

Научная статья

УДК 630*524.39:630*523:630.526.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-21-36

Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.)

А.К. Габделхаков^{1✉}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

В.Ф. Коновалов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

З.З. Рахматуллин¹, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3223-6726>

Л.Н. Блонская¹, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [G-4819-2018](https://orcid.org/0000-0002-7007-1643).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-1643>

И.И. Фазлутдинов², вед. специалист; ResearcherID: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0327-3752>

¹Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450001; aliya201199@mail.ru[✉], konovalov-48@mail.ru, zagir1983@mail.ru, l.n.blonskaya@mail.ru

²Министерство лесного хозяйства Республики Башкортостан, ул. Ленина, д. 86, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450006; solnc2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.20 / Одобрена после рецензирования 04.02.21 / Принята к печати 06.02.21

Аннотация. Цель исследования – анализ изменчивости и разработка математических моделей оценки биомассы и объема коры, объема ствола в коре, доли коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), произрастающих в естественных порослевых и искусственных древостоях. Модели основаны на данных 107 и 95 деструктивно отобранных деревьев соответственно в естественных порослевых и искусственных древостоях – по 10 пробных площадей на каждый тип древостоев, представляющих различные стадии роста. Модельные деревья были распилены на 2-метровые секции, объемы которых в коре и без коры рассчитаны с использованием формулы Губера. Общий объем ствола дерева в коре и без коры получен суммированием объемов всех секций и конического объема вершины дерева. Разница двух этих параметров составила объем коры. Биомасса коры определена непосредственным взвешиванием с последующим переводом в абсолютно сухую массу. Оценены корреляционные связи дендрометрических параметров и выбранных характеристик дерева. В сравнительном аспекте изучена эффективность 3 моделей регрессии с использованием в качестве независимых переменных диаметра на высоте 1,3 м и высоты дерева. Биомасса и объем коры, объем ствола в коре сильно зависят от данных величин. Для объемной доли коры в естественных порослевых липняках эта корреляция очень слабая, в искусственных – незначимая. Объемная доля коры для каждого дерева рассчитана как отношение разности объема ствола в коре и без коры к объему ствола в коре. Для прогнозирования биомассы и объема коры, объема стволов в коре деревьев липы мелколистной выбрано уравнение, показавшее лучшие статистические характеристики с точки зрения соответствия. Модели оценены с использованием метода взвешенных наименьших квадратов,



с учетом присущих ошибок, гетероскедастичности, путем придания каждой модели своей весовой функции отдельно для естественных порослевых и искусственных древостоев, существенно различающихся между собой по морфометрическим признакам.

Ключевые слова: диаметр ствола на высоте 1,3 м, высота дерева, биомасса коры, объем ствола, объем коры, доля коры, липа мелколистная, моделирование, ошибки модели, оценка биомассы коры

Для цитирования: Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Блонская Л.Н., Фазлутдинов И.И. Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 21–36. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-21-36>

Original article

Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.)

Aydar K. Gabdelkhakov[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

Vladimir F. Konovalov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

Zagir Z. Rakhmatullin¹, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3223-6726>

Liubov N. Blonskaya¹, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4819-2018](https://orcid.org/0000-0002-7007-1643),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-1643>

Ilyas I. Fazludinov², Leading Specialist; ResearcherID: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0327-3752>

¹Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russian Federation; aliya201199@mail.ru[✉], konovalov-48@mail.ru, zagir1983@mail.ru, l.n.blonskaya@mail.ru

²Ministry of Forestry of the Republic of Bashkortostan, ul. Lenina, 86, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450006, Russian Federation; solnc2007@yandex.ru

Received on November 1, 2020 / Approved after reviewing on February 4, 2021 / Accepted on February 6, 2021

Abstract. The research is aimed at analyzing variability and developing mathematical models for estimating bark biomass and volume, volume of trunk with bark, and bark proportion of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) trees growing in natural coppice and artificial stands. The models are based on data from 107 and 95 destructively sampled trees in natural coppice and artificial stands, respectively. There were 10 sampling areas per stand type, representing different growth stages. The model trees were sawn into 2-meter sections, the volumes of which with and without bark were calculated using the Huber formula. The total volume of the tree trunk with and without bark is obtained by summing the volumes of all sections and the conical volume of the tree top. The bark volume was the difference between these two parameters. The bark biomass was determined by direct weighing, followed by conversion to absolutely dry mass. The correlations between the dendrometric parameters and the selected tree characteristics were estimated. The effectiveness of 3 regression models



using the diameter at breast height ($dbh = 1.3$ m) and the tree height (h) as independent variables was studied in a comparative aspect. The bark biomass and volume, and the volume of trunk with bark are strongly influenced by these values. This correlation is very weak for the bark volume proportion in natural coppice stands, and insignificant in artificial stands. The bark volume proportion for each tree was calculated as the ratio of the difference between the volume of trunk with and without bark and the volume of trunk with bark. The equation that showed the best statistical characteristics in terms of consistency was chosen in order to predict the bark biomass and volume, the volume of trunks with bark of small-leaved linden trees. These models were estimated using the weighted least squares method taking into account the inherent errors and heteroscedasticity, by assigning each model its weight function separately for natural coppice and artificial stands that differ significantly from each other in morphometric features.

Keywords: trunk diameter at breast height, tree height, bark biomass, trunk volume, bark volume, bark proportion, small-leaved linden, modeling, errors, bark biomass estimation

For citation: Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Blonskaya L.N., Fazlutdinov I.I. Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 21–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-21-36>

Введение

Липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) широко распространена по всей Европе: от Англии на западе и до Уральских гор на востоке, от южной Скандинавии на севере и до Средиземноморья на юге [15, 30]. При этом большая часть лесов с преобладанием липы мелколистной приходится на Восточную Европу [6]. В лесном фонде Республики Башкортостан по состоянию на 2021 г. древостой с преобладанием липы занимают 1161,1 тыс. га (22,4 % покрытых лесом земель региона) с общим запасом 215,4 тыс. м³ (27,5 %), что составляет свыше 30 % от всех насаждений липы мелколистной Российской Федерации.

Насаждения с участием липы широко используются для заготовки древесины и биоэнергетического сырья, получения недревесной продукции, прежде всего меда. Цветы, листья, плоды и кора липы применяются в фармакологической промышленности [3]. Данный древесный вид обогащает биоразнообразие лесных экосистем [34, 41], существенно улучшает среду обитания растений и животных, имеет высокую ландшафтную и рекреационную ценность [18]. В прошлом липовый луб был сырьем для производства плетеных и веревочных товаров [4, 27, 33]. В настоящее время этот натуральный материал полностью заменен на искусственные дешевые материалы. Значительный сырьевой потенциал коры липы мелколистной остается нерезализованным, кора обращается в отходы.

Многоцелевое и экологически обоснованное ведение лесного хозяйства в насаждениях липы мелколистной предполагает наличие разносторонней информации о лесных ресурсах. Имеющиеся сортиментные и товарные таблицы для липы мелколистной ограничены: количество коры представлено в процентах от общего объема ствола в зависимости от диаметра на высоте 1,3 м, высоты (разряда высоты) дерева при среднем коэффициенте формы ствола. По данным этих таблиц кора у липы может составлять значительную часть – от 15 до 40 % от общего объема дерева [1]. Такой широкий спектр варьирования

требует более точного определения объема и биомассы коры стволов (*BSB*) не только при производстве лесной продукции [14, 21, 35], но и в целях мониторинга [16, 29, 42] и количественной оценки запасов углерода [28, 40], а также для выбора эффективных технологий, приносящих дополнительный доход лесному сектору экономики [38].

Объем коры, как и ее биомасса, зависят от ряда факторов: вида [7, 17, 23], диаметра и высоты дерева, формы ствола, толщины коры [24, 44], возраста [21, 37], генетических особенностей [20], местопрорастания [7, 8], среды обитания и условий окружающей среды [9, 12, 45], применяемой технологии выращивания леса [14, 25, 39].

Для прогнозирования биомассы и объема коры многие исследователи используют регрессионные модели с легко измеримыми морфометрическими параметрами в качестве предикторов, такими как диаметр на высоте 1,3 м и общая высота дерева [8, 39]. Повысить предсказательную способность моделей предлагается применением в качестве дополнительных аргументов ширины и протяженности кроны [26], возраста деревьев [32], двойной толщины коры и др. [12, 31, 36].

Исследования по моделированию биомассы и объема коры, их доли достаточно многочисленны и посвящены в основном главным лесным видам, таким как сосна [22, 23, 44], лиственница [8, 13, 25], ель [22, 23, 31], пихта [7, 38], дуб [7, 26, 44], береза [22, 23, 43], осина [23] и ольха [14]. Липа мелколистная в данном научном направлении изучена крайне слабо, особенно на региональном уровне.

Эта работа является частью многолетних исследований надземной биомассы естественных порослевых и искусственных насаждений липы мелколистной в Башкирском Предуралье. Цель – проанализировать изменчивость биомассы и объема коры, объемной доли коры для деревьев липы мелколистной в естественных и искусственных древостоях, разработать модели для оценки исследуемых параметров с учетом основных дендрометрических характеристик и определить существенность различий между предлагаемыми моделями оценки биомассы и объема коры липы мелколистной, в том числе по типам насаждений.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в Уфимском лесничестве Республики Башкортостан, которое относится к лесостепной зоне Южно-Уральского лесостепного района европейской части РФ. Координаты – 54°70' с. ш. 55°90' в. д., высота над уровнем моря – 150 м. Климат увлажненный, континентальный, со средней годовой температурой 3 °С, средняя температура января – –14,5 °С, июля – +19,5 °С, абсолютные максимум и минимум – +40 и –50 °С соответственно. Среднее годовое количество осадков находится в пределах 500–600 мм, в вегетационный период выпадает около 350 мм осадков.

Изучены естественные насаждения порослевого происхождения и искусственные древостои липы мелколистной. Заложено по 10 временных пробных площадей в насаждениях II–VIII классов возраста, относящихся к I–III классам бонитета.

Проведены измерения модельных деревьев, срубленных в естественных порослевых (107 шт.) и искусственных (75 шт.) древостоях. На каждой пробной площади выбрано по 8–10 модельных деревьев, относящихся к средним ступеням толщины. В выборку не включены большие, деформированные и отмирающие деревья. После удаления ветвей ствол каждого модельного дерева был разделен на 2-метровые секции, выполнены замеры диаметров в коре и без коры. Секции взвешены в коре и без коры на платформенных весах грузоподъемностью 100 кг (с точностью ± 50 г). Отбор образцов коры проведен в разных точках вдоль ствола с их последующей сушкой в лабораторных условиях для определения сухой массы коры по соотношению абсолютно сухой и сырой масс.

У каждого модельного дерева измерены диаметры на концах секций, на высоте 1,3 м в коре (dbh) и без коры, а также высота (h). Это позволило рассчитать объемы секций ствола в коре и без коры с использованием формулы Губера. Вершинная часть дерева обработана в виде конуса. Общий объем ствола дерева в коре (TV) и без коры (WV) получен путем суммирования объемов всех секций и объема конической вершины дерева. Разница TV и WV составила объем коры (BV). Объемная доля коры ствола (PBV) рассчитывалась как отношение BV к TV , выраженное в процентах. Сводная статистика данных модельных деревьев в выборках показывает удовлетворительный охват размерного распределения (табл. 1).

Таблица 1

Сводная статистика данных модельных деревьев
Summary statistics of model trees data

Показатель	Естественные древостои						Искусственные древостои					
	X	X _{min}	X _{max}	S	As	Ex	X	X _{min}	X _{max}	S	As	Ex
dbh , см	18,40	3,10	37,40	8,83	-0,06	-0,78	15,90	3,70	37,20	7,65	0,82	0,18
h , м	17,00	4,80	23,80	5,70	-1,02	-0,40	15,40	6,00	24,80	4,20	-0,01	-0,54
TV , м ³	0,3188	0,0020	1,1011	0,2706	0,7900	0,0500	0,2150	0,0046	0,9558	0,2401	1,6500	1,9100
BV , м ³	0,0694	0,0004	0,2371	0,0566	0,8100	0,4000	0,0446	0,0008	0,1892	0,0485	1,4700	1,1900
BSB , кг	30,90	0,20	92,90	23,28	0,48	-0,44	21,70	0,50	103,10	24,78	1,70	2,02
PBV , %	23,80	14,80	44,70	4,77	1,59	4,19	21,10	12,50	32,50	4,20	0,32	-0,01

Примечание: X – среднее арифметическое; X_{min}, X_{max} – минимальное и максимальное значения соответственно; S – стандартное отклонение; As, Ex – коэффициенты асимметрии и эксцесса соответственно.

Оценка взаимосвязи биометрических параметров модельных деревьев и параметров коры внутри выделенных совокупностей и между собой проведена на основе корреляции Пирсона. Регрессионный анализ выполнен методом наименьших квадратов, широко применяемым для разработки как моделей биомассы отдельных деревьев и их компонентов [26, 36, 39], так и объема ствола дерева [8, 14, 44]. В качестве математических моделей были выбраны следующие функции:

$$Y = b_1 + b_2 X; \quad (1)$$

$$Y = b_1 + X^{b_2}; \quad (2)$$

$$Y = \frac{X}{b_1 + b_2 X}, \quad (3)$$

где Y – расчетный показатель (зависимая переменная); X – независимая переменная; b_1 и b_2 – параметры модели.

В качестве независимых переменных в моделях для оценки биомассы, объема коры и общего объема ствола применены dbh и $(dbh)^2 h$. Статистическая оценка полученных уравнений проведена по скорректированному коэффициенту детерминации ($Adj.R^2$), средней абсолютной ошибке (MAE) и среднеквадратической ошибке (RMSE). Наиболее подходящей названа модель с наибольшим $Adj.R^2$ и наименьшими MAE и RMSE.

Дополнительно оценены значимость b_1 и b_2 по t -критерию Стьюдента, графики остатков по отношению к оценочным параметрам. Выбран уровень значимости $p = 0,05$. Наличие (отсутствие) автокорреляции случайных отклонений модели установлено методом графического анализа и статистики Дарбина–Уотсона (DW).

Существование мультиколлинеарности между независимыми переменными проверено с помощью теста Феррара–Глобера (FG):

$$FG = - \left[n - 1 - \frac{1}{6}(2k + 5) \right] \ln(\det[R]),$$

где n – количество наблюдений; k – количество факторов (параметров модели); $\det[R]$ – определитель матрицы межфакторных корреляций.

Выполнено сравнение фактического значения критерия FG и табличного значения χ^2 Пирсона со степенью свободы $\frac{1}{2}k(k-1)$ и уровнем значимости $p = 0,05$ [2, 5].

Проверка наличия мультиколлинеарности каждой переменной с другими проведена путем расчета коэффициента инфляции дисперсии (VIF):

где R_j^2 – коэффициент детерминации, когда переменная X_j подвергается регрессии по $j-1$ оставшимся независимым переменным.

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2},$$

VIF является полезным индикатором при выявлении переменной, которая может быть причиной мультиколлинеарности. Значение $VIF = 1$ указывает на отсутствие мультиколлинеарности между данной независимой переменной и любыми другими независимыми переменными в модели. При $1 < VIF < 5$ существует умеренная мультиколлинеарность между данной объясняющей переменной и другими независимыми переменными в модели, но это не рассматривается как серьезная проблема. Если значение VIF лежит в интервале $5 < VIF < 10$, то возникают незначительные проблемы, связанные с коллинеарностью, в интервале $VIF > 10$ – серьезные. Получение завышенных VIF свидетельствует о необходимости выбора переменных, их модификации или изменения самой модели [2, 5, 19].

Другой обычной проблемой при корректировке уравнений BSB , TV , BV и их независимых переменных (dbh и h) становится проверка наличия

гетероскедастичности. Она была осуществлена путем графического анализа наличия систематичности в распределении значений квадратов отклонений от предсказанных значений и теста Бреуша–Пагана [10].

Статистически значимая гетероскедастичность скорректирована нелинейной регрессией методом взвешенных наименьших квадратов. На основе анализа остатков применены специальные весовые функции $w = (dbh^2h)^{-q}$ в зависимости от модели BSB , TV и BV для обоих типов древостоев, q – поправочный коэффициент гетероскедастичности, определяемый с использованием методологии оптимизации [46].

Для оценки различий уравнений для двух типов насаждений было рассчитано среднеквадратическое отклонение, %:

$$\sigma = 200 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i - b_i}{a_i + b_i} \right)^2}{n-1}},$$

где a_i и b_i – попарно сравниваемые данные расчетных значений (Y) зависимых переменных (BSB , TV , BV) соответственно для естественных порослевых древостоев и для лесных культур; n – число сравниваемых пар, шт.

Статистические и математические расчеты, анализ проведены с использованием программ Microsoft Excel и Statistica. Небольшие наборы данных, а также ограниченность ресурсов для получения деструктивным способом новых независимых данных не позволили провести валидацию моделей. Этот этап оставлен открытым для будущих исследований.

Результаты исследования и их обсуждение

Средние, минимальные и максимальные значения рассматриваемых параметров, их стандартное отклонение удовлетворительно охватывают распределение параметров по выборкам с немного превосходящим количеством по низшим классам при достаточно больших вариации и стандартном отклонении. Коэффициент вариации для BSB и BV значительный – 82–114 %, в то время как для PBV – средний (20 %).

В табл. 2 представлена корреляционная матрица Пирсона для исследуемых переменных. У BSB , TV , BV выявлена существенная и достоверная связь с dbh и h . Это означает, что параметры BSB , TV и BV увеличиваются с размерами деревьев. В случае с PBV взаимосвязь для естественных древостоев средняя и отрицательная, т. е. доля коры уменьшается с увеличением размера деревьев. В искусственных древостоях липы PBV характеризуется низким и недостоверным коэффициентом корреляции (r), но тоже отрицательно связана с dbh и TV . Отрицательные значения r для PBV указывают на его уменьшение с увеличением dbh и h , что согласуется с другими исследованиями [8, 23].

Низкие значения r для PBV сделали бессмысленным непосредственное моделирование в зависимости от дендрометрических показателей стволов. BSB , TV , BV сильнее коррелируют с dbh , чем с h . В целом r рассматриваемых параметров для естественных порослевых древостоев оказались выше, чем для лесных культур. Низкие коэффициенты корреляции PBV с другими рассматриваемыми параметрами объясняются его значительным варьированием при одних и тех же значениях dbh и h .

Таблица 2

**Коэффициент корреляции и его значимость для параметров коры
и дендрометрических показателей деревьев липы мелколистной**

**Correlation coefficient and its significance for bark characteristics
and dendrometric parameters of small-leaved linden trees**

Показатель	<i>dbh</i>	<i>h</i>	<i>TV</i>	<i>BSB</i>	<i>BV</i>	<i>PBV</i>
<i>dbh</i>	–	0,871 p<0,01	0,957 p<0,01	0,953 p<0,01	0,949 p<0,01	–0,567 p<0,01
<i>h</i>	0,746 p<0,01	–	0,757 p<0,01	0,807 p<0,01	0,775 p<0,01	–0,528 p<0,01
<i>TV</i>	0,946 p<0,01	0,728 p<0,01	–	0,957 p<0,01	0,978 p<0,01	–0,509 p<0,01
<i>BSB</i>	0,893 p<0,01	0,733 p<0,01	0,941 p<0,01	–	0,961 p<0,01	–0,481 p<0,01
<i>BV</i>	0,948 p<0,01	0,739 p<0,01	0,989 p<0,01	0,944 p<0,01	–	–0,422 p<0,01
<i>PBV</i>	–0,054 p = 0,65	0,020 p = 0,87	–0,069 p = 0,56	–0,029 p = 0,81	0,034 p = 0,77	–

Примечание: Естественные порослевые древостои – верхняя правая часть таблицы; искусственные древостои – нижняя левая часть.

Подобная вариация является следствием различия морфологических форм липы. Формирование толстой и грубой коры с переплетенными ребрами у основания стволов может быть очень разным даже в пределах одного древостоя. Особенно это различие проявляется при сравнении деревьев естественных порослевых древостоев с деревьями искусственных насаждений. В лесных культурах даже VIII класса возраста кора менее грубая, трещины и ребра выражены значительно слабее. В целом *PBV* имеет тенденцию к снижению с увеличением *dbh* для обоих типов насаждений.

Первым подходом к моделированию был регрессионный анализ методом наименьших квадратов. В табл. 3 представлены оценки коэффициентов регрессии, статистические данные относительно рассмотренных моделей (1)–(3) для каждого исследуемого показателя (*BSB*, *TV*, *BV*) и соответствующего типа насаждения. Из данных табл. 3 видно, что все три рассматриваемых уравнения показали достаточную эффективность при моделировании параметров *BSB*, *TV*, *BV* ($Adj.R^2 > 0,7$). Для обоих типов насаждений *BSB*, *TV*, *BV* с самыми высокими $Adj.R^2$, минимальными MAE и RMSE в случае независимой переменной dbh^2h были найдены для уравнения (3). Это определило выбор его как прогнозного для всех дальнейших расчетов.

Диаметр дерева является наиболее известным и широко используемым предиктором *BSB*, *TV*, *BV* [13, 14, 36]. Включение *h* в качестве дополнительного предиктора значительно улучшает соответствие моделей [11, 26]. Необходимо иметь в виду, что использование только *dbh* в качестве переменной для прогнозирования параметров *BSB*, *TV*, *BV* более удобно, так как измерить его легче и результаты получаются точнее, в то время как правильно измерить *h* растущего дерева часто бывает более сложно, возможны существенные погрешности.

Таблица 3

Параметры моделей и их статистическая оценка для уравнений (1)–(3)
Coefficients and statistical estimation of bark characteristics of small-leaved linden trees

Модель	Переменная	b_1	b_2	Adj.R ²	MAE	RMSE
<i>Биомасса коры стволов</i>						
Естественные порослевые древостои						
1	<i>dbh</i>	-15,82525	2,51418	0,908	5,342	7,069
	<i>dbh²h</i>	4,87584	0,00301	0,908	5,142	7,051
2	<i>dbh</i>	-9,23090	1,25077	0,921	4,657	6,559
	<i>dbh²h</i>	-13,79664	0,43480	0,905	5,486	7,167
3	<i>dbh</i>	0,88504	-0,01282	0,898	5,916	7,462
	<i>dbh²h</i>	202,05611	0,00554	0,936	3,476	5,869
Искусственные древостои						
1	<i>dbh</i>	-24,25907	2,89268	0,794	7,719	11,234
	<i>dbh²h</i>	-2,53218	0,00402	0,880	5,200	8,646
2	<i>dbh</i>	-14,79921	1,28635	0,816	7,086	10,694
	<i>dbh²h</i>	-21,96006	0,45431	0,838	7,080	9,964
3	<i>dbh</i>	1,05627	-0,01842	0,759	8,605	12,223
	<i>dbh²h</i>	230,79402	0,00186	0,892	4,253	8,146
<i>Объем стволов в коре</i>						
Естественные порослевые древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,21949	0,02933	0,915	0,063	0,079
	<i>dbh²h</i>	0,01152	0,00004	0,982	0,023	0,036
2	<i>dbh</i>	-1,51356	0,21732	0,758	0,108	0,134
	<i>dbh²h</i>	-1,57104	0,07627	0,705	0,119	0,147
3	<i>dbh</i>	97,35731	-1,75289	0,946	0,050	0,063
	<i>dbh²h</i>	24689,41695	0,12087	0,984	0,020	0,034
Искусственные древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,25756	0,02972	0,894	0,060	0,078
	<i>dbh²h</i>	0,07850	0,00002	0,858	0,065	0,091
2	<i>dbh</i>	-1,64609	0,23199	0,750	0,092	0,120
	<i>dbh²h</i>	-1,78661	0,08612	0,738	0,097	0,123
3	<i>dbh</i>	116,93122	-2,25981	0,893	0,062	0,079
	<i>dbh²h</i>	23805,93399	0,11939	0,986	0,017	0,029

Окончание табл. 3

Модель	Переменная	b_1	b_2	Adj.R ²	MAE	RMSE
<i>Объем коры стволов</i>						
Естественные порослевые древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,04224	0,00608	0,900	0,013	0,018
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	0,00599	0,00001	0,956	0,008	0,012
2	<i>dbh</i>	-1,12312	0,06387	0,723	0,023	0,030
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	-1,13963	0,02295	0,682	0,025	0,032
3	<i>dbh</i>	956,85355	-22,33157	0,701	0,025	0,033
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	109397,63190	0,93749	0,958	0,007	0,012
Искусственные древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,05097	0,00601	0,897	0,012	0,016
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	-0,00559	0,00001	0,943	0,008	0,012
2	<i>dbh</i>	-1,15769	0,06932	0,720	0,020	0,026
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	-1,19567	0,02687	0,712	0,021	0,026
3	<i>dbh</i>	553,34037	-10,41931	0,887	0,014	0,016
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	114633,12424	0,79238	0,975	0,005	0,008

*Полужирным шрифтом выделен коэффициент со значимостью $p > 0,05$.

Наше исследование подтвердило, что совместное использование *dbh* и *h* в качестве предикторов обеспечивает наилучшее соответствие биомассы коры липы мелколистной для всех рассмотренных моделей. Такое же соответствие наблюдается для *TV* и *BV* при моделировании по уравнениям (1) и (3). Для уравнения (2) включение *h* в качестве дополнительного предиктора приводит к ухудшению качества моделирования: наблюдается снижение Adj.R², увеличение MAE и RMSE.

Предположение о существовании общей мультиколлинеарности факторов между сильно коррелирующими независимыми переменными *dbh* и *h* было подтверждено с помощью теста *FG*: 149 для естественных древостоев и 59 для искусственных – что превосходит показатели критического значения $\chi^2 = 3,8$. Мультиколлинеарность также была доказана получением *VIF* = 4,2 и *VIF* = 2,2 соответственно типам насаждений. Учитывая, что каждое из значений *VIF* для независимых переменных в регрессионной модели (3) лежит в пределах 1–5, мультиколлинеарность в данном случае не является проблемой.

Дополнительное включение в модели *BSB*, *TV*, *BV* таких независимых переменных (кроме *dbh* и *h*), как возраст дерева, длина и ширина кроны, ранговое положение дерева в древостое, возможно, могло бы улучшить качество их оценки. Однако это требует больших усилий, как при сборе полевых данных, так и при устранении мультиколлинеарности между сильно коррелирующими независимыми переменными.

Графический анализ остатков (здесь не приведен), расчет значений критерия *DW* по модели (3) для всех исследуемых параметров деревьев липы в естественных порослевых (кроме *BSB*) и искусственных древостоях выявили присутствие признаков автокорреляции остатков случайных отклонений.

Нелинейные модели, используемые в лесном хозяйстве для прогнозирования биомассы, объема ствола и коры, обычно демонстрируют гетероскедастичность, т. е. дисперсия ошибки не является постоянной для всех

наблюдений. Поэтому модели были проверены на гетероскедастичность. Тесты Бреуша–Пагана показали ее наличие для основных изученных параметров ($p = 0,05$), кроме *BSB* естественных порослевых и *BV* искусственных древостоев. Чтобы исключить влияние гетероскедастичности, параметры оценивают с помощью взвешенной регрессии [14, 26, 46]. Модели были снова проверены при помощи взвешенной регрессии. В табл. 4 приведены оценки параметров и соответствующие им ошибки модели (3) для исследуемых компонентов с использованием взвешенной регрессии. Параметры b_1 и b_2 признаны значимыми на уровне 5 %.

Таблица 4

Оценки параметров модели (3) для показателей естественных и искусственных древостоев, тесты значимости и статистика, полученные путем корректировок с использованием взвешенной регрессии

Estimates of model (3) characteristics for parameters of natural and artificial stands, tests of significance, and statistics obtained by adjustments using weighted regression

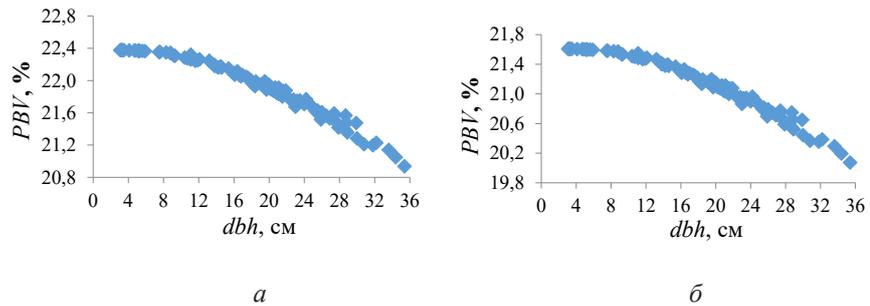
Показатель	q	Параметр модели	Значение	Стандартная ошибка	t	Adj.R ²	MAE	RMSE
Естественные порослевые древостои								
<i>BSB</i>	–	b_1	202,056	10,429	19,37	0,937	3,476	5,869
		b_2	0,006	0,001	8,66			
<i>TV</i>	1,781	b_1	24841,005	432,227	57,47	0,984	0,020	0,034
		b_2	0,113	0,031	3,65			
<i>BV</i>	1,487	b_1	110990,222	4172,242	26,60	0,958	0,007	0,012
		b_2	0,806	0,297	2,71			
Искусственные древостои								
<i>BSB</i>	2,011	b_1	210,496	8,644	24,35	0,890	4,645	8,219
		b_2	0,003	0,001	2,22			
<i>TV</i>	1,852	b_1	24774,460	491,07	50,45	0,986	0,017	0,028
		b_2	0,097	0,049	2,00			
<i>BV</i>	–	b_1	114633,124	4876,110	23,51	0,975	0,006	0,008
		b_2	0,792	0,260	3,05			

После внесения поправок на гетероскедастичность MAE и RMSE, а также скорректированный коэффициент детерминации практически не изменились или незначительно снизились. Соответствующие оценкам параметров b_1 и b_2 стандартные ошибки модели (3) для каждого компонента уменьшились, повысилась значимость самих параметров ($p < 0,05$), что подтверждает эффективность модели для оценки *BSB*, *TV*, *BV*.

Коэффициенты b_1 и b_2 моделей *BSB*, *TV*, *BV* различаются в зависимости от типа насаждений. Несмотря на то, что среднеквадратическое отклонение для *BSB* составило 7,3 %, а для *TV* (1,0 %) и *BV* (3,0 %) – меньше 5 %, попарное сравнение их прогнозных показателей подтвердило статистически значимое различие ($p < 0,05$). Это свидетельствует о важности моделирования *BSB*,

TV , BV отдельно для каждого типа насаждений. Необходимость отдельного моделирования для естественных порослевых и искусственных древостоев очевидна: они различаются по густоте и уровню конкуренции между соседними деревьями.

Предсказанные с помощью скорректированных уравнений TV и BV значения позволили рассчитать PBV для обоих типов насаждений (см. рисунок).



Выровненные значения доли объема коры деревьев липы мелколиственной в естественных порослевых (а) и искусственных насаждениях (б)

Leveled values of the proportion of the bark volume (PBV , %) of small-leaved linden trees in natural coppice stands (а) and artificial stands (б)

Полученные PBV показали более высокую изменчивость для естественных порослевых липняков, чем для искусственных. Это объясняется влиянием размера деревьев или их возраста. Прогнозируемые значения PBV при $dbh = 8$ см составляют соответственно 22,4 и 21,6 % для естественных порослевых и искусственных древостоев. При увеличении dbh до 36 см доля коры снижается соответственно до 20,9 и 20,1 %. Для экспериментально наблюдаемых показателей вариации PBV значительны (12–45 %), причем для небольших деревьев они выше, чем для деревьев большего размера.

Сравнение данных существующих сортиментных и товарных таблиц для равнинных лесов Предуралья с полученными нами данными свидетельствует о необходимости дальнейшего более детального изучения PBV деревьев липы мелколистной в различных по происхождению типах насаждений.

Заключение

Исследования роста и продуктивности деревьев липы мелколистной немногочисленны, исследования их биомассы и объема коры еще более ограничены. Основным способом получения таких данных является рубка деревьев, что сопряжено с большими затратами.

Среди трех уравнений, протестированных в данной работе, 3-е уравнение, в качестве независимых переменных в котором использованы диаметр деревьев на высоте 1,3 м и высота, показало лучшие статистические характеристики с точки зрения соответствия. Эта модель оценена при помощи метода взвешенных наименьших квадратов, с учетом присущих ошибок, гетероскедастичности и путем придания своей весовой функции естественным и искусственным древостоям. Модель рекомендуется для прогнозирования

биомассы и объема коры, объема стволов в коре деревьев липы мелколистной отдельно для естественных порослевых и искусственных древостоев ввиду их существенного различия между собой.

Так как смоделированные доли объема коры показали значительные отличия от применяемых в настоящее время производственно-нормативных данных, рекомендуются дополнительные исследования по валидации нашей модели с использованием новых, более крупных наборов данных, охватывающих более широкий диапазон различных лесных участков, стадий роста, полноты и происхождения насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Габделхаков А.К., Рахматуллин З.З., Мартынова М.В., Фазлутдинов И.И., Муллагалеев И.А. Процент коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) по сортиментным таблицам // Рос. электрон. науч. журн. 2021. № 2(40). С. 121–130.
Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z., Martynova M.V., Fazlutdinov I.I., Mullagalayev I.A. Percentage of Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.) Trees According to Yield Tables. *Russian electronic scientific journal*, 2021, vol. 2(40), pp. 121–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-40-2-121-130>
2. Орлова И.В., Филонова Е.С. Выбор экзогенных факторов в модель регрессии при мультиколлинеарности данных // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 5, ч. 1. С. 108–116.
Orlova I.V., Filonova E.S. The Choice of Exogenous Factors in the Regression Model with Multicollinearity in the Data. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2015, no. 5, part 1, pp. 108–116. (In Russ.).
3. Орловская Т.В., Гюльбякова Х.Н., Гужева Н.Н., Огурцов Ю.А. Изучение коры липы сердцелистной с целью создания новых лекарственных средств // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 427. Режим доступа: <https://science-education.ru/article/view?id=8561> (дата обращения: 31.03.22).
Orlovskaya T.V., Gulbjakova C.N., Gujva N.N., Ogurtcov Y.A. Studying the *Tilia cordata* L. Bark with the Purpose of Creation of the New Medicines. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 2, p. 427. (In Russ.).
4. Хасанова З.Ф. Лесные промыслы башкир Инзерского бассейна (конец XIX в. – начало XXI в.) // История, археология и этнография Кавказа. 2018. Т. 14, № 1. С. 105–112.
Hasanova Z.F. Forest Works of the Bashkir of the Inzerian Basin (End of the 19th – the Beginning of the 21st Centuries). *History, Archeology and Ethnography of the Caucasus*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 105–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2618-6772-2018-10113>
5. Akintunde M.O., Olawale A.O., Amusan A.S., Azeez A.I.A. Comparing Two Classical Methods of Detecting Multicollinearity in Financial and Economic Time Series Data. *International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 62–67. <https://doi.org/10.11648/j.ijamtp.20210703.11>
6. Avila A.L., Albrecht A. *Alternative Baumarten im Klimawandel: Artensteckbriefe – eine Stoffsammlung*. Baden-Württemberg, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA), 2018. 123 p. (In Ger.). Available at: <https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/sonstiges/180201steckbrief.pdf> (accessed 31.03.22).
7. Bauer R., Billard A., Mothe F., Longuetaud F., Houballah M., Bouvet A., Cuny H., Colin A., Colin F. Modelling Bark Volume for Six Commercially Important Tree Species in France: Assessment of Models and Application at Regional Scale. *Annals of Forest Science*, 2021, vol. 78, art. 104. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01096-7>

8. Bijak S., Bronisz A., Bronisz K., Tomusiak R., Wojtan R., Baran P., Czemieli T., Zasada M. Models to Estimate the Bark Volume for *Larix* sp. in Poland. *Environmental Sciences Proceedings*, 2021, vol. 3, iss. 1, art. 71. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-07915>
9. Božić M., Čavlović J., Vedriš M., Jazbec M. Modeling Bark Thickness of Silver Fir Trees (*Abies alba* Mill.). *Šumarski list*, 2007, vol. 131, no. 1-2, pp. 3–12. (In Croat.). <https://doi.org/10.31298/sl>
10. Breusch T.S., Pagan A.R. A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrica*, 1979, vol. 47, no. 5, pp. 1287–1294. <https://doi.org/10.2307/1911963>
11. Canga E., Diéguez-Aranda U., Elias A.K., Cámara A. Above-Ground Biomass Equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. *Forest Systems*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 408–415. <https://doi.org/10.5424/fs/2013223-04143>
12. Cellini J.M., Galarza M., Burns S.L., Martínez-Pastur G.J., Lencinas M.V. Equations of Bark Thickness and Volume Profiles at Different Heights with Easy-Measurement Variables. *Forest Systems*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 23–30. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-01963>
13. Chen D., Huang X., Zhang S., Sun X. Biomass Modeling of Larch (*Larix* spp.) Plantations in China Based on the Mixed Model, Dummy Variable Model, and Bayesian Hierarchical Model. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 8, art. 268. <https://doi.org/10.3390/f8080268>
14. Diamantopoulou M.J., Özçelik R., Yavuz H. Tree-Bark Volume Prediction via Machine Learning: A Case Study Based on Black Alder's Tree-Bark Production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 151, pp. 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.039>
15. Eaton E., Caudullo G., de Rigo D. *Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos* and Other Limes in Europe: Distribution, Habitat, Usage and Threats. *European Atlas of Forest Tree Species*. Ed. by J. San-Miguel-Ayanz, D. de Rigo, G. Caudullo, T. Houston Durrant, A. Mauri. Luxembourg, Publications Office of the EU, 2016, pp. 184–185. Available at: https://forest.jrc.ec.europa.eu/media/atlas/Tilia_spp.pdf (accessed 31.03.22).
16. Guéguen F., Stille P., Lahd Geagea M., Boutin R. Atmospheric Pollution in an Urban Environment by Tree Bark Biomonitoring – Part I: Trace Element Analysis. *Chemosphere*, 2012, vol. 86, iss. 10, pp. 1013–1019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.11.040>
17. Heath L.S., Hansen M., Smith J.E., Smith B.W., Miles P.D. Investigation into Calculating Tree Biomass and Carbon in the FIADB Using a Biomass Expansion Factor Approach. *Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium 2008*. Park City, UT, USDA, 2009. 26 p.
18. Hemery G., Spiecker H., Aldinger E., Kerr G., Collet C., Bell S. *COST Action E42: Growing Valuable Broadleaved Tree Species*. Final Report. 2008. 40 p.
19. Kim J.H. Multicollinearity and Misleading Statistical Results. *Korean Journal of Anesthesiology*, 2019, vol. 72(6), pp. 558–569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>
20. Kohnle U., Hein S., Sorensen F.C., Weiskittel A.R. Effects of Seed Source Origin on Bark Thickness of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) Growing in Southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, no. 42(2), pp. 382–399. <https://doi.org/10.1139/X11-191>
21. Laasasenaho J., Melkas T., Aldén S. Modelling Bark Thickness of *Picea abies* with Taper Curves. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 206, iss. 1-3, pp. 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.058>
22. Lestander T.A., Lundström A., Finell M. Assessment of Biomass Functions for Calculating Bark Proportions and Ash Contents of Refined Biomass Fuels Derived from Major Boreal Tree Species. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42, no. 1, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1139/x11-144>
23. Liepiņš J., Liepiņš K. Evaluation of Bark Volume of Four Tree Species in Latvia. *Research for Rural Development*, 2015, vol. 2, pp. 22–28.

24. Magalhães T.M. Effects of Site and Tree Size on Wood Density and Bark Properties of Lebombo Ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain). *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2021, vol. 51, art. 3. <https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x32x>
25. Meng S., Jia Q., Liu Q., Zhou G., Wang H., Yu J. Aboveground Biomass Allocation and Additive Allometric Models for Natural *Larix gmelinii* in the Western Daxing'anling Mountains, Northeastern China. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 2, art. 150. <https://doi.org/10.3390/f10020150>
26. Meng S., Yang F., Hu S., Wang H., Wang H. Generic Additive Allometric Models and Biomass Allocation for Two Natural Oak Species in Northeastern China. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 6, art. 715. <https://doi.org/10.3390/f12060715>
27. Myking T., Hertzberg A., Skrøppa T. History, Manufacture and Properties of Lime Bast Cordage in Northern Europe. *Forestry*, 2005, vol. 78, iss. 1, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi006>
28. Neumann M., Lawes M.J. Quantifying Carbon in Tree Bark: The Importance of Bark Morphology and Tree Size. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, no. 12, iss. 4, pp. 646–654. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13546>
29. Pásztor Z., Mohácsiné I.R., Gorbacheva G., Börcsök Z. The Utilization of Tree Bark. *BioResources*, 2016, vol. 11(3), pp. 7859–7888. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3>
30. Radoglou K., Dobrowolska D., Spyroglou G., Nicolescu V.-N. A Review on the Ecology and Silviculture of Limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *Die BodenKultur*, 2009, vol. 60, no. 3, pp. 9–19.
31. Repola J. Biomass Equations for Scots Pine and Norway Spruce in Finland. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 625–647. <https://doi.org/10.14214/sf.184>
32. Saint-Andre L., M'Bou A.T., Mabiala A., Mouvondy W., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P., Hamel O., Nouvellon Y. Age-Related Equations for Above- and Below-Ground Biomass of a *Eucalyptus* Hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 205, iss. 1-3, pp. 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.006>
33. Samojlik T. Drzewo wielce użyteczne – historia lipy drobnolistnej (*Tilia cordata*) w Puszczy Białowieskiej. *Rocznik Dendrologiczny*, 2005, vol. 53, pp. 55–64. (In Pol.).
34. Schmidt O., Bußler H. Die Winterlinde als Lebensraum für Tierarten. *LWF Wissen*, 2016, no. 78, pp. 60–65. (In Ger.).
35. Sedmíková M., Löwe R., Jankovský M., Natov P., Linda R., Dvořák J. Estimation of Over- and Under-Bark Volume of Scots Pine Timber Produced by Harvesters. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 6, art. 626. <https://doi.org/10.3390/f11060626>
36. Sharma R.P., Bhandari S.K., BK R. Allometric Bark Biomass Model for *Daphne bholia* in the Mid-Hills of Nepal. *Mountain Research and Development*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-16-00052.1>
37. Sonmez T., Keles S., Tilki F. Effect of Aspect, Tree Age and Tree Diameter on Bark Thickness of *Picea orientalis*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2007, vol. 22, iss. 3, pp. 193–197. <https://doi.org/10.1080/02827580701314716>
38. Stängle S.M., Sauter U.H., Dormann C.F. Comparison of Models for Estimating Bark Thickness of *Picea abies* in Southwest Germany: The Role of Tree, Stand, and Environmental Factors. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. 16. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0601-2>
39. Subedi M., Sharma R.P. Allometric Biomass Models for Bark of *Cinnamomum tamala* in Mid-Hill of Nepal. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 47, pp. 44–49.
40. Temesgen H., Affleck D., Poudel K., Gray A., Sessions J. A Review of the Challenges and Opportunities in Estimating Above Ground Forest Biomass Using Tree-Level Models. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, vol. 30, iss. 4, pp. 326–335. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1012114>
41. Vacek S., Vacek Z., Ulbrichová I., Bulušek D., Prokůpková A., Král J., Vančura K. Biodiversity Dynamics of Differently Managed Lowland Forests Left to Spontaneous Development in Central Europe. *Austrian Journal of Forest Science*, 2019, vol. 136, iss. 3, pp. 249–281.

42. Vezzola L.C., Muttoni G., Merlini M., Rotiroti N., Pagliardini L., Hirt A.M., Pelfini M. Investigating Distribution Patterns of Airborne Magnetic Grains Trapped in Tree Barks in Milan, Italy: Insights for Pollution Mitigation Strategies. *Geophysical Journal International*, 2017, vol. 210, iss. 2, pp. 989–1000. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx232>

43. Wang X., Zhao D., Liu G., Yang C., Teskey R.O. Additive Tree Biomass Equations for *Betula platyphylla* Suk. Plantations in Northeast China. *Annals of Forest Science*, 2018, vol. 75, art. 60. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0738-2>

44. Wehenkel C., Cruz-Cobos F., Carrillo A., Lujan-Soto J.E. Estimating Bark Volumes for 16 Native Tree Species on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 6, pp. 578–585. <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.661453>

45. Wilhelmsson L., Arlinger J., Spångberg K., Lundqvist S.-O., Grahn T., Hedenberg Ö., Olsson L. Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, iss. 4, pp. 330–350. <https://doi.org/10.1080/02827580260138080>

46. Zeng W.S., Tang S.Z. Bias Correction in Logarithmic Regression and Comparison with Weighted Regression for Nonlinear Models. *Nature Precedings*, 2011. 11 p. <https://doi.org/10.1038/npre.2011.6708.1>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest