

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ КОНВЕРСИОННО-ОБЪЕМНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ ОЛЬХИ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ

В.А. Усольцев^{1, 2✉}, И.С. Цепордей², А.А. Карабан^{3, 4},
С.В. Третьяков^{3, 4}, С.В. Коптев^{3, 4}, А.А. Парамонов³

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

²ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Ботанический сад УрО РАН), Россия, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202А

³ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Россия, 163062, Архангельск, ул. Никитова, д. 13

⁴ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

Usoltsev50@mail.ru

Поскольку использование всеобщих аллометрических моделей фитомассы деревьев в конкретных географических условиях приводит к существенным смещениям, вызванным региональными географически обусловленными климатическими особенностями, в статье поставлена цель проанализировать изменение конверсионно-объемных коэффициентов фитомассы на примере древостоев ольхи в географических градиентах Евразии. Конверсионно-объемный коэффициент представляет собой отношение фитомассы той или иной фракции в абсолютно сухом состоянии к объему стволовой древесины в свежем состоянии. Основу исследования составила авторская база данных в количестве 170 пробных площадей для фракций надземной фитомассы и 75 для фитомассы корней. Предложена статистически значимая регрессионная модель конверсионно-объемных коэффициентов, включающая в себя в качестве независимых переменных возраст древостоя, географическую широту и географическую долготу и объясняющая от 24 до 68 % изменчивости конверсионно-объемных коэффициентов той или иной фракции фитомассы. Установлено, что в направлении с юга на север названные коэффициенты для фракций надземной фитомассы увеличиваются и для массы корней снижаются, а в направлении с запада на восток в пределах ареала ольхи коэффициенты для фракций надземной фитомассы снижаются и для массы корней увеличиваются. Предложенные модели предназначены для оценки фитомассы древостоев ольхи по известным значениям возраста и запаса стволовой древесины. В отличие от ранее опубликованных моделей, предложенные модели дифференцированы по географическим координатам широты и долготы.

Ключевые слова: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *A. incana* (L.) Moench, конверсионно-объемные коэффициенты фитомассы, географические градиенты, регрессионные модели

Ссылка для цитирования: Усольцев В.А., Цепордей И.С., Карабан А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А. Использование регрессионной модели при анализе конверсионно-объемных коэффициентов фитомассы ольхи в географических градиентах Евразии // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 156–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-156-165

Изменение климата оказывает негативное воздействие на планетарную биоту и здоровье человека и составляет серьезную экологическую проблему глобального уровня [1–3]. Лесные экосистемы участвуют в глобальном круговороте углерода, поглощают из атмосферы значительное количество парниковых газов и способствуют стабилизации климата [4–6]. Для оценки углерододепонирующей способности лесов предлагаются аллометрические модели фитомассы деревьев. Исследование ошибок всеобщих моделей фитомассы деревьев показало, что их использование в конкретных географических условиях приводит к существенным смещениям, вызванным региональными географически обусловленными

климатическими особенностями. Включение в модели географически обусловленных переменных значительно повышает точность оценок фитомассы деревьев и древостоев [7–9].

Данных о фитомассе лесов вследствие трудоемкости их экспериментального получения несопоставимо меньше по сравнению с накопленными в разных регионах сведениями о запасах стволовой древесины, регистрируемых в процессе лесоинвентаризации [8, 10]. Одним из приемлемых путей для заполнения информационных «белых пятен» по фитомассе является использование специальных коэффициентов перевода запаса стволовой древесины в фитомассу древостоя, представляющих отношение фитомассы той или иной фракции к запасу стволовой древесины [9, 11, 12]. В зарубежной литературе они получили распространение

вначале как «Biomass Expansion Factors (BEFs)» [15], а в последние годы все чаще используются как «Biomass Conversion and Expansion Factors (BCEFs)» [9]. В русскоязычной литературе предложен аналог этого термина — «конверсионно-объемные коэффициенты (КОК)» [11].

В литературе предлагалось использование КОК как средних значений для той или иной породы [13, 14] или как значений, связанных с возрастом древостоев [15, 16], их запасом [16–18], а также со средними значениями высоты и диаметра ствола [19, 20].

Предложены также модели зависимости КОК от совокупности таксационных показателей — возраста, густоты, запаса, средней высоты, среднего диаметра и класса бонитета [21–25]. Однако применительно к условиям России они совместимы с лесоустроительными материалами повышенной таксации, но не со сводными данными государственного учета лесного фонда, что осложняет их использование при оценке фитомассы лесопокрытых площадей [12].

По материалам базы данных для лесообразующих пород Евразии, включающей в себя 1011 пробных площадей, была исследована зависимость КОК от возраста древостоя [11, 12]. Для пород с наибольшим количеством фактических данных — сосны, ели, лиственницы, березы — указанная зависимость была рассчитана отдельно по трем подзонам: 1) лесотундре и северной тайге, 2) средней тайге и 3) южной тайге, и зонам широколиственных лесов, лесостепи. Однако какая-либо закономерность в изменении КОК перечисленных четырех пород в широтно-зональном градиенте не установлена. Что касается мелколиственных пород, общая для всех широтных полос зависимость рассчитана только для осины и для группы «прочие мягколиственные породы» (по 26 пробным площадям), в которую вошла и ольха [11, 12].

Позднее для основных лесообразующих пород Евразии, по данным более 8 тыс. пробных площадей, рассчитаны модели КОК в зависимости от возраста, относительной полноты и класса бонитета древостоев [26]. Если в моделях КОК Д.Г. Замолодчикова и соавт. [11, 12] отсутствовала связь КОК с широтной зональностью, то в данном случае, когда в модели для указанных четырех пород дополнительно к возрасту древостоев в качестве независимых переменных были введены относительная полнота и класс бонитета, увеличение КОК в направлении с юга на север стало очевидным, причем как для надземной фитомассы, так и для корней [26].

Для ольхи серой и черной были рассчитаны модели КОК без разделения их по широтным зонам вследствие сравнительно малого количества

исходных данных: для ольхи серой — 63 и 35 пробных площадей, для ольхи черной — 90 и 35 пробных площадей соответственно для надземной фитомассы и корней. При этом коэффициенты детерминации моделей составили для стволов, ветвей, листвы и корней соответственно 0,18; 0,33; 0,72 и 0,44 у ольхи серой и 0,15; 0,14; 0,54 и 0,44 у ольхи черной [26].

Ольха является сравнительно продуктивной породой. Даже в относительно спелом возрасте среднегодовой прирост древостоев ольхи серой на 17 % выше, чем у осины [27], и в лучших условиях произрастания может достигать годичной продукции до 17 т на 1 га [28]. При рубке ольхи серой в возрасте 15...20 лет можно получить вдвое больше древесины с 1 га, чем при рубке осины и березы в соответствующем возрасте [29]. Благодаря способности производить большое количество фитомассы за короткий промежуток времени ольху можно рассматривать как перспективную древесную породу для ведения лесного хозяйства в целях повышения углерододепонирующей способности лесов, поэтому важное значение имеет создание модели КОК древостоев ольхи для оценки ее фитомассы в различных географических регионах Евразии, в том числе России, по показателям возраста и запаса стволовой древесины, регистрируемым в процессе лесоинвентаризации.

Цель работы

Цель работы — моделирование КОК фитомассы ольхи в географических градиентах Евразии.

Объекты и методы исследования

Последняя дополненная версия базы данных о фитомассе лесообразующих пород Евразии [30] позволила исследовать зависимость КОК древостоев от их возраста в географических градиентах не только в широтных, но и долготных. Если широтный градиент опосредует снижение температуры в северном направлении, то долготный — во многом обуславливает снижение осадков по мере повышения континентальности климата в направлении от океанического побережья в глубь континента [31].

Для реализации поставленной цели из упомянутой базы данных извлечены показатели фитомассы древостоев ольхи серой (*Alnus incana* L.) и ольхи черной (*A. glutinosa* L.) в количестве 170 пробных площадей для фракций надземной фитомассы и 75 — для фитомассы корней. По сравнению с основными лесообразующими породами данных о фитомассе названных двух пород существенно меньше, и для получения более надежных закономерностей эти данные были

Статистическая характеристика модели (1), рассчитанных по фактическим данным
Statistical characteristics of the model (1) calculated from the actual data

Зависимая переменная	Регрессионные коэффициенты при независимых переменных					Коэффициент детерминации $adjR^2$, скорректированный на количество переменных	Стандартная ошибка модели (1)
	a_0	$a_1 \ln A$	$a_2 (\ln A)^2$	$a_3 (\ln Lat)$	$a_4 (\ln Lng)$		
$\ln\left(\frac{P_i}{M}\right)$							
$\ln\left(\frac{P_f}{M}\right)$	-1,1571	-2,2927	0,2466	0,5285	-0,1118	0,680	0,43
$\ln\left(\frac{P_b}{M}\right)$	-13,030	-0,6435	0,0815	2,9131	-0,1357	0,491	0,31
$\ln\left(\frac{P_s}{M}\right)$	-0,8334	0,2284	-0,0232	-0,0944	-0,0357	0,378	0,08
$\ln\left(\frac{P_a}{M}\right)$	-0,7652	-0,4754	0,0775	0,2347	-0,0500	0,238	0,10
$\ln\left(\frac{P_r}{M}\right)$	7,1247	-1,7648	0,2880	-1,8260	0,1746	0,327	0,26

Примечание. Полужирным выделен регрессионный коэффициент, не значимый на уровне $p < 0,05$.

объединены. Ареал ольхи черной относительно ареала ольхи серой существенно сдвинут к западу и югу [32], что послужило еще одним поводом для объединения данных, поскольку расширение географических градиентов в случае их использования в качестве независимых переменных в регрессионном анализе значительно повышает адекватность моделей [33]. Это дало возможность разработать модели КОК, обобщенные для двух пород ольхи и продвигаемые в зарубежной литературе как «generic models» [34, 35]. Наши исходные данные представлены в диапазоне возраста от 3 до 93 лет, запасов стволовой древесины — от 5 до 578 м³/га, надземной фитомассы — от 5 до 342 т/га и фитомассы корней — от 1 до 65 т/га, а также в географических диапазонах от 47° до 68° с. ш. и от 1° до 42° в. д.

Исходные данные КОК древостоев в связи с возрастом и географическими координатами нами обработаны по программе стандартного регрессионного анализа согласно структуре регрессионной модели

$$\ln\left(\frac{P_i}{M}\right) = a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln Lat) + a_4 (\ln Lng), \quad (1)$$

где P_i — фитомасса древостоев в абсолютно сухом состоянии: P_f , P_b , P_s , P_a , P_r — соответственно фитомасса листьев, ветвей, стволов, надземная и корней, т/га;

M — запас стволовой древесины, м³/га;

A — возраст древостоя, лет;

Lat и Lng — соответственно географическая широта и географическая долгота, град;

a_0 — свободный член модели, скорректированный на логарифмическое преобразование [36];

$a_1 \dots a_4$ — регрессионные коэффициенты модели.

Результаты и обсуждение

Результаты расчета модели (1) представлены в таблице.

Модель (1) для КОК ствола $\left(\frac{P_s}{M}\right)$, представляющая базисную плотность древесины с корой, не согласуется с закономерностью, общей для фитомассы листьев, ветвей и надземной. Если регрессионные коэффициенты для зависимых переменных $\ln\left(\frac{P_f}{M}\right)$, $\ln\left(\frac{P_b}{M}\right)$ и $\ln\left(\frac{P_a}{M}\right)$ при $\ln A$ имеют знак «-», а при $(\ln A)^2$ — знак «+», то для $\ln\left(\frac{P_s}{M}\right)$ наоборот, т. е. знаки меняются местами. К тому же регрессионный коэффициент при переменной $\ln Lat$ для $\ln\left(\frac{P_s}{M}\right)$ статистически не достоверен.

Это можно объяснить изменением базисной плотности под влиянием факторов, отличных от факторов, влияющих на соотношение фитомассы кроны и объема ствола. Эта особенность КОК для фитомассы ствола была ранее отмечена Д.Г. Замолотчиковым и соавт. [19], когда они для зависимости коэффициента $\frac{P_s}{M}$ от возраста получили среднее значение R^2 , равное 0,034, т. е. изменчивость КОК, объясненную лишь на 3,4 %.

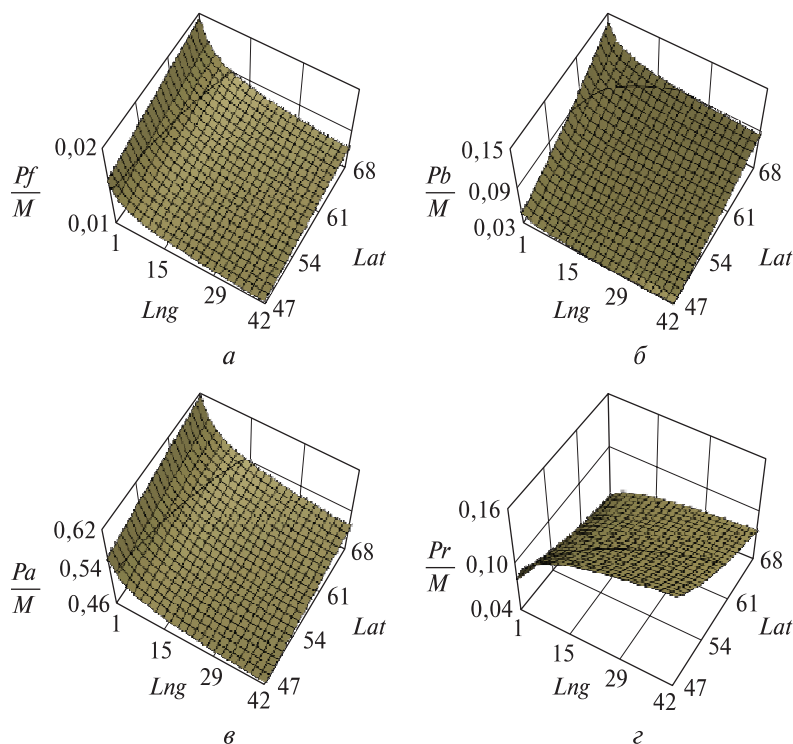


Рис. 1. Изменение расчетных значений конверсионно-объемных коэффициентов по географическим градиентам широты и долготы согласно модели (1) при значении возраста, равного 30 годам: *a*, *б*, *в*, *г* — конверсионно-объемные коэффициенты соответственно для фитомассы листвы, ветвей, надземной фитомассы и корней

Fig. 1. The change in the calculated values of expansion factor in geographical gradients of latitude and longitude according to the model (1) having the value of stand age equal to 30 years: *a*, *б*, *в*, *г* — expansion factors for foliage, branches, aboveground and root biomass respectively

Сделав вывод об отсутствии влияния таксационных показателей древостоев на величину коэффициента $\frac{P_s}{M}$ (т. е. базисной плотности), они ре-

комендовали использовать для всех возрастов одно среднее значение коэффициента $\frac{P_s}{M}$, в част-

ности для ольхи равное $0,552 \text{ т/м}^3$ [19].

Сравнительно невысокие значения коэффициентов детерминации модели (1), приведенных в таблице, в частности для зависимых переменных

$\ln\left(\frac{P_f}{M}\right)$, $\ln\left(\frac{P_b}{M}\right)$ и $\ln\left(\frac{P_r}{M}\right)$, равных соответственно

$0,680$; $0,491$ и $0,327$, оказались несколько выше средних значений для лесообразующих пород Северной Евразии, показанных Д.Г. Замолдчиковым и соавт. [19]: соответственно $0,581$, $0,356$ и $0,312$. Наличие разных значений величины R^2 для различных фракций соответствует ранее полученному выводу: чем теснее взаимно коррелируют показатели фитомассы различных фракций, тем ниже коэффициент детерминации при выводе зависимости их отношения от таксационных показателей [37].

Еще более низким оказалось значение коэффициента $\frac{P_a}{M}$, равное $0,238$. Тем не менее оно

сопоставимо с ранее полученным результатом для ели европейской [15], в соответствии с которым зависимость этого коэффициента от возраста древостоя характеризуется коэффициентом детерминации $0,273$. В работе [15] зависимости коэффициента $\frac{P_a}{M}$ от возраста для других пород имеют

еще более низкие значения коэффициентов детерминации, в частности для сосны обыкновенной и лиственных пород соответственно $0,087$ и $0,038$ [15].

Отметив данную особенность коэффициента $\frac{P_s}{M}$, дальнейший анализ полученных закономер-

ностей в их графической интерпретации мы выполняем для коэффициентов фитомассы листвы, ветвей, надземной и корней путем табулирования модели (1), при среднем значении возраста древостоев 30 лет (рис. 1). Для оценки фитомассы стволов можно использовать или модель (1), или, выведенное, по нашим исходным данным, среднее значение коэффициента $\frac{P_s}{M}$, равное $0,440 \pm 0,06 \text{ т/м}^3$.

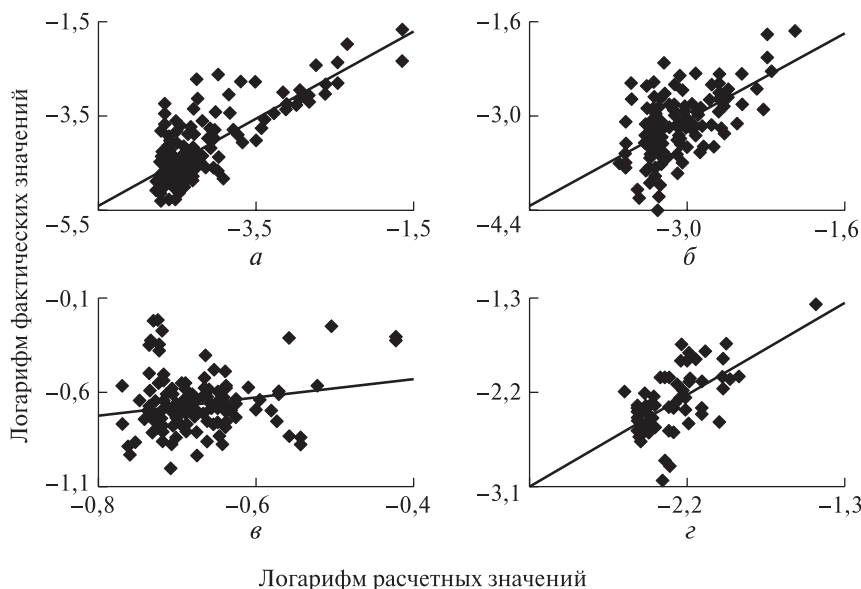


Рис. 2. Соотношение расчетных и фактических значений конверсионно-объемных коэффициентов для фитомассы листвы (а), ветвей (б), надземной фитомассы (в) и корней (з)

Fig. 2. The ratio of calculated and empirical values of expansion factors for foliage (a), branches (b), aboveground biomass (v) and roots (z)

Это согласуется с результатом, полученным Д.Г. Щепашенко и соавт. [26], согласно которому указанный показатель изменяется от 0,42 в молодняках до 0,46 в спелых древостоях, но он имеет существенно более низкие значения, чем 0,552 т/м³, предложенное Д.Г. Замолодчиковым и соавт. [19].

Соотношение расчетных и фактических значений КОК (рис. 2) дает представление об остаточном варьировании и характере распределения остатков.

При повышении широты, т. е. в направлении с юга на север, КОК всех фракций надземной фитомассы увеличивается, что согласуется с результатом, полученным Д.Г. Щепашенко и соавт. [26]. В том же направлении КОК массы корней снижается, что противоречит результату, полученному этими же авторами [26]. При увеличении долготы, т. е. в направлении с запада на восток в пределах ареала ольхи, КОК фракций надземной фитомассы снижается, а КОК массы корней увеличивается. Исходя из рис. 1, можно рассчитать процентные изменения КОК, приходящиеся на один градус широты и долготы. Для фитомассы листвы, ветвей и надземной фитомассы при повышении широты на один градус происходит увеличение КОК соответственно на 1,3; 9,5 и 0,4 % и снижение КОК корней на 4,1 %. При повышении долготы на один градус происходит снижение КОК для фитомассы листвы, ветвей и надземной фитомассы на 1,3; 1,4 и 0,5 % и увеличение КОК корней на 2,0 %. Таким образом, изменения КОК надземной фитомассы и корней в географических градиентах имеют противоположный характер.

Аналогичный противоположный характер изменения надземной и подземной фитомассы древостоев по мере климатически обусловленных изменений условий среды произрастания был выявлен для основных лесобразующих пород Евразии [38]. Показано, что тенденции такого изменения прямо противоположны, т. е. факторы, ограничивающие объем надземной фитомассы, являются стимулирующими для фитомассы корней и наоборот. Эта зеркальность в соотношениях надземной и подземной фитомассы в их реакции на внешние факторы, по-видимому, отражает общую жизненную стратегию устойчивого роста той или иной древесной породы. На любой фактор среды, снижающий продуктивность надземной фитомассы, древостой отвечает увеличением массы корней [38].

Выводы

Предложенная модель конверсионно-объемных коэффициентов надземной и подземной фитомассы древостоев ольхи предназначена для оценки фитомассы древостоев по значениям возраста и запаса стволовой древесины, получаемым в процессе лесоинвентаризации. В отличие от ранее опубликованных моделей, данная модель дифференцирована по географическим градиентам.

Впервые установлены статистически подтвержденные закономерности увеличения конверсионно-объемных коэффициентов для надземной фитомассы и снижения коэффициентов для фитомассы корней в направлении с юга

на север в пределах ареала ольхи, а в направлении с запада на восток эти коэффициенты для фракций надземной фитомассы снижаются и для фитомассы корней увеличиваются.


Зеркальность в соотношениях конверсионно-объемных коэффициентов надземной и подземной фитомасс в градиентах географических координат, опосредующих степень тепло- и влагообеспечения условий произрастания, отражает общую жизненную стратегию устойчивого роста той или иной древесной породы. На любой фактор среды, снижающий продуктивность надземной фитомассы, древостой отвечает увеличением массы корней.

Список литературы

- [1] Lenton T.M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen K.W., Schellnhuber H.J. Climate tipping points — too risky to bet against // *Nature*, 2019, v. 575, pp. 592–595. DOI:10.1038/d41586-019-03595-0
- [2] Díaz S., Settele J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Lucas A.G., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razzaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change // *Science*, 2019, v. 366, article 1327.
- [3] Malhi Y., Franklin J., Seddon N., Solan M., Turner M.G., Field C.B., Knowlton N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions // *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 2020, v. 375, article 20190104.
- [4] Ripple W.J., Wolf C., Newsome T.M., Barnard P., Moomaw W.R. World scientists' warning of a climate emergency // *BioScience*, 2019, v. 70, no. 1, pp. 8–12.
- [5] Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*, 2021, v. 11, no. 1, article number 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9
- [6] Usoltsev V.A., Shakoor A., Zaib G., Trogisch S., Ma X., Tsepordey I.S. Changes in foliage biomass of the genera *Larix* and *Pinus* along gradients of temperature and precipitation in Eurasia // *Pakistan J. of Botany*, 2022, v. 54, no. 4, pp. 1–7. DOI: 10.30848/PJB2022-4(20)
- [7] Shobairi S.O.R., Lin H., Usoltsev V.A., Osmirko A.A., Tsepordey I.S., Ye Z., Anees S.A. A comparative pattern for *Populus* spp. and *Betula* spp. stand biomass in Eurasian climate gradients // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2022, v. 43, no. 2, pp. 457–467. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1340
- [8] He X., Lei X., Zeng W., Feng L., Zhou C., Wu B. Quantifying the effects of stand and climate variables on biomass of larch plantations using random forests and National Forest Inventory data in North and Northeast China // *Sustainability*, 2022, v. 14, article 5580. DOI:10.3390/su14095580
- [9] Wang Y., Miao Z., Hao Y., Dong L., Li F. Effects of biotic and abiotic factors on biomass conversion and expansion factors of natural white birch forest (*Betula platyphylla* Suk.) in Northeast China // *Forests*, 2023, v. 14, article 362, DOI:10.3390/f14020362
- [10] Liepinš J., Lazdinš A., Kaleja S., Liepinš K. Species composition affects the accuracy of stand-level biomass models in hemiboreal forests // *Land*, 2022, v. 11, article 108. DOI:10.3390/land11071108
- [11] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // *Лесоведение*, 1998. № 3. С. 84–93.
- [12] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесобразующих пород России // *Лесная таксация и лесоустройство*, 2003. № 1. С. 119–127.
- [13] Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Книжное изд-во, 1969. 120 с.
- [14] Dong L., Widagdo F.R.A., Xie L., Li F. Biomass and volume modeling along with carbon concentration variations of short-rotation poplar plantations // *Forests*, 2020, v. 11, article 780. DOI:10.3390/f11070780
- [15] Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests // *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 188, pp. 211–224.
- [16] Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index // *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 257, pp. 1004–1013. DOI:10.1016/j.foreco.2008.11.002
- [17] Guo Z., Fang J., Pan Y., Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods // *Forest Ecology and Management*, 2010, v. 259, pp. 1225–1231.
- [18] Lisboa S.N., Guedes B.S., Ribeiro N., Siteo A. Biomass allometric equation and expansion factor for a mountain moist evergreen forest in Mozambique // *Carbon Balance and Management*, 2018, v. 13, article 23. DOI:10.1186/s13021-018-0111-7
- [19] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // *Лесоведение*, 2005. № 6. С. 73–81.
- [20] Dong L., Zhang L., Li F. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountains, Northeast China // *Forests*, 2019, v. 10, article 715. DOI:10.3390/f10090715
- [21] Usoltsev V.A., Hoffmann C.W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass // *Scandinavian J. of Forest Research*, 1997, v. 12, no. 3, pp. 273–279.
- [22] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P., Cysewska A., Wierczyńska S., Maciejczyk K. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? — Allometric equations and biomass conversion and expansion factors // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 409, pp. 74–83. DOI:10.1016/j.foreco.2017.11.001
- [23] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P. Tree and stand level estimations of *Abies alba* Mill. aboveground biomass // *Annals of Forest Science*, 2019, v. 76, article 56. DOI:10.1007/s13595-019-0842-y
- [24] Zhu W., Xu Y., Wang Z., Du A. Biomass estimation coefficient and its impacting factors for *Eucalyptus* plantation in China // *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, v. 56, no. 5, pp. 1–11.
- [25] Zhao J., Hu H., Wang J. Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion fac-

- tor method and total forest value // International J. of Environmental Research and Public Health, 2022, v. 19, article 15925. DOI:10.3390/ijerph192315925
- [26] Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests // Forests, 2018, v. 9, article 312. DOI:10.3390/f9060312
- [27] Lohmus K., Mander U., Tullus H., Keedus K. Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia // Short rotation willow coppice for renewable energy and improved environment. K. Perttu and A. Koppel (eds). Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 1996, pp. 95–105.
- [28] Aosaar J., Varik M., Uri V. Biomass production potential of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review // Biomass and Bioenergy, 2012, v. 45, pp. 11–26.
- [29] Daugavietis M., Daugaviete M., Bisenieks J. Management of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands in Latvia // Proceedings of 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, May 28–29, 2009. L. Malinovska et al. (eds.). Latvian University of Agriculture, Jelgava, Latvia, 2009, pp. 229–234.
- [30] Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (дата обращения 05.03.2023).
- [31] Назимова Д.И. Климатическая ординация лесных экосистем как основа их классификации // Лесоведение, 1995. № 4. С. 63–73.
- [32] Деревья и кустарники СССР. Т. 2 / под ред. С.Я. Соколова. М.; Л.: АН СССР, 1951. 612 с.
- [33] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279с.
- [34] 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, v. 24, pp. 121–139.
- [35] Rutishauser E., Nooran F., Laumonier Y., Halperin J., Hergoualch K., Verchot L. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia // Forest Ecology and Management, 2013, v. 307, pp. 219–225. DOI:10.1016/j.foreco.2013.07.013
- [36] Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian J. of Forest Research, 1972, v. 2, no. 1, pp. 49–53.
- [37] Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с.
- [38] Усольцев В.А., Цепордей И.С. Отношение подземной биомассы к надземной лесообразующих видов Евразии в градиентах температур и осадков // Биосфера, 2022. Т. 14. № 3. С. 158–179. DOI: 10.24855/biosfera.v14i2.673

Сведения об авторах

Усольцев Владимир Андреевич  — д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Ботанический сад УрО РАН), профессор кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Usoltsev50@mail.ru

Цепордей Иван Степанович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Ботанический сад УрО РАН), ivan.tsepordey@yandex.ru

Карaban Алексей Александрович — лаборант-исследователь, аспирант, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), karaban@sevniilh-arh.ru

Третьяков Сергей Васильевич — д-р с.-х. наук, профессор, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.v.tretyakov@narfu.ru

Коптев Сергей Викторович — д-р с.-х. наук, профессор, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.koptev@narfu.ru

Парамонов Андрей Алексеевич — канд. с.-х. наук, науч. сотр., ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», a.paramonov@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023.

Одобрено после рецензирования 21.08.2023.

Принята к публикации 21.12.2023.

REGRESSION MODEL FOR ALDER BIOMASS ANALYSIS OF ITS CONVERSION AND EXPANSION FACTORS IN GEOGRAPHICAL GRADIENTS OF EURASIA

V.A. Usoltsev^{1, 2✉}, I.S. Tsepordey², A.A. Karaban^{3, 4}, S.V. Tretyakov^{3, 4}, S.V. Koptev^{3, 4}, A.A. Paramonov³

¹Ural State Forestry Engineering University, 37, Siberian tract, 620100, Yekaterinburg, Russia

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

³Northern Research Institute of Forestry, 13, Nikitova st., 163062, Arkhangelsk, Russia

⁴Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

Usoltsev50@mail.ru

Since the use of generic allometric models of tree biomass in specific geographical conditions leads to significant biases caused by regional geographically determined climatic peculiarities, the article aims to analyze the change in the biomass conversion and expansion factors using the alder stands in geographical gradients of Eurasia. Biomass conversion and expansion factors represent the ratio of biomass of a particular fraction in dry condition to the stem volume in fresh condition. The basis of the study was the author's database of 170 sample plots for fractions of aboveground biomass and 75 plots for root biomass. A statistically significant regression model of the biomass conversion and expansion factors is proposed, which includes independent variables the stand age, geographical latitude and geographical longitude and explains from 24 to 68 % of the variability of the biomass conversion and expansion factors of a particular fraction of biomass. It was found that in the direction from south to north, the above-mentioned coefficients for the fractions of aboveground biomass increase and they decrease for the mass of roots. In the direction from west to east within the range of alder, the coefficients for the fractions of aboveground biomass decrease and they increase for the root biomass. The proposed models are designed to assess the biomass of alder stands using the known values of age and stock of stem volume. Unlike previously published models, the proposed models are differentiated by geographical coordinates of latitude and longitude.

Keywords: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *A. incana* (L.) Moench, biomass expansion factors, geographical gradients, regression models

Suggested citation: Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Karaban A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A. *Ispol'zovanie regressionnoy modeli pri analize konversionno-ob'emnykh koeffitsientov fitomassy ol'khi v geograficheskikh gradientakh Evrazii* [Regression model for alder biomass analysis of its conversion and expansion factors in geographical gradients of Eurasia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 156–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-156-165

References

- [1] Lenton T.M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen K.W., Schellnhuber H.J. Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 2019, v. 575, pp. 592–595. DOI:10.1038/d41586-019-03595-0
- [2] Diaz S., Settele J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Lucas A.G., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razaqzaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 2019, v. 366, article 1327.
- [3] Malhi Y., Franklin J., Seddon N., Solan M., Turner M.G., Field C.B., Knowlton N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 2020, v. 375, article 20190104.
- [4] Ripple W.J., Wolf C., Newsome T.M., Barnard P., Moomaw W.R. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, 2019, v. 70, no. 1, pp. 8–12.
- [5] Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Scientific Reports*, 2021, v. 11, no. 1, article number 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9
- [6] Usoltsev V.A., Shakoor A., Zaib G., Trogisch S., Ma X., Tsepordey I.S. Changes in foliage biomass of the genera *Larix* and *Pinus* along gradients of temperature and precipitation in Eurasia. *Pakistan J. of Botany*, 2022, v. 54, no. 4, pp. 1–7. DOI: 10.30848/PJB2022-4(20)
- [7] Shobairi S.O.R., Lin H., Usoltsev V.A., Osmirko A.A., Tsepordey I.S., Ye Z., Anees S.A. A comparative pattern for *Populus* spp. and *Betula* spp. stand biomass in Eurasian climate gradients. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2022, v. 43, no. 2, pp. 457–467. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1340
- [8] He X., Lei X., Zeng W., Feng L., Zhou C., Wu B. Quantifying the effects of stand and climate variables on biomass of larch plantations using random forests and National Forest Inventory data in North and Northeast China. *Sustainability*, 2022, v. 14, article 5580. DOI:10.3390/su14095580
- [9] Wang Y., Miao Z., Hao Y., Dong L., Li F. Effects of biotic and abiotic factors on biomass conversion and expansion factors of natural white birch forest (*Betula platyphylla* Suk.) in Northeast China. *Forests*, 2023, v. 14, article 362. DOI:10.3390/f14020362
- [10] Liepinš J., Lazdinš A., Kaleja S., Liepinš K. Species composition affects the accuracy of stand-level biomass models in hemiboreal forests. *Land*, 2022, v. 11, article 108. DOI:10.3390/land11071108

- [11] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. *Opređenje zapasov ugljeka po zavisimym ot vozrasta nasazhdeniy konversionno-ob'emnykh koeffitsientam* [Determination of carbon reserves by conversion-volume coefficients dependent on the age of plantings]. *Lesovedenie*, 1998, no. 3, pp. 84–93.
- [12] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V. *Koeffitsienty konversii zapasov nasazhdeniy v fitomassu dlya osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii* [Conversion coefficients of planting stocks into phytomass for the main forest-forming species of Russia]. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation and forest management], 2003, no. 1, pp. 119–127.
- [13] Pozdnyakov L.K., Protopopov V.V., Gorbatenko V.M. *Biologicheskaya produktivnost' lesov Sredney Sibiri i Yakutii* [Biological productivity of forests in Central Siberia and Yakutia]. Krasnoyarsk: Book publishing house, 1969, 120 p.
- [14] Dong L., Widagdo F.R.A., Xie L., Li F. Biomass and volume modeling along with carbon concentration variations of short-rotation poplar plantations. *Forests*, 2020, v. 11, article 780. DOI:10.3390/f11070780
- [15] Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 188, pp. 211–224.
- [16] Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 257, pp. 1004–1013. DOI:10.1016/j.foreco.2008.11.002
- [17] Guo Z., Fang J., Pan Y., Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, 2010, v. 259, pp. 1225–1231.
- [18] Lisboa S.N., Guedes B.S., Ribeiro N., Siteo A. Biomass allometric equation and expansion factor for a mountain moist evergreen forest in Mozambique. *Carbon Balance and Management*, 2018, v. 13, article 23. DOI:10.1186/s13021-018-0111-7
- [19] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. *Konversionnye koeffitsienty fitomassa/zapas v svyazi s dendrometricheskimi pokazatelyami i sostavom drevostoev* [Conversion coefficients phytomass/stock in connection with dendrometric indicators and composition of forest stands]. *Lesovedenie*, 2005, no. 6, pp. 73–81.
- [20] Dong L., Zhang L., Li F. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountains, Northeast China. *Forests*, 2019, v. 10, article 715. DOI:10.3390/f10090715
- [21] Usoltsev V.A., Hoffmann C.W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass. *Scandinavian J. of Forest Research*, 1997, v. 12, no. 3, pp. 273–279.
- [22] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P., Cysewska A., Wierczyńska S., Maciejczyk K. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? — Allometric equations and biomass conversion and expansion factors. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 409, pp. 74–83. DOI:10.1016/j.foreco.2017.11.001
- [23] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P. Tree and stand level estimations of *Abies alba* Mill. aboveground biomass. *Annals of Forest Science*, 2019, v. 76, article 56. DOI:10.1007/s13595-019-0842-y
- [24] Zhu W., Xu Y., Wang Z., Du A. Biomass estimation coefficient and its impacting factors for *Eucalyptus* plantation in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, v. 56, no. 5, pp. 1–11.
- [25] Zhao J., Hu H., Wang J. Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion factor method and total forest value. *International J. of Environmental Research and Public Health*, 2022, v. 19, article 15925. DOI:10.3390/ijerph192315925
- [26] Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchik V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*, 2018, v. 9, article 312. DOI:10.3390/f9060312
- [27] Lohmus K., Mander U., Tullus H., Keedus K. Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia. Short rotation willow coppice for renewable energy and improved environment. K. Perttu and A. Koppel (eds). Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 1996, pp. 95–105.
- [28] Aosaar J., Varik M., Uri V. Biomass production potential of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review. *Biomass and Bioenergy*, 2012, v. 45, pp. 11–26.
- [29] Daugavietis M., Daugaviete M., Bisenieks J. Management of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands in Latvia. Proceedings of 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, May 28–29, 2009. L. Malinovska et al. (eds.). Latvian University of Agriculture, Jelgava, Latvia, 2009, pp. 229–234.
- [30] Usoltsev V.A. *Biomassa i pervichnaya produkcija lesov Evrazii. Elektronnaya baza dannykh* [Biomass and primary production of Eurasian forests. Electronic database]. Ekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forestry University, 2023. Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (accessed 05.03.2023).
- [31] Nazimova D.I. *Klimaticheskaya ordinatsiya lesnykh ekosistem kak osnova ikh klassifikatsii* [Climatic ordination of forest ecosystems as the basis for their classification]. *Lesovedenie*, 1995, no. 4, pp. 63–73.
- [32] *Derev'ya i kustarniki SSSR* [Trees and shrubs of the USSR]. T. 2. Ed. S.Ya. Sokolova. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1951, 612 p.
- [33] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.
- [34] 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, v. 24, pp. 121–139.
- [35] Rutishauser E., Nooran F., Laumonier Y., Halperin J., Hergoualch K., Verchot L. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 2013, v. 307, pp. 219–225. DOI:10.1016/j.foreco.2013.07.013
- [36] Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian J. of Forest Research*, 1972, v. 2, no. 1, pp. 49–53.
- [37] Usoltsev V.A. *Modelirovanie struktury i dinamiki fitomassy drevostoev* [Modeling the structure and dynamics of phytomass of forest stands]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk University Publishing House, 1985, 191 p.
- [38] Usoltsev V.A., Tseporday I.S. *Otnoshenie podzemnoy biomassy k nadzemnoy lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii v gradientakh temperatur i osadkov* [The ratio of underground to aboveground biomass of forest-forming species of Eurasia in temperature and precipitation gradients]. *Biosfera* [Biosphere], 2022, v. 14, no. 3, pp. 158–179. DOI: 10.24855/biosfera.v14i2.673

Authors' information

Usoltsev Vladimir Andreevich [✉] — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Chief Scientist of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (BS UrO RAS), Professor of the Forestry Department of the Ural State Forestry University, Usoltsev50@mail.ru

Tsepordey Ivan Stepanovich — Cand. Sci. (Agriculture), Head scientist of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (BS UrO RAS), ivan.tsepordey@yandex.ru

Karaban Aleksey Aleksandrovich — laboratory researcher, post-graduate student, Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, karaban@sevniilh-arh.ru

Tretyakov Sergey Vasilyevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, s.v.tretyakov@narfu.ru

Koptev Sergey Viktorovich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, s.koptev@narfu.ru

Paramonov Andrey Alekseevich — Cand. Sci. (Agriculture), Northern Research Institute of Forestry, a.paramonov@sevniilh-arh.ru

Received 25.05.2023.

Approved after review 21.08.2023.

Accepted for publication 21.12.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest