. For. Res.* - 2010. - Vol. 15 (5). - P. 299-306.
39. Zianis D., Xanthopoulos G., Kalabokidis K., Kazakis G., Ghosn D., Rousou O. Allometric equations for aboveground biomass estimation by size class for *Pinus brutia* Ten. trees growing in North and South Aegean islands, Greece // *European Journal of Forest Research*. - 2011. - Vol. 130 (2). - P. 145-160.
40. Stark H., Nothdurft A. and Bauhus J. Allometries for widely spaced *Populus* ssp. and *Betula* ssp. in nurse crop systems // *Forests*. - 2013. - Vol. 4. - P. 1003-1031.
41. Bijak Sz., Zasada M., Bronisz A., Bronisz K., Czajkowski M., Ludwisiak L., Tomusiak R., Wojtan R. Estimating coarse roots biomass in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland // *Silva Fennica*. - 2013. - Vol. 47 (2).
42. Cai S., Kang X., Zhang L. Allometric models for aboveground biomass of ten tree species in northeast China // *Ann. For. Res.* - 2013. - Vol. 56 (1). - P. 105-122.
43. Hossain M., Shaikh M.A., Saha C., Abdullah S.M.R., Saha S., Siddique M.R.H. Above-ground biomass, nutrients and carbon in *Aegiceras corniculatum* of the Sundarbans // *Open Journal of Forestry*. - 2016. - Vol. 6. - P. 72-81. (<http://www.scirp.org/journal/ojf>).
44. Huxley J. Problems of relative growth. - Methuen & Co.: London, 1932. - 296 p.
45. Kofman G.B. Rost i forma derevev. - Novosibirsk: Nauka, 1986. - 211 s.
46. Cifuentes-Jara M., Henry M. Proceedings of the regional technical workshop on Tree Volume and Biomass Allometric Equations in South and Central America, 21-24 May 2013, UN-REDD MRV Report 12. Turrialba, Costa Rica, 2013. - 92 r.
47. Molto Q., Rossi V., Blanc L. Error propagation in biomass estimation in tropical forests // *Methods in Ecology and Evolution*. - 2013. - Vol. 4. - P. 175-183.
48. Basuki T.M., Van Laake P.E., Skidmore A.K., Hussin Y.A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests // *Forest Ecology and Management*. - 2009. - Vol. 257. - P. 1684-1694.
49. Schmitt M.D.C., Grigal D.F. Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh. // *Can. J. For. Res.* - 1981. - Vol. 11. - P. 837-840.
50. Ares A., Fownes J.H. Comparisons between generalized and specific tree biomass functions as applied to tropical ash (*Fraxinus uhdei*) // *New Forests*. - 2000. - Vol. 20. - P. 277-286.
51. 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.
52. Ben Brahim M., Gavaland A., Cabanettes A. Generalized allometric regression to estimate biomass of *Populus* in short-rotation coppice // *Scand. J. For. Res.* - 2000. - Vol. 15. - P. 171-176.
53. 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.
54. Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Foster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescuré J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riera B., Yamakura T. Tree allometry and im-

proved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // *Oecologia*. – 2005. – Vol. 145. – P. 87-99.

55. Vieilledent G., Vaudry R., Andriamanohisoa S.F.D., Rakotonarivo O.S., Randrianasolo Z.H., Razafindrabe H.N., Bidaud Rakotoarivony C., Ebeling J., Rasamoelina M. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models // *Ecological Applications*. – 2012. – Vol. 22 (2). – P. 572-583.

56. Stas S.M., Rutishauser E., Chave J., Anten N.P.R., Laumonier Y. Estimating the aboveground biomass in an old secondary forest on limestone in the Moluccas, Indonesia: Comparing locally developed versus existing allometric models // *Forest Ecology*

and Management. – 2017. – Vol. 389. – P. 27-34.

57. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. A general model for the structure and allometry of plant vascular system // *Nature*. – 1999. – Vol. 400. – P. 664-667.

58. Zianis D., Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass // *Forest Ecology and Management*. – 2004. – Vol. 187. – P. 311-332.

59. Usoltsev V.A., Kanunnikova O.V., Platonov I.V. Issledovanie oshibok pri otsenke uglerodnogo pula lesov posredstvom allometricheskikh modeley // *Sovremennye problemy ustoychivogo upravleniya lesami, inventarizatsii i monitoringa lesov. Mater. mezhdunarodnoy konfer.* – SPb.: S.-PbGLTA, 2006. – S. 363-370.



УДК 581.527.7+ 635.925(571.14)

А.П. Беланова, А.Л. Эбель, Е.М. Лях
A.P. Belanova, A.L. Ebel, Ye.M. Lyakh

АНАЛИЗ ИНВАЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ *PHYSOCARPUS OPULIFOLIUS* В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

ANALYSIS OF INVASIVE ACTIVITY OF *PHYSOCARPUS OPULIFOLIUS* IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF THE NOVOSIBIRSK REGION

Ключевые слова: фитоинвазии, потенциально инвазионные виды, интродуцированные виды, *Physocarpus Opulifolius*, потенциальный ареал, программа «Агроатлас».

В настоящее время *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim. относится к категории часто встречаемых видов на объектах озеленения города Новосибирска. Он активно используется при создании живых изгородей, встречается во всех категориях насаждений, в разнообразных экологических условиях на урбанизированных территориях. Однако вид признан потенциально инвазионным в средней полосе России и встречается в естественных насаждениях Новосибирской области. Цель исследования – изучение инвазионного потенциала *Ph. opulifolius* в условиях лесостепной зоны Новосибирской области на примере дендрария Центрального сибирского ботанического сада (ЦБС СО РАН) и коллекции древесных растений Сибирского НИИ Растениеводства и Селекции (СибНИИРС). Исследование проводилось с 2012 по 2016 гг. Проведена оценка инвазионной активности вида на территории интродукционных центров. Выявлено, что вид характеризуется обильным плодоношением и возобновлением, сочетанием вегетативного и семенного размножения. Доказано, что *Ph. opulifolius* может формировать устойчивые локальные популяции, способные к самоподдержанию при отсутствии работ по уходу за насаждениями вида. Установлено, что *Ph. opulifolius* является потенциально инвазионным видом для

лесостепной зоны Новосибирской области. Построен потенциальный ареал распространения *Ph. opulifolius* с помощью программы «Агроатлас». Установлено, что в Западной Сибири потенциальный ареал вида охватывает всю Новосибирскую область, за исключением заболоченных территорий, частично Кемеровскую и Томскую области, большую часть Алтайского края. В дальнейшем планируется провести подробное изучение ресурсного потенциала *Ph. opulifolius*, разработать рекомендации по рациональному применению вида с учетом предотвращения его внедрения в естественные фитоценозы и нарушения сукцессионных связей в природных сообществах.

Keywords: phyto-invasions, potentially invasive species, introduced species, *Physocarpus opulifolius*, potential area, AgroAtlas software.

Physocarpus opulifolius (L.) Maxim. currently belongs to the category of commonly occurring species in urban plantings of Novosibirsk. It is extensively used in creating hedges and is found in all types of plantations and in various ecological conditions in the urban areas. However, this species is recognized as a potentially invasive in central Russia and occurs in natural plantations of the Novosibirsk Region. The research goal is to study the invasive potential of *Physocarpus opulifolius* in the forest-steppe zone of the Novosibirsk Region using the examples of the arboretum of the Central Siberian Botanical Garden and the collection of woody plants of the Siberian