

1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*52:630*174.754

А.В. Лебедев, В.В. Кузьмичев

ИЗМЕНЕНИЯ БИОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В ЕВРОПЕ С 1940 ГОДА

Введение. В лесном хозяйстве в качестве основной характеристики древостоя с давних пор и до настоящего времени используют запас, или сумму объемов стволов растущих деревьев. При разработке методов повышения продуктивности древостоев в первой половине XX в. была выявлена зависимость прироста древесины от объема фотосинтезирующего аппарата деревьев, и появилась необходимость его учета. Более широкие представления о биологическом круговороте в лесу обусловили необходимость учета всех фракций биомассы деревьев. Однако сплошной учет фракций (в абсолютно сухом состоянии) оказался затруднительным, и выход нашли в выборочном определении их массы с последующим переходом к суммарным показателям, например по связи биомассы с объемом стволов деревьев.

При разработке плана исследований по «Международной биологической программе» (1964–1974 гг.) была составлена унифицированная методика измерений массы фракций на пробных площадях (основанная на принципе рандомизации), которая сохранилась и при переходе к программе «Человек и биосфера» (с 1971 г.). Это позволило в разных странах мира при учете биомассы экосистем использовать единую методику.

Недавние исследования показывают, что происходящие климатические изменения вносят значимый вклад в направления динамики биометрических показателей лесных насаждений и их породного состава [Киселева с соавт., 2016; Дубенок с соавт., 2018; Лебедев, 2018; Alekseev, Sharma, 2020; Fang et al., 2014; Pretzsch et al., 2014]. Климатические факторы оказывают существенное влияние на свойства древесины [Roderick,

Berry, 2001; Zhu et al., 2015], ее биомассы [Usoltsev et al., 2019; 2020], а в ряде публикаций выявлена связь между изменениями климата и плотностью древесины [Ваганов с соавт., 2007; Bontemps et al., 2013; Бондаренко, Устинова, 2019; Franceschini et al., 2010, 2012].

Данное исследование направлено на выявление того, можно ли считать биомассу в качестве долгосрочной константы при прочих равных параметрах или она подвергается временным тенденциям, например как это продемонстрировано для объемов стволов [Kangas et al., 2020]. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) относится к одной из самых распространенных древесных пород в Европе, а ее древесина широко используется в лесопромышленном комплексе. Наличие систематических тенденций в изменении биомассы будет касаться не только экологических проблем, таких как ветроустойчивость деревьев, способность к депонированию углерода и др., но также и экономических и технологических вопросов, таких как пригодность древесины для строительства и для использования в энергетических целях.

Цель исследования – выявление долговременных тенденций в изменении биомассы фракций деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Европе, происходящих с 1940 г.

Методика исследования. В исследовании используются данные определения биомассы фракций (ствол в коре, ветви, хвоя и корни) деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в странах Европы, начиная с 1948 г. [Усольцев, 2020]. В общей сложности для анализа отобрано 2208 наблюдений, сделанных на 91 лесном участке на территории России, Финляндии, Швеции, Украины, Белоруссии, Польши, Чехии, Швейцарии, Испании, Великобритании и других стран (рис. 1). Наибольшее количество модельных деревьев относится к таким странам, как Украина (47,2%), Россия (33,4%), Швеция (7,7%), Финляндия (5,2%) и Белоруссия (1,7%).

Экспериментальными данными (табл. 1) охвачены диапазоны диаметров деревьев на высоте груди от 0,5 до 58,0 см, высот – от 0,6 до 36,6 м, объемов ствола – от 0,02 до 3985,0 дм³, биомассы стволов в коре – от 0,002 до 1653,0 кг, биомассы ветвей – от 0,002 до 206,0 кг, биомассы хвои – от 0,005 до 63,2 кг, биомассы корней – от 0,001 до 259,2 кг. Для всех рассматриваемых показателей временной охват составляет с 1948 по 2018 г., кроме биомассы корней, для которых наблюдения датируются промежутком с 1957 по 2012 г.

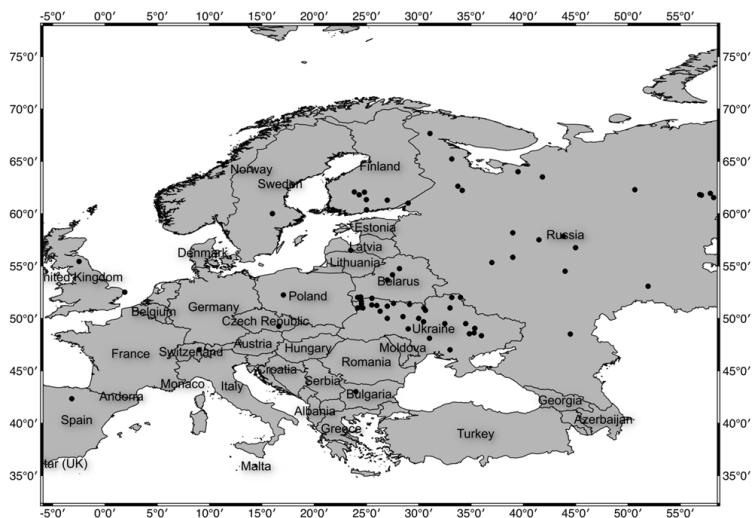


Рис. 1. Расположение мест сбора информации о биомассе деревьев в Европе (черные точки)

Fig. 1. Locations of European tree biomass data collection sites (black points)

Таблица 1

Характеристика выборки данных

Data sampling characteristic

Показатель	mean	std	min	max	<i>n</i>
Диаметр, см	16,035	10,681	0,500	58,000	2208
Высота, м	13,658	7,214	0,550	36,600	1849
Объем, дм ³	282,877	469,464	0,023	3985,000	1738
Биомасса ствола в коре, кг	104,757	183,591	0,002	1653,000	2192
Биомасса ветвей, кг	11,283	18,155	0,002	206,000	2121
Биомасса хвои, кг	4,594	5,105	0,005	63,200	2191
Биомасса корней, кг	21,838	29,615	0,001	259,200	550

Примечание: mean – средняя арифметическая, std – среднеквадратическое отклонение, min – минимальное значение, max – максимальное значение, *n* – количество наблюдений.

Чтобы проверить гипотезу о влиянии календарного года на биомассу фракций, проводился регрессионный анализ с применением линейных моделей смешанных эффектов (LMM), которые позволяют выполнять прогноз с откалиброванной реакцией на особенности места произрастания. Все статистические анализы проводились в R 3.6.3. Используемые библиотеки: lme4 1.1-23, merTools 0.5.2, lmerTest 3.1-2 и performance 0.5.1.

В качестве первой базовой модели для фиксированных эффектов рассматривалась аллометрическая зависимость биомассы фракций от объема ствола. С учетом календарного года и случайных эффектов уравнение записывается в следующем виде:

$$\ln(M_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(v_{it}) + \beta_2 \times YEAR_{it} + \beta_3 \times YEAR_{it} \times \ln(v_{it}) + b_i + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

где M – биомасса, кг; v – объем ствола, дм^3 ; $YEAR$ – календарный год; i – индекс пробной площади; t – индекс момента времени; β_0 – β_2 – параметры фиксированных эффектов; b_i – случайный эффект пробной площади, $b_i \sim N(0, \tau^2)$; ε_{it} – случайная ошибка, $N(0, \sigma^2)$; N – функция нормального распределения.

В качестве второй базовой модели для фиксированных эффектов использовалось аллометрическое уравнение F.X. Schumacher, F.S. Hall [1933], которое часто применяется при моделировании биомассы [Zianis et al., 2005; Araújo et al., 2018; Romero et al., 2020]. С учетом календарного года и случайных эффектов уравнение имеет следующий вид:

$$\ln(M_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(d_{it}) + \beta_2 \times \ln(h_{it}) + \beta_3 \times YEAR_{it} + \beta_4 \times YEAR_{it} \times \ln(d_{it}) + b_i + \varepsilon_{it}, \quad (2)$$

где M – биомасса, кг; d – диаметр на высоте груди, см; h – высота, м; $YEAR$ – календарный год; i – индекс пробной площади; t – индекс момента времени; β_0 – β_3 – параметры фиксированных эффектов; b_i – случайный эффект пробной площади, $b_i \sim N(0, \tau^2)$; ε_{it} – случайная ошибка, $N(0, \sigma^2)$; N – функция нормального распределения.

Для обеих моделей, если в уравнении без взаимодействия переменной $YEAR$ с переменными $\ln(v)$ и $\ln(d)$ коэффициент перед календарным годом являлся статистически не значимым, то модель с их взаимодействием не рассматривалась. Достоверность моделей рассматривалась с использованием оценок условного коэффициента детерминации и предельного коэффициента детерминации (R^2). Предельный R^2 учитывает только дисперсию фиксированных эффектов и указывает, какая часть дисперсии модели объ-

яняется только частью фиксированных эффектов. Условный R^2 учитывает как фиксированные, так и случайные эффекты и показывает, какая часть дисперсии объясняется «полной» моделью [Lüdecke et al., 2020].

Результаты исследования. Полученные в исследовании модели характеризуются достаточно высокими значениями предельного коэффициента детерминации. Во всех случаях его значения находятся в диапазоне от 0,844 до 0,989 (табл. 2). Так как значения предельных коэффициентов детерминации выше, чем условных, то включение в модель смешанных эффектов позволило объяснить большую часть дисперсии зависимой переменной, по сравнению с использованием только фиксированных эффектов.

Таблица 2

Оценки коэффициентов детерминации моделей

Estimates of the coefficients of determination of models

Уравнение	Зависимая переменная	Предельный R^2	Условный R^2
1	Биомасса стволов в коре	0,989	0,985
	ветвей	0,861	0,800
	хвои	0,844	0,757
	корней	0,949	0,748
2	Биомасса стволов в коре	0,986	0,978
	ветвей	0,913	0,678
	хвои	0,897	0,649
	корней	0,926	0,827

Подогнанные модели биомассы демонстрируют (табл. 3) статистически достоверное влияние (при $p < 0,05$) объема ствола, диаметра, высоты и календарного года на биомассу стволов в коре. Оценки параметров уравнения (1) показывают, что при одних и тех же значениях объема стволов произошло снижение их биомассы. Масса и объем определяют плотность древесины. Таким образом, вместе с уменьшением биомассы произошло закономерное снижение ее плотности. На примере центральной Европы [Pretzsch et al., 2018], используя образцы древесины деревьев сосны обыкновенной с самых старых экспериментальных участков, было показано,

что с 1870 г. снизилась средняя плотность древесины. Это явление объясняется изменением соотношения между поздней и ранней древесиной, когда в результате увеличения вегетационного периода и применения удобрений произошло повышение доли более рыхлой и менее плотной ранней древесины.

Таблица 3

Результаты аппроксимации моделей биомассы

Results of approximation of biomass models

Фиксированный эффект	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	<i>p</i> -значение
Биомасса стволов в коре, уравнение (1)					
Случайный эффект	<i>Intercept</i>	β_0	2,221e+01	2,157e+00	$< 2e-16^{***}$
	$\ln(v)$	β_1	-2,652e+00	2,778e-01	$< 2e-16^{***}$
	<i>YEAR</i>	β_2	-1,151e-02	1,076e-03	$< 2e-16^{***}$
	$YEAR \times \ln(v)$	β_3	1,816e-03	1,391e-04	$< 2e-16^{***}$
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	1,194e-02		
	Остатки	ε_{it}	3,162e-02		
Биомасса ветвей, уравнение (1)					
Случайный эффект	<i>Intercept</i>	β_0	4,442e+00	6,556e+00	5,010e-01
	$\ln(v)$	β_1	8,053e-01	1,061e-02	$< 2e-16^{***}$
	<i>YEAR</i>	β_2	-3,282e-03	3,266e-03	3,190e-01
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	1,753e-01		
	Остатки	ε_{it}	4,008e-01		
Биомасса хвои, уравнение (1)					
	<i>Intercept</i>	β_0	-3,912e+00	6,148e+00	5,270e-01
	$\ln(v)$	β_1	6,425e-01	9,066e-03	$< 2e-16^{***}$
	<i>YEAR</i>	β_2	9,705e-04	3,061e-03	7,520e-01

Продолжение табл. 3

Фиксированный эффект	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	<i>p</i> -значение
Случайный эффект	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	1,628e-01		
	Остатки	ε_{it}	2,916e-01		
Биомасса корней, уравнение (1)					
Фиксированный эффект	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	<i>p</i> -значение
	<i>Intercept</i>	β_0	-7,082e+01	4,112e+01	1,170e-01
	$\ln(v)$	β_1	8,8114e-01	1,257e-02	< 2e-16***
	<i>YEAR</i>	β_2	3,500e-02	2,007e-02	1,240e-01
Случайный эффект	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	9,391e-01		
	Остатки	ε_{it}	2,364e-01		
Биомасса стволов в коре, уравнение (2)					
	<i>Intercept</i>	β_0	1,699e+01	3,210e+00	2,27e-07***
	$\ln(d)$	β_1	-4,194e+00	9,844e-01	2,16e-05***
	$\ln(h)$	β_2	1,041e+00	2,320e-02	< 2e-16***
	<i>YEAR</i>	β_3	-1,022e-02	1,602e-03	6,21e-10***
	<i>YEAR</i> × $\ln(d)$	β_4	2,958e-03	4,922e-04	2,26e-09***
Случайный эффект	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	2,208e-02		
	Остатки	ε_{it}	3,914e-02		

Окончание табл. 3

Фиксированный эффект	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	p-значение
Биомасса ветвей, уравнение (2)					
Случайный эффект	<i>Intercept</i>	β_0	6,273e-01	1,121e+01	9,560e-01
	$\ln(d)$	β_1	2,825e+00	5,199e-02	< 2e-16***
	$\ln(h)$	β_2	-9,806e-01	6,182e-02	< 2e-16***
	<i>YEAR</i>	β_3	-1,929e-03	5,587e-03	7,310e-01
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	8,689e-01		
	Остатки	ε_{it}	5,267e-01		
Биомасса хвои, уравнение (2)					
Случайный эффект	<i>Intercept</i>	β_0	-4,075e+00	9,804e+00	6,790e-01
	$\ln(d)$	β_1	2,450e+00	4,811e-02	< 2e-16***
	$\ln(h)$	β_2	-9,383e-01	5,727e-02	< 2e-16***
	<i>YEAR</i>	β_3	5,354e-04	4,887e-03	9,130e-01
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	7,622e-01		
	Остатки	ε_{it}	4,924e-01		
Биомасса корней, уравнение (2)					
Случайный эффект	<i>Intercept</i>	β_0	-2,250e+01	1,586e+01	1,720e-01
	$\ln(d)$	β_1	1,105e+00	1,232e-01	4,43e-16***
	$\ln(h)$	β_2	1,811e+00	1,516e-01	< 2e-16***
	<i>YEAR</i>	β_3	8,816e-03	7,992e-03	2,830e-01
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение		
	Пробная площадь	b_i	6,196e-01		
	Остатки	ε_{it}	5,368e-01		

Примечание. Значимость на уровне *** < 0.001; ** 0.001; * 0.01.

Изменение биомассы стволов без учета случайных эффектов при среднем объеме по выборке ($v = 282,9 \text{ дм}^3$) показано на рис. 2, при средних диаметре ($d = 16,0 \text{ см}$) и высоте ($h = 13,7 \text{ м}$) по выборке – на рис. 3. Черной линией на рисунках изображены предсказанные по моделям значения, серой заштрихованной областью – 95%-й доверительный интервал. В первом случае модель показывает снижение биомассы с 1940 по 2020 г. с 106,0 до 93,9 кг (–11,5%), во втором – с 64,4 до 54,8 кг (–14,9%). Отсюда следует, что для стволов в коре снижение плотности за рассматриваемый период времени составило 11,5%.

Изменение биомассы зависит от размеров древесных стволов. Наиболее сильно они проявляются для деревьев в молодняках и средневозрастных насаждениях, где происходит формирование наибольшего радиального прироста. Для крупномерных стволов, например, с объемом 1000 дм^3 , согласно результатам моделирования, уравнение (1), снижение биомассы стволов в коре и плотности древесины не прослеживается: в 1940 г. биомасса составляла 360,5 кг, в 2020 г. – 391,4 кг (+8,6%). По уравнению (2) при диаметре ствола 25 см и высоте 25 м в 1940 г. биомасса составляла 240,0 кг, в 2020 г. – 226,9 кг (–5,5%). В ближайшие десятилетия в результате продолжающихся климатических изменений процесс снижения биомассы и плотности древесины крупномерных стволов должен усилиться.

При диаметре ствола 25 см и ширине годичного слоя 2 мм для центральной Европы было получено, что с 1900 по 2015 г. в среднем для сосны обыкновенной снижение плотности древесины составило 5,4% [Pretzsch et al., 2018]. Существенные различия между нашими и ранее проведенными исследованиями связаны, во-первых, разными методическими подходами в оценке снижения плотности древесины, а во-вторых, степенью детализации исходных данных (в нашем случае используются данные о древесине всего ствола с корой, а не годичных слоев на высоте груди). В целом в обоих случаях продемонстрирована общая тенденция снижения как биомассы, так и плотности древесины.

Для биомассы ветвей, хвои и корней оценки параметров уравнений перед переменной календарного года во всех случаях являются статистически не достоверными (при $p < 0.05$). Поэтому на фоне снижения биомассы стволов при неизменных значения объема, диаметра и высоты в структуре биомассы произошло увеличение доли участия других фракций.

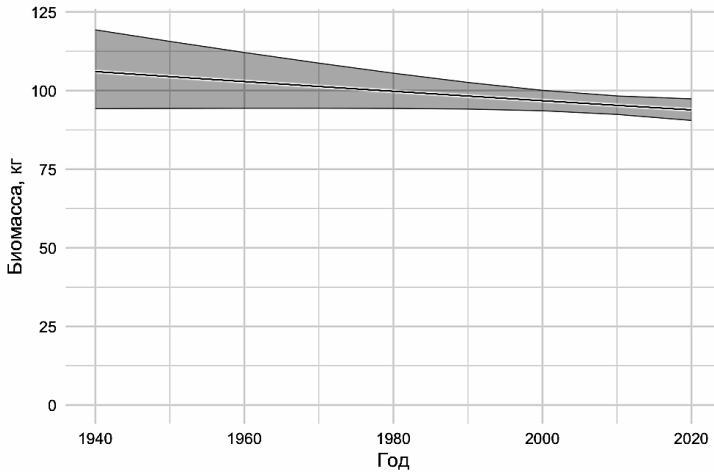


Рис. 2. Изменение биомассы стволов (уравнение (1)) при среднем объеме ствола по выборке

Fig. 2. Change in stem biomass (equation (1)) with an average stem volume in the sample

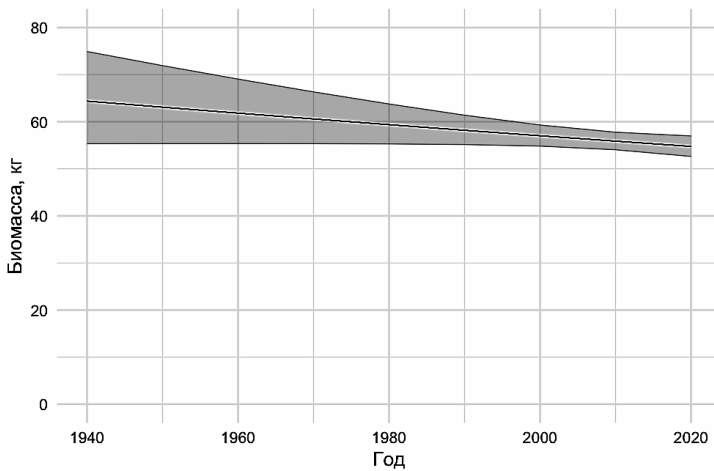


Рис. 3. Изменение биомассы стволов (уравнение (2)) при средних диаметре и высоте стволов по выборке

Fig. 3. Change in stem biomass (equation (2)) at average stem diameter and height in the sample

Происходящие климатические изменения привели, с одной стороны, к ускорению роста древостоев как в центральной, так и восточной Европе [Pretzsch et al., 2014; Дубенок с соавт., 2018], а с другой – к снижению прочности древесины, содержания в ней энергии и углероддепонирующих функций [Pretzsch et al., 2018]. В условиях ускоряющихся темпов роста древесных растений объемы столов и запасы древесины не должны напрямую пересчитываться в депонированный углерод с учетом исторических значений конверсионных коэффициентов. Это также следует учитывать при мониторинге, моделировании и использовании углерода и биомассы в лесах в условиях глобальных изменений.

Выводы. Данное исследование показывает, что выявленная тенденция снижения биомассы стволов деревьев сосны обыкновенной и плотности их древесины характерна для всей территории Европы. Подобные исследования должны быть продолжены как на региональном и национальном, так и на глобальном уровнях. Выявление направлений в изменениях биомассы и предупреждение их последствий должно стать важной задачей XXI в. для лесоведения и лесоводства.

Библиографический список

Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. Тренды климатических изменений в плотности годовых колец // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 3. С. 50–59. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/154.

Ваганов Е.А., Скомаркова М.В., Шульце Э.-Д., Линке П. Влияние климатических факторов на прирост и плотность древесины годовых колец ели и сосны в горах Северной Италии // Лесоведение. 2007. № 2. С. 37–44.

Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Динамика лесного фонда Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева за 150 лет // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 5–19. DOI: 10.26897/0021-342X-2018-4-5–19.

Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Результаты экспериментальных работ за 150 лет в Лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии: моногр. М.: Наука, 2020. 382 с.

Киселева В.В., Коротков С.А., Скородумов П.В. Тенденции смены породного состава в лесах Лосиног острова // Лесной вестник. 2016. № 5 (20). С. 21–25.

Лебедев А.В. Ход естественных процессов в древостоях ядра заповедника «Кологривский лес» // Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы: матер. Всерос. (с междунар. участием) конф. (20–21 сентября 2018 г.). Кологрив: Государственный заповедник «Кологривский лес», 2018. С. 6–14.

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционного зондирования и наземной таксации лесов Евразии: моногр. 2-е изд., доп. Екатеринбург: УГЛУ; Ботанический сад УО РАН, 2020.

Alekseev A.S., Sharma S.K. Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. No. 3. P. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020- 3-42-54.

Araújo E.J.G., Loureiro G.H., Sanquetta C.R., Sanquetta M.N.I., Corte A.P.D., Péllico Netto S., Behling A. Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest // Floresta e Ambiente. 2018. No. 25(1). e20160193. DOI: 10.1590/2179-8087.019316.

Bontemps J.-D., Gelhaye P., Nepveu G., Hervé J.-H. When tree rings behave like foam: moderate historical decrease in the mean ring density of common beech paralleling a strong historical growth increase // Annals of Forest Science, Springer Verlag / EDP Sciences. 2013. No. 70 (4). P. 329–343. DOI: 10.1007/s13595-013-0263-2.

Fang J., Kato T., Guo Z., Yang Y., Hu H., Shen H., Zhao X., Kishimoto-Mo A.W., Tang Y., Houghton R.A. Evidence for environmentally enhanced forest growth // Proc. Natl. Acad. Sci. 2014. No. 111. P. 9527–9532. DOI: 10.1073/pnas.1402333111.

Franceschini T., Bontemps J.-D., Gelhaye P., Rittie D., Herve J.-C., Gegout J.-C., Leban J.-M. Decreasing trend and fluctuations in the mean ring density of Norway spruce through the twentieth century // Ann. For. Sci. 2010. No. 67. P. 816p1–816p10. DOI: 10.1051/forest/2010055.

Franceschini T., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Transient historical decrease in earlywood and latewood density and unstable sensitivity to summer temperature for Norway spruce in northeastern France // Can. J. For. Res. 2012. No. 42. P. 219–226. DOI: 10.1139/x11-182.

Kangas A., Henttonen H.M., Pitkänen T.P., Sarkkola S., Heikkinen J. Re-calibrating stem volume models – is there change in the tree trunk form from the 1970s to the 2010s in Finland? // Silva Fennica. Vol. 54, no. 4. Article id 10269. P. 1–23. DOI: 10.14214/sf.10269.

Lüdecke D., Makowski D., Waggoner P., Patil I. Assessment of Regression Models Performance // CRAN. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3952174.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Bielak K. Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management // For. Ecol. Manage., Forest Observat. Studies: Data Sources for Analysing // Forest Struct. Dyn. 2014. No. 316. P. 65–77. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.050.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870 // Nature Communications. 2014. No. 5. Article number 4967. DOI: 10.1038/ncomms5967.

Roderick M.L., Berry S.L. Linking wood density with tree growth and environment: a theoretical analysis based on the motion of water // *New Phytol.* 2001. No. 149. P. 473–485. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00054.x.

Romero F.M., Jacovine L.A.G., Ribeiro S.C., Torres C.M.M.E., da Silva L.F., Gaspar R.D.O., da Rocha S.J.S.S., Staudhammer C.L., Fearnside P.M. Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the southwestern Amazon: A Case Study // *Forests.* 2020. No. 11, id 874. DOI: 10.3390/f11080874.

Schumacher F.X., Hall F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume // *J. Agric. Res.* 1933. No. 9 (47). P. 719–734.

Usoltsev V.A., Lin H., Shobairi S.O.R., Tsepordey I.S., Zilin Ye. Are There Differences in the Reaction of the Light-Tolerant Subgenus *Pinus* spp. Biomass to Climate Change as Compared to Light-Intolerant Genus *Picea* spp.? // *Plants.* 2020. No. 9, id 1255. DOI: 10.3390/plants9101255.

Usoltsev V.A., Osmirko A.A., Chasovskikh V.P., Tsepordey I.S., Zukow W. Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia // *Ecological Questions.* 2019. Vol. 30, no. 2. P. 57–67. DOI: 10.12775/EQ.2019.012.

Zhu J., Shi Y., Fang L., Liu X., Ji C. Patterns and determinants of wood physical and mechanical properties across major tree species in China // *Sci. China Life Sci.* 2015. No. 58. P. 602–612.

Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe // *Silva Fennica Monographs* 4. 2005. 63 p.

References

Bondarenko S.L., Ustiniva I.G. Trends of climatic changes in density of year rings // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 50–59. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/154. (In Russ.)

Vaganov E.A., Skomarkova M.V., Schulze E.-D., Linke P. The Influence of Climatic Factors on Wood Increment and Density of Tree Rings in Spruce and Pine in Mountains of Northern Italia. *Lesovedenie*, 2007, no. 2, pp. 37–44. (In Russ.)

Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. Forest area dynamics of the Forest experimental district of Russian Timiryazev State Agrarian University over a period of 150 years. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2018, no. 4, pp. 5–19. DOI: 10.26897/0021-342X-2018-4-5–19. (In Russ.)

Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. The results of experimental work over 150 years in the Forest experimental district of the Timiryazev Academy; RSAU-MTAA. Moscow: Nauka, 2020. 382 p. (In Russ.)

Kiseleva V.V., Korotkov S.A., Skorodumov P.V. Trends in species composition changes in the forests of Losinyi Ostrov. *Forestry bulletin*, 2016, no. 5 (20), pp. 21–25. (In Russ.)

Lebedev A.V. The progress of natural processes in the stands of the core of the «Kologrivsky Forest» Nature Reserve. *Vklad osobo ohranyaemyh prirodnih territorij v ekologicheskuyu ustojchivost' regionov: sovremennoe sostoyanie i perspektivy* : mater. Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) konf. (20–21 sentyabrya 2018. Kologriv: FGBU “GPZ «Kologrivskij les» im. M.G. Sinicyna”, 2018, pp. 6–14. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests. Ekateginburg, 2020. (In Russ.)

Alekseev A.S., Sharma S.K. Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region. *Izv. vuzov. Lesn. zshurn.*, 2020, no. 3, pp. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-42-54.

Araiyo E.J.G., Loureiro G.H., Sanquetta C.R., Sanquetta M.N.I., Corte A.P.D., Péllico Netto S., Behling A. Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest. *Floresta e Ambiente*, 2018, no. 25(1), e20160193. DOI: 10.1590/2179-8087.019316.

Bontemps J.-D., Gelhaye P., Nepveu G., Hervé J.-H. When tree rings behave like foam: moderate historical decrease in the mean ring density of common beech paralleling a strong historical growth increase. *Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences*, 2013, no. 70 (4), pp. 329–343. DOI: 10.1007/s13595-013-0263-2.

Fang J., Kato T., Guo Z., Yang Y., Hu H., Shen H., Zhao X., Kishimoto-Mo A.W., Tang Y., Houghton R.A. Evidence for environmentally enhanced forest growth. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2014, no. 111, pp. 9527–9532. DOI: 10.1073/pnas.1402333111.

Franceschini T., Bontemps J.-D., Gelhaye P., Rittie D., Herve J.-C., Gegout J.-C., Leban J.-M. Decreasing trend and fluctuations in the mean ring density of Norway spruce through the twentieth century. *Ann. For. Sci.*, 2010, no. 67, pp. 816p1-816p10. DOI: 10.1051/forest/2010055.

Franceschini T., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Transient historical decrease in earlywood and latewood density and unstable sensitivity to summer temperature for Norway spruce in northeastern France. *Can. J. For. Res.*, 2012, no. 42, pp. 219–226. DOI: 10.1139/x11-182.

Kangas A., Henttonen H.M., Pitkänen T.P., Sarkkola S., Heikkinen J. Re-calibrating stem volume models – is there change in the tree trunk form from the 1970s to the 2010s in Finland? *Silva Fennica*, vol. 54, no. 4. Article id 10269, pp. 1–23. DOI: 10.14214/sf.10269.

Lüdecke D., Makowski D., Waggoner P., Patil I. Assessment of Regression Models Performance. *CRAN*, 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3952174.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Bielak K. Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management. *For. Ecol. Manage., Forest Observat. Studies: Data Sources for Analysing Forest Struct. Dyn.*, 2014, no. 316, pp. 65–77. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.050.

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications*, 2014, no. 5. Article number 4967. DOI: 10.1038/ncomms5967.

Roderick M.L., Berry S.L. Linking wood density with tree growth and environment: a theoretical analysis based on the motion of water. *New Phytol.*, 2001, no. 149, pp. 473–485. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00054.x.

Romero F.M., Jacovine L.A.G., Ribeiro S.C., Torres C.M.M.E., da Silva L.F., Gaspar R.D.O., da Rocha S.J.S.S., Staudhammer C.L., Fearnside P.M. Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the southwestern Amazon: A Case Study. *Forests*, 2020, no. 11, id 874. DOI: 10.3390/f11080874.

Schumacher F.X., Hall F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. *J. Agric. Res.*, 1933, no. 9 (47), pp. 719–734.

Usoltsev V.A., Lin H., Shobairi S.O.R., Tsepordey I.S., Zilin Ye. Are There Differences in the Reaction of the Light-Tolerant Subgenus *Pinus* spp. Biomass to Climate Change as Compared to Light-Intolerant Genus *Picea* spp.? *Plants*, 2020, no. 9, id 1255. DOI: 10.3390/plants9101255.

Usoltsev V.A., Osmirko A.A., Chasovskikh V.P., Tsepordey I.S., Zukow W. Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia. *Ecological Questions*, 2019, vol. 30, no. 2, pp. 57–67. DOI: 10.12775/EQ.2019.012.

Zhu J., Shi Y., Fang L., Liu X., Ji C. Patterns and determinants of wood physical and mechanical properties across major tree species in China. *Sci. China Life Sci.*, 2015, no. 58, pp. 602–612.

Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs* 4. 2005. 63 p.

Материал поступил в редакцию 03.11.2020

Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Изменения биомассы деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Европе с 1940 года // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 234. С. 6–22. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.6-22

Сосна обыкновенная является одной из основных лесообразующих пород Европы, а ее древесина находит широкое применение в лесопромышленном комплексе. При оценке углерододепонирующих функций считается, что конверсионные коэффициенты являются константными по времени. Последние исследования показывают, что происходящие климатические изменения оказывают существенное влияние на прирост древесины и ее свойства. Цель данного исследования – выявление долговременных тенденций в изменении

биомассы фракций деревьев сосны обыкновенной в Европе, происходящих с 1940 г. Для проверки гипотезы о влиянии календарного года на биомассу фракций деревьев проводился регрессионный анализ с применением линейных моделей смешанных эффектов. Проведенный статистический анализ позволил выявить достоверное влияние (при $p < 0,05$) календарного года только на биомассу стволов в коре. Наиболее сильно изменения проявляются для деревьев в молодняках и средневозрастных насаждениях, где происходит формирование наибольшего радиального прироста. Для крупномерных стволов, согласно результатам моделирования, снижение биомассы стволов в коре не прослеживается. В ближайшие десятилетия в результате продолжающихся климатических изменений процесс снижения биомассы и плотности древесины крупномерных стволов должен усилиться. Выявленные изменения биомассы сопровождаются снижением плотности древесины, что происходит в результате увеличения в структуре годичного прироста более рыхлой и менее плотной ранней древесины. Таким образом, в условиях ускоряющихся темпов роста древесных растений объемы стволов и запасы древесины не должны напрямую пересчитываться в депонированный углерод с учетом исторических значений конверсионных коэффициентов. Это также следует учитывать при мониторинге, моделировании и использовании углерода и биомассы в лесах в условиях глобальных изменений.

Ключевые слова: биомасса, деревья, сосна обыкновенная, Европа, изменения климата, модель смешанных эффектов.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Changes in the biomass of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees in Europe since 1940. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2021, is. 234, pp. 6–22 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.6-22

Scots pine is one of the main forest-forming species in Europe, and its wood is widely used in the timber industry. When evaluating carbon-depositing functions, the conversion ratios are assumed to be constant over time. Recent studies show that the ongoing climatic changes have a significant impact on the growth of trees and wood properties. Therefore, the purpose of this study is to identify long-term trends in the change in the biomass of Scots pine tree fractions in Europe since 1940. To test the hypothesis about the influence of the calendar year on the biomass of tree fractions, regression analysis was performed using linear mixed-effect models. The performed statistically analysis made it possible to reveal a significant effect ($p < 0.05$) of the calendar year only on the biomass of the trunks in the bark. The changes are most pronounced for trees in young and middle-aged stands, where the formation of the greatest radial growth occurs. For large-sized trunks, according to the simulation results, the biomass of the stems in the bark is not traced. In the coming decades, as a result of ongoing climate change, the decline in biomass and wood density of large-sized stems should intensify. The revealed changes in biomass are accompanied by a

decrease in wood density, which occurs as a result of an increase in the structure of the annual growth of looser and less dense early wood. Thus, in the context of accelerating growth rates of woody plants, the volume of trunks and wood stock should not be directly converted into deposited carbon, considering the historical values of conversion ratios. This should also be considered when monitoring, modeling and using carbon and biomass in forests in the face of global change.

Key words: biomass, trees, Scots pine, Europe, climate change, mixed effects model.

ЛЕБЕДЕВ Александр Вячеславович – старший преподаватель кафедры сельскохозяйственных мелиораций, лесоводства и землеустройства Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5789-5540. ORCID: 0000-0002-8939-942X.

127550, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: avl1993@mail.ru

LEBEDEV Aleksandr V. – PhD (Agriculture), senior lecturer of the department of Agricultural Reclamation, Forestry and Land Organization at Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. SPIN-code: 5789-5540. ORCID: 0000-0002-8939-942X.

127550. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia. E-mail: avl1993@mail.ru

КУЗЬМИЧЕВ Валерий Васильевич – профессор, заведующий лабораторией кафедры сельскохозяйственных мелиораций, лесоводства и землеустройства Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, доктор биологических наук.

127550, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия.

KUZMICHEV Valery V. – DSc (Biology), professor, head of laboratory of the department of Agricultural Reclamation, Forestry and Land Organization at Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

127550. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia.