

Научная статья

УДК 630*182.5+630*228.82

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-2-44-58

Формирование надземной фитомассы сосны и ели в лесонасаждениях на постагrogenных землях

Д.А. Данилов, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [S-7007-2019](https://orcid.org/0000-0002-7504-5743),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

А.А. Яковлев[✉], *канд. с.-х. наук, доц.*; ResearcherID: [AAR-5081-2021](https://orcid.org/0000-0001-8450-2806),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8450-2806>

И.А. Крылов, аспирант; ResearcherID: [ADM-9554-2022](https://orcid.org/0000-0001-7122-2418),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7122-2418>

С.А. Суворов, аспирант; ResearcherID: [AAC-9497-2022](https://orcid.org/0000-0002-4429-8131),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-8131>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; stown200@mail.ru, artem95692@gmail.com[✉], diesdthebest@yandex.ru, sergey_suvorov1999@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.25 / Одобрена после рецензирования 03.06.25 / Принята к печати 07.06.25

Аннотация. Исследование древесной растительности, сформировавшейся на постагrogenных землях, направлено на оценку ее ресурсного потенциала с целью возможного вовлечения в лесное хозяйство. Ключевым индикатором продуктивности таких территорий служит надземная фитомасса, анализ которой позволяет определить объем депонированного углерода, что имеет особую значимость в контексте глобальных климатических изменений. Работа выполнялась на заброшенных сельскохозяйственных угодьях Гатчинского района Ленинградской области. В настоящее время для данного региона отсутствуют комплексные и достоверные данные о динамике формирования древесной биомассы на бывших сельхозземлях. Объектами изучения выступили молодняки естественного происхождения, сформированные хвойными и лиственными породами, и искусственные насаждения сосны и ели. На каждой пробной площади отбиралось от 7 до 9 модельных деревьев с замером их диаметра и высоты ствола. Отобранные деревья разделялись на фракции – ствол, ветви, хвою – для определения их массы. На основе этих взвешиваний с помощью регрессионного анализа разработаны уравнения, позволяющие рассчитывать массу отдельных фракций. Построенные модели характеризуются высокими коэффициентами детерминации, однако точность расчетов, особенно для крон, ограничивается значительной морфологической изменчивостью деревьев в фазе активного роста. Анализ распределения фитомассы по фракциям выявил, что у сосны и ели наибольшая доля массы сосредоточена в стволовой части. Наименьший вклад у сосны приходится на ассимиляционный аппарат, а у ели – на ветви. Расчет, выполненный с применением полученных уравнений, показал, что на данной сукцессионной стадии максимальный запас надземной фитомассы на единицу площади характерен для сосновых молодняков. Результаты исследования не только значимы для лесоводственного планирования, но и указывают на потенциал использования такой древесины в качестве сырья для производства технологической щепы и биотоплива.

Ключевые слова: регрессионные уравнения, фитомасса, хвойный подрост, постагро-генные земли, естественное возобновление

Для цитирования: Данилов Д.А., Яковлев А.А., Крылов И.А., Суворов С.А. Формирование надземной фитомассы сосны и ели в лесонасаждениях на постагrogenных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 2. С. 44–58.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-2-44-58>

Original article

Formation of Aboveground Phytomass of Pine and Spruce in Forest Plantations on Post-Agricultural Lands

Dmitry A. Danilov, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [S-7007-2019](https://orcid.org/0000-0002-7504-5743),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

Artem A. Yakovlev , Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;


ResearcherID: [AAR-5081-2021](https://orcid.org/0000-0001-8450-2806), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8450-2806>

Ivan A. Krylov, Postgraduate Student; ResearcherID: [ADM-9554-2022](https://orcid.org/0000-0001-7122-2418),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7122-2418>

Sergey A. Suvorov, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAC-9497-2022](https://orcid.org/0000-0002-4429-8131),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-8131>

Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, lit. U., St. Petersburg, Russian Federation, 194021; stown200@mail.ru, artem95692@gmail.com , diesdthebest@yandex.ru, sergey_suvorov1999@mail.ru

Received on March 10, 2025 / Approved after reviewing on June 3, 2025 / Accepted on June 7, 2025

Abstract. This research investigates the resource potential of woody vegetation colonizing former agricultural lands, assessing its feasibility for integration into sustainable forestry. A critical metric for evaluating such ecosystems is aboveground phytomass, which also serves as a proxy for estimating carbon sequestration – a factor of paramount importance amidst global climate challenges. The study was conducted on abandoned farmlands within the Gatchina district of the Leningrad region, focusing on young, naturally regenerated stands and artificial plantations. On permanently established sample plots, a complete census was performed for the dominant native conifers: Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*). To quantify standing phytomass and develop allometric models, 7 to 9 representative trees per species were felled. Each tree was fractionated into its components (stem, branches, and needles), with each fraction weighed separately. These detailed measurements provided the basis for regression analysis, yielding species-specific equations for predicting the biomass of individual tree compartments. Although the derived models exhibit high coefficients of determination, predictive accuracy – particularly for crown components – is constrained by the pronounced morphological variability inherent to actively growing young trees. Analysis of biomass allocation revealed that for both species, the stem constitutes the largest reservoir of mass. The relative contribution of the assimilation apparatus (needles) was lowest in pine, whereas in spruce, branches represented the smallest fraction. Application of these allometric equations indicates that at this early successional stage, young pine stands store the maximum aboveground phytomass per unit area. Comprehensive, long-term

data on woody biomass accumulation in post-agrogenic landscapes remain scarce for this region. The findings are therefore significant for advancing regional forestry strategies and highlight the potential of this biomass as a feedstock for industrial wood chips and bioenergy production.

Keywords: regression equations, phytomass, coniferous undergrowth, postagrogenic lands, natural regeneration

For citation: Danilov D.A., Yakovlev A.A., Krylov I.A., Suvorov S.A. Formation of Aboveground Phytomass of Pine and Spruce in Forest Plantations on Post-Agricultural Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 2, pp. 44–58. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-2-44-58>

Введение

В результате экономических и социальных изменений в бореальной зоне России в последние десятилетия наблюдается устойчивое сокращение площадей, используемых в сельскохозяйственных целях [2, 3, 7, 14, 17–20, 23–27]. С момента прекращения хозяйственной деятельности на сельскохозяйственных землях начинаются процессы естественного возобновления леса.

Для молодых древостоев, произрастающих на заброшенных сельхозземлях, характерна высокая вариабельность как по запасу древесины, так и по породному составу (соотношению хвойных и лиственных пород). Главное отличие древостоев постагrogenных территорий бореальной зоны в сравнении с их аналогами на ненарушенных лесных почвах – это ускоренный рост, обусловленный наличием мощного и плодородного бывшего пахотного горизонта [2, 15, 16, 18, 23, 28]. Фитомасса на ранних сукцессионных стадиях формируется под комплексным влиянием таких факторов, как породная и возрастная структура древостоя, тип возобновления (семенное или вегетативное), а также почвенное плодородие [4, 9, 11, 15]. На бывших сельхозземлях древостои формируют больший объем фитомассы и запас древесины в сравнении с древостоями на лесных почвах [2, 3, 5].

Определение надземной фитомассы и ее фракционного состава в постагrogenных насаждениях имеет важное прикладное значение для планирования их хозяйственного использования, а также научную ценность для оценки углерододепонирующего потенциала. Биомасса молодого древостоя служит ключевым индикатором, отражающим динамику и специфику процессов естественного лесовосстановления за заданный временной интервал. Количественная оценка надземной фитомассы представляет особую важность, поскольку она – наиболее интегральный показатель продуктивности фитоценоза [25]. Такая оценка является ключевой для решения актуальной, особенно в условиях глобального изменения климата, задачи расчета депонированного углерода в растительных сообществах [16, 20, 22, 23]. Также стоит отметить, что вместе с знаниями о формировании надземной фитомассы, которая напрямую зависит от плотности древесины деревьев, произрастающих на постагrogenных территориях, появляются сведения о показателях, определяющих качество самой древесины (объем и базисная плотность) [10, 12, 13, 15].

Таким образом, количественная оценка надземной фитомассы древостоев на постагрогенных территориях является необходимым условием для разработки стратегий вовлечения данных древесных ресурсов в хозяйственный оборот [5, 7, 15]. Исследование закономерностей формирования фракционного состава фитомассы на ранних сукцессионных стадиях становится базой для обоснования методов рационального управления такими землями.

Целью исследования является разработка регрессионных моделей для оценки надземной фитомассы молодняков сосны и ели естественного и искусственного происхождения на начальных стадиях восстановительной сукцессии постагрогенных земель. В задачи входило создание отдельных уравнений для расчета общей надземной фитомассы и различных фракций: ствола, ветвей и хвои.

Объекты и методы исследования

Работа выполнялась на территории Гатчинского района Ленинградской области. Объектами исследования стали древостои, сформировавшиеся на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного использования. В качестве первого пробного участка было выбрано 25-летнее залежное поле с естественным возобновлением древесных пород, где присутствуют как хвойные, так и лиственные породы. Одна из сторон данного участка непосредственно граничит с лесным массивом. Флористический состав растительного покрова представлен преимущественно мезотрофными видами. Географическое положение участка: 59°18'22,33" с. ш. 30°6'7,50" в. д.

Вторым опытным участком были искусственные насаждения сосны и ели, созданные в 2010 г. на бывшей пашне при различных вариантах подготовки почвы. Исходная густота посадки составляла 3 тыс. шт. семян сосны и ели на 1 га.

Исследуемые участки расположены в зоне длительного аграрного освоения. Анализ исторических карт Царскосельского уезда (Петербургская губерния) конца XVIII в. позволил установить, что срок их активного сельскохозяйственного использования, вероятно, превышает 200 лет.

Почвенный покров территории сформирован типичными двучленными отложениями: супесчаная толща, подстилаемая красноцветным валунным суглинком. Средняя мощность сохранившегося агрогенно-трансформированного почвенного горизонта (пахотного) составляет 35 см, что обеспечивает больший продуктивный объем почвенной толщи для роста корневой системы и минерального питания растений.

Изучение структуры фитомассы проводилось на заложенных ранее стационарных объектах, на постагрогенных территориях. В естественных древостоях учет осуществлялся на пробной площади размером 0,25 га (50×50 м). В искусственных насаждениях выполняли сплошной пересчет по рядам посадки на участке площадью 0,2 га для каждой целевой породы [15].

В рамках полевых исследований осуществлен полный пересчет хвойных древесных растений, измерены их высоты и диаметры стволов. Для деревьев высотой до 2 м диаметр определялся на уровне корневой шейки.

Результаты пересчета возобновления хвойных пород приведены в табл. 1. Запас на 1 га определялся путем перерасчета объема модельных деревьев на все деревья, произрастающие на пробной площади.

Таблица 1

Биометрические показатели сосны и ели на опытных участках
Characterization of biometric indices of pine and spruce in the experimental plot

Состав древос- стоя	Среднее		Запас, м ³ /га		Средний возраст, лет	Числен- ность, экз./га	Средняя базисная плот- ность, кг/м ³
	высота, м	диаметр, см	по породам	итого			
<i>Естественное насаждение</i>							
5С	2,9	2,1	30	50	9	320	301±1
5Е	1,0	1,0	20		6	360	334±1
<i>Искусственное насаждение</i>							
4С	8,9	8,5	73	113	12	2700	219±7
6Е	4,4	4,9	40		12	3020	387±8

Для разработки регрессионных моделей фитомассы в каждом типе насаждений (естественных и искусственных) на постагроденных землях было отобрано и срублено от 7 до 9 модельных деревьев для каждой исследуемой породы (табл. 2). Данное количество модельных деревьев определено высокой вариабельностью диаметров и высот ствола в молодых древостоях.

Таблица 2

Характеристика модельных деревьев
Characterization of model trees

Модельное дерево	Диаметр, см	Высо- та, м	Объем ствола, м ³	Надземная фитомасса, кг	Масса ствола, кг	Масса ветвей, кг	Масса хвои, кг
<i>Естественное насаждение</i>							
Сосна 1	8,0	5,2	0,0602	27,7551	19,3970	6,7339	1,6241
Сосна 2	3,7	2,1	0,0082	3,1918	2,7971	0,1778	0,2169
Сосна 3	4,3	3,1	0,0174	6,2907	5,5732	0,4254	0,2921
Сосна 4	3,5	3,0	0,0110	4,3943	3,4904	0,5493	0,3547
Сосна 5	2,4	1,4	0,0009	0,3987	0,3541	0,0359	0,0087
Сосна 6	1,6	1,2	0,0048	1,6393	1,6219	0,0066	0,0107
Сосна 7	8,0	4,1	0,0653	23,1353	20,7794	1,4004	0,9554
Сосна 8	3,3	2,0	0,0027	1,1911	0,9494	0,1275	0,1141
Сосна 9	2,4	1,4	0,0003	0,7314	0,1036	0,2640	0,3638
Ель 1	2,5	1,3	0,0008	0,4203	0,1189	0,1130	0,1884
Ель 2	3,3	1,7	0,0019	1,6258	0,7171	0,2840	0,6247
Ель 3	2,4	1,6	0,0009	0,5773	0,3712	0,0954	0,1108
Ель 4	4,0	3,8	0,0189	9,9732	6,0836	1,7222	2,1675
Ель 5	2,1	2,3	0,0051	3,2106	2,1589	0,4179	0,6338
Ель 6	5,0	4,4	0,0202	11,0325	7,2086	2,2256	1,5982
Ель 7	2,0	2,3	0,0033	1,7890	1,2285	0,2545	0,3060
Ель 8	1,6	0,9	0,0003	0,3094	0,1442	0,0578	0,1074
Ель 9	2,5	1,3	0,0008	1,0830	0,7089	0,1115	0,2627
<i>Искусственное насаждение</i>							
Сосна 1	12,0	7,1	0,1263	49,6430	42,7991	4,8508	1,9931
Сосна 2	6,8	5,8	0,1057	37,9632	35,8084	0,8121	1,3428

Окончание табл. 2

Модельное дерево	Диаметр, см	Высота, м	Объем ствола, м ³	Надземная фитомасса, кг	Масса ствола, кг	Масса ветвей, кг	Масса хвои, кг
Сосна 3	11,0	7,5	0,1566	59,2288	54,3695	3,0318	1,8275
Сосна 4	1,5	2,2	0,0025	1,2163	1,1139	0,0351	0,0674
Сосна 5	1,9	2,7	0,0041	1,6316	1,4620	0,0998	0,0699
Сосна 6	3,5	3,7	0,0114	4,2848	3,8651	0,2534	0,1662
Сосна 7	1,8	1,3	0,0004	0,1853	0,1770	0,0076	0,0007
Сосна 8	1,9	1,7	0,0008	0,3838	0,3447	0,0278	0,0113
Ель 1	5,1	4,5	0,0240	13,6592	8,2982	2,2539	3,1071
Ель 2	2,5	1,5	0,0012	0,9146	0,5910	0,1065	0,2171
Ель 3	1,7	0,9	0,0003	0,2929	0,1684	0,0466	0,0780
Ель 4	2,7	1,9	0,0017	0,8575	0,6125	0,1110	0,1340
Ель 5	2,4	2,8	0,0055	3,3545	2,4516	0,3561	0,5468
Ель 6	4,1	3,5	0,0166	10,9098	7,6407	1,6258	1,6433
Ель 7	7,5	6,1	0,0705	31,9346	24,5877	3,2950	4,0518

Для каждого модельного дерева проводилось определение массы фракций. Все ветви с хвоей отделялись и взвешивались. Из общей массы ветвей случайно выбирались 3 модельные ветви, представляющие нижний, средний и верхний ярусы кроны. Отдельно взвешивалась древесная часть каждой ветви и ее хвоя, после чего образцы высушивались до абсолютно сухого состояния для повторного взвешивания. За объем ствола принималась сумма сегментов длиной 1 м (от комля). Так как ствол дерева является сложным телом вращения, сегменты ствола были приняты за усеченный конус, а вершина – за конус с последующим расчетом их объемов по соответствующим формулам [4, 10].

Базисная плотность (г/см³) исследуемых образцов древесины каждого сегмента устанавливалась по следующей формуле:

$$\rho_{\text{баз}} = \frac{1}{\frac{m_w}{m_0} - 0,346},$$

где m_w , m_0 – масса образцов, предельно насыщенного влагой и абсолютно сухого соответственно, г.

Определение базисной плотности древесины осуществлялось по основанному на принципе измерения максимального влагосодержания небольших образцов методу Полубояринова [8]. В качестве материала для анализа использовали тонкие спилы или высечки древесины.

Для установления общей надземной биомассы применялся поэлементный подход: сначала устанавливалась масса абсолютно сухого вещества ствола, ветвей и хвои, а затем эти значения суммировались.

Масса древесины в абсолютно сухом состоянии (кг) определялась в соответствии с формулой

$$M = \frac{V \rho_{\text{баз}}}{1000},$$

где V – объем сегмента ствола, м³; $\rho_{\text{баз}}$ – базисная плотность древесины, кг/м³.

Надземная фитомасса (кг) рассчитывалась как

$$W_d = \exp\left(b_0 + \frac{b_1 D}{D + g} + b_2 H + b_3 \ln H\right),$$

где D – диаметр на высоте 1,3 для деревьев более 2 м и у корневой шейки для деревьев менее 2 м, см; H – высота, м; b_0, b_1, b_2, b_3, g – коэффициенты регрессионных уравнений [6, 21].

Данная модель позволила вычислить коэффициенты регрессионных уравнений, связывающих массу фракции (W_d , кг абсолютно сухого вещества) с диаметром ствола и высотой дерева.

Уравнения для расчета фитомассы были разработаны с использованием метода нелинейной множественной регрессии. Вычислительная часть работы, включая оптимизацию по алгоритму Левенберга–Марквардта, реализована в программной среде Statgraphics Centurion 18.

С помощью коэффициента линейной корреляции Пирсона рассчитаны сила и направленность связи между таксационными параметрами и фитомассой:

$$r_{xy} = \frac{\sum(d_x d_y)}{\sqrt{(\sum d_x^2 \sum d_y^2)}},$$

где d_x и d_y – отклонение от среднего арифметического каждого показателя соответственно [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ регрессионных моделей, описывающих зависимость фитомассы и ее фракций от диаметра и высоты деревьев, позволил оценить влияние этих таксационных показателей на формирование общей и компонентной надземной массы (табл. 3). Результаты анализа свидетельствуют о тесной положительной линейной зависимости между высотой дерева и такими параметрами, как диаметр ствола, его масса и общая надземная фитомасса.

Таблица 3

Индекс корреляции Пирсона для фракций фитомассы и основные таксационные показатели для естественных и искусственных хвойных насаждений на постагrogenных почвах для сосны и ели
Pearson's correlation index for phytomass fractions and main taxation indices for natural coniferous stands and artificial stands on post-agro soils for pine and spruce trees

	Диаметр, см	Высота, м	Объем ствола, м ³	Надземная фитомасса, кг	Масса		
					ствола, кг	ветвей, кг	хвон, кг
<i>Естественные насаждения сосны</i>							
Диаметр, см	1,00						
Высота, м	0,95	1,00					
Объем ствола, м ³	0,97	0,91	1,00				
Надземная фитомасса, кг	0,97	0,94	0,99	1,00			

Окончание табл. 3

	Диаметр, см	Высота, м	Объем ствола, м ³	Надземная фитомасса, кг	Масса		
					ствола, кг	ветвей, кг	хвои, кг
Масса ствола, кг	0,97	0,92	1,00	0,99	1,00		
Масса ветвей, кг	0,75	0,82	0,75	0,85	0,75	1,00	
Масса хвои, кг	0,91	0,91	0,90	0,95	0,90	0,93	1,00
<i>Естественные насаждения ели</i>							
Диаметр, см	1,00						
Высота, м	0,83	1,00					
Объем ствола, м ³	0,86	0,97	1,00				
Надземная фитомасса, кг	0,87	0,97	1,00	1,00			
Масса ствола, кг	0,86	0,97	1,00	1,00	1,00		
Масса ветвей, кг	0,90	0,96	0,99	0,99	0,99	1,00	
Масса хвои, кг	0,83	0,90	0,96	0,96	0,94	0,93	1,00
<i>Искусственные насаждения сосны</i>							
Диаметр, см	1,00						
Высота, м	0,97	1,00					
Объем ствола, м ³	0,96	0,97	1,00				
Надземная фитомасса, кг	0,97	0,97	1,00	1,00			
Масса ствола, кг	0,96	0,97	1,00	1,00	1,00		
Масса ветвей, кг	0,95	0,85	0,84	0,86	0,84	1,00	
Масса хвои, кг	0,99	0,97	0,98	0,99	0,98	0,91	1,00
<i>Искусственные насаждения ели</i>							
Диаметр, см	1,00						
Высота, м	0,96	1,00					
Объем ствола, м ³	0,96	0,92	1,00				
Надземная фитомасса, кг	0,98	0,95	0,99	1,00			
Масса ствола, кг	0,97	0,93	1,00	1,00	1,00		
Масса ветвей, кг	0,98	0,97	0,93	0,97	0,94	1,00	
Масса хвои, кг	0,97	0,97	0,92	0,95	0,92	0,99	1,00

На основе данных табл. 3 можно заключить о сильной внутренней взаимозависимости компонентов фитомассы. Что касается влияния морфометрических параметров, то диаметр ствола является более информативным предиктором общей и компонентной биомассы, чем высота дерева. Это, вероятно, связано с существенно более широким размахом вариации диаметров в исследованной выборке. Анализ выявил статистически значимую зависимость высоты дерева от фитомассы ветвей и хвои. В то же время среди всех рассмотренных взаимосвязей наименее выраженной оказалась корреляция между диаметром ствола и массой хвои.

В табл. 4 представлены коэффициенты уравнений Маркклунда и соответствующие им коэффициенты детерминации (R^2). Большинство полученных моделей характеризуются высокой объясняющей способностью, о чем свиде-

тельствуют значения R^2 . Наиболее низкий показатель детерминации отмечен для уравнения фитомассы ветвей сосны, это, вероятно, обусловлено высокой морфологической изменчивостью крон в фазе активного роста данного вида. Существенно сниженное значение R^2 также наблюдается у модели для фитомассы хвои ели, что может быть связано с выраженной вариабельностью этого признака у молодых особей. Таким образом, несмотря на указанные ограничения, созданные регрессионные уравнения обладают высокой эффективностью и точностью аппроксимации исходных данных, полученных в ходе полевых исследований.

Таблица 4

Коэффициенты регрессионных уравнений Маркклунда для массы фракций сосны и ели в зависимости от диаметра и высоты деревьев
Marklund regression equations for fraction weight of pine and spruce as a function of tree diameter and height

Порода	Фракция фитомассы	b_0	b_1	b_2	b_3	g	R^2
<i>Естественные насаждения</i>							
Сосна	Надземная	-1,7757	7,5549	-0,4150	2,6876	13,3819	0,99
	Ствол	-2,4885	7,9339	-0,8855	3,8047	8,7668	0,99
	Ветви	0,0453	0,1083	0,1173	0,1457	9,6250	0,21
	Хвоя	-3,1247	214,723	0,5208	-0,1583	1468,2	0,92
Ель	Надземная	-0,8702	-7,6512	0,0580	2,6863	36,9058	0,94
	Ствол	-1,2219	1917,07	0,3846	1,3634	-20 429,0	0,95
	Ветви	-2,8774	0	0,5003	1,1629	0	0,96
	Хвоя	-1,9269	1,0908	-1,0800	4,6208	0	0,72
<i>Искусственные насаждения</i>							
Сосна	Надземная	-6,1605	-10,156	-0,8982	8,78403	141,617	0,99
	Ствол	-1,8361	0,06697	0,37698	1,41594	-6,1836	0,99
	Ветви	0,02803	0,09588	0,09968	0,09108	14,1188	0,30
	Хвоя	-13,138	5,00001	-1,5267	10,2758	1,25534	0,99
Ель	Надземная	-1,60279	7,68774	-0,429283	2,4006	9,77823	0,97
	Ствол	-1,29915	3,40932	0,191758	1,03266	9,83464	0,94
	Ветви	-1,91649	5,57014	0,203835	1,30734	-98,7616	0,79
	Хвоя	-1,54624	-294,651	0,24302	1,03681	6207,35	0,77

Анализ удельных запасов фитомассы, выполненный на основе данных сплошного перечета для 1 га, приведен в табл. 5. Результаты показывают, что сосна формирует наибольший общий запас надземной биомассы на единицу площади. Сравнение расчетных данных выявило систематическую погрешность: общая фитомасса, полученная суммированием значений по фракциям (ствол, ветви, хвоя), превышает величину, рассчитанную по приведенному уравнению – на 6 % для сосны и на 64 % для ели. Данное расхождение закономерно и объясняется фундаментальным свойством биологических систем – естественной неаддитивностью компонентного состава фитомассы, когда целое не равно простой сумме отдельных частей из-за взаимовлияния процессов роста и развития.

Таблица 5

Фракции надземной фитомассы хвойных пород на постагrogenных землях, т/га
Calculated values of fractions of aboveground phytomass of coniferous species
on post-aggro lands, tons per ha

Фитомасса	Сосна		Ель	
	естественные насаждения	искусственные насаждения	естественные насаждения	искусственные насаждения
Надземная	13,25	53,33	9,81	19,37
Ствол	10,58	50,95	6,45	14,33
Ветви	2,98	5,30	0,19	3,15
Хвоя	3,11	1,95	3,11	3,96

На рис. 1 представлено распределение запасов надземной фитомассы по основным структурным компонентам (фракциям). Наибольшая доля стволовой фитомассы характерна для сосны. У ели на стволовую часть приходится значительно меньше фитомассы. У сосны в искусственном насаждении наименьшая часть надземной фитомассы – это хвоя, а в естественном – ветви, что, вероятно, связано с различным размещением деревьев. В искусственном насаждении густота стояния деревьев в рядах выше, чем в естественном. У ели наименьшая доля фитомассы приходится на ветви в естественном насаждении и на хвою – в искусственном.

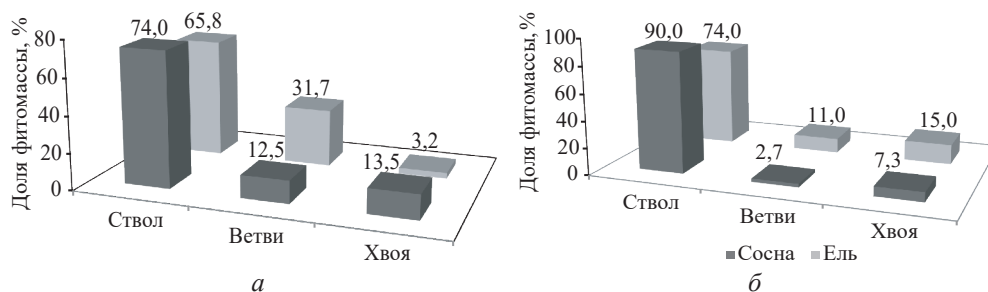


Рис. 1. Распределение средней надземной фитомассы по фракциям:
 а – естественное насаждение; б – искусственное насаждение

Fig. 1. Distribution of average aboveground phytomass by fractions:
 а – natural stand; б – artificial stand

Анализ распределения надземной фитомассы выявил выраженный дисбаланс между структурными компонентами дерева: массы ствола и ветвей значительно доминируют, в то время как доля хвои остается незначительной – у сосны она пренебрежимо мала, у ели составляет 3,2 % в естественных насаждениях и 15,0 % в искусственных.

Одной из наиболее важных качественных физико-технических характеристик древесины является ее плотность. От этого показателя зависит теплопроводная способность древесины и количество биомассы. Для выявления колебания базисной плотности древесины по высоте ствола все модельные деревья были условно разделены на 3 группы: до 2, 3 и 4 м высотой у ели и до 2, 3 и 5 м – у сосны.

Вопрос изменения базисной плотности древесины ствола по высоте хорошо изучен для спелых древостоев на лесных почвах, но остается нераскрытым для молодняков на постагrogenных землях. Знание закономерности изменения базисной плотности по высоте позволяет более полно моделировать распре-

деление стволовой биомассы, которая зависит не только от объема сегмента ствола, но и от плотности древесины. Дальнейшие исследования в данном направлении сделают возможным повышение точности расчета депонирования углерода древесной растительностью.

С помощью анализа базисной плотности древесины по высоте ствола у ели в естественных насаждениях установлено, что закономерности распределения наиболее последовательны для деревьев, высота которых не превышает 4 м. Типичная кривая изменения показателя имеет 2 выраженных минимума – в комлевой и вершинной частях, а также снижается в середине. При схожей плотности у основания деревьев высотой 2 и 3 м она падает по направлению к вершине. Однако у 3-метровых экземпляров на высоте более 2 м наблюдается обратный тренд – увеличение плотности. Указанные закономерности пространственной изменчивости исследуемого показателя, вероятно, связаны с особенностями формирования кроны на разной высоте и неоднородностью возрастной структуры рассматриваемой популяции ели.

В естественных насаждениях сосны для всех исследованных групп высот выявлена общая тенденция к снижению базисной плотности древесины по направлению от комля к вершине (рис. 2, б). Эта закономерность обусловлена анатомическим строением ствола – формированием конуса нарастания, в зоне которого увеличивается доля ранней (менее плотной) древесины.

Локальное повышение плотности на участках 1–1,3 и 3–4 м наблюдалось только в группе деревьев высотой 5 м. Это явление, предположительно, объясняется особенностью строения кроны сосны, у которой скелетные ветви расположены выше, чем у ели.

Сравнительный анализ также показал, что у сосны на постагрогенных территориях в среднем формируется менее плотная древесина, чем у ели (рис. 2, а). Это связано с большей интенсивностью радиального прироста и ускоренными темпами развития сосны в данных условиях.

Наименьшая изменчивость базисной плотности древесины ели по длине ствола наблюдается у деревьев с высотой не более 4 м. Для этой группы характерно снижение плотности древесины в средней части ствола относительно минимальных значений у комля и вершины. При схожей комлевой плотности у деревьев до 2 и 3 м она закономерно уменьшается по направлению к вершине. Исключением является группа до 3 м, где на высоте более 2 м фиксируется повторный рост этого показателя. Указанная пространственная изменчивость плотности у ели в естественных древостоях также объясняется анатомическими особенностями – формированием конуса нарастания с повышенным содержанием ранней ксилемы в верхней части ствола.

На рис. 2, в представлена динамика базисной плотности по высоте ствола для ели в искусственных посадках. Анализ графика распределения плотности выявил четкую закономерность для деревьев высотой до 4 м: показатель минимален у вершины и демонстрирует спад в средней части ствола. Для группы деревьев до 3 м характерно снижение плотности к середине ствола с ее последующим увеличением на приближенном к вершине участке. В группе до 2 м, напротив, показатель увеличивается по направлению к вершине. В искусственных насаждениях вариабельность плотности древесины ели обусловлена различиями в скорости роста одновозрастных деревьев и расстоянии между мутовками в кроновой части.

Согласно данным рис. 2, *з*, базисная плотность древесины в искусственных сосновых насаждениях имеет нелинейный характер изменения по высоте ствола. У деревьев высотой до 6 м отмечается увеличение показателя в интервале от 2 до 4 м с последующим снижением. Однако в группе до 3 м наблюдается иная динамика: рост плотности от комля до уровня 1,3 м и спад к 2-метровой отметке. Таким образом, характер изменения варьирует в зависимости от высотной группы деревьев. Эти закономерности распределения плотности, аналогично выявленным для естественных древостоев, связаны с архитектурой кроны (расположением ветвей по стволу) и формированием креновой древесины в зонах прикрепления сучьев.

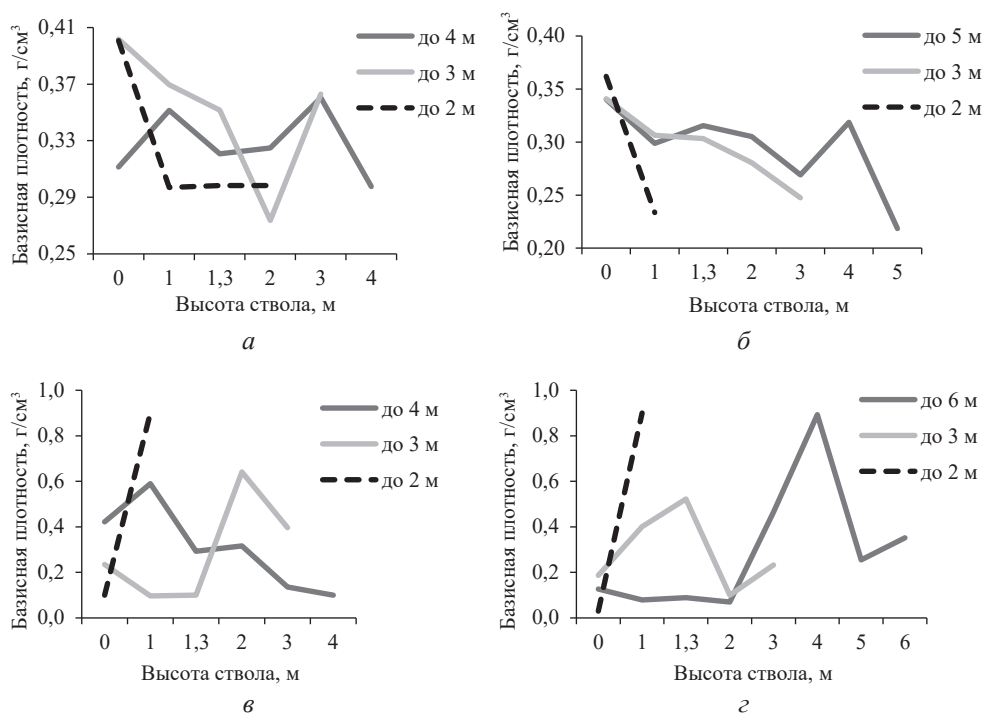


Рис. 2. Распределение базисной плотности древесины по стволу в зависимости от высоты дерева: *a* – у ели в естественном насаждении; *б* – у сосны в естественном насаждении; *в* – у ели в искусственном насаждении; *з* – у сосны в искусственном насаждении

Fig. 2. Distribution of basal wood density along the trunk as a function of tree: *a* – spruce in natural stand; *б* – pine in natural stand; *в* – spruce in artificial stand; *з* – pine in artificial stand

Заключение

Разработанные регрессионные модели для оценки фракционного состава надземной фитомассы сосны и ели в естественных и искусственных насаждениях в целом характеризуются высокой точностью и значимыми коэффициентами детерминации. При этом для ели, за исключением моделей ветвей, точность уравнений несколько ниже, что объясняется повышенной изменчивостью биометрических параметров у данного вида.

Полученные уравнения позволяют выполнять расчет запасов надземной биомассы и ее компонентов для хвойных древостоев на постагрогенных территориях. Результаты исследования могут быть применены как в нормативно-справочной деятельности (например, для оценки депонирующей способности насаждений при расчете углеродного баланса), так и для прогнозирования объемов сырья, пригодного для промышленного использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка данных в лесном хозяйстве. СПб.: Политехн. ун-т, 2016. 125 с.

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistical data processing in forestry: Tutorial*. St. Petersburg, Polytechnic University Press Publ., 2016. 125 p. (In Russ.).

2. Грибов С.Е., Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Евдокимов И.В. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесн. вестн. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25.

Gribov S.E., Korchagov S.A., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of Stands Formed on Agricultural Lands. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 19–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-19-25>

3. Данилов Д.А., Шестаков В.А., Шестакова Т.А., Эндерс О.О. Сукцессионные стадии восстановления древесной растительности на постагрогенных землях Ленинградской области // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 233. С. 60–80.

Danilov D.A., Shestakov V.A., Shestakova T.A., Enders O.O. Successional Stages of Restoration of Woody Vegetation on Postagrogenic Lands of the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehničeskoj akademii = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*, 2020, iss. 233, pp. 60–80. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.233.60-80>

4. Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С. Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 65–76.

Danilov D.A., Yakovlev A.A., Suvorov S.A., Krylov I.A., Korchagov S.A., Khamitov R.S. Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Postagricultural Land. *Lesnoj Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>

5. Карпин В.А., Петров Н.В., Туунен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 120–129.

Karpin V.A., Petrov N.V., Tuunenen A.V. Regeneration of Forest Phytocoenoses After Various Agricultural Land Use Practices in the Conditions of Middle Taiga Subzone. *Sibirskij Lesnoj Zurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 120–129. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15372/SJFS20170610>

6. Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В., Абакумов Е.В., Андриенко Г., Андриенко Н., Аппс М., Бобровский М.В., Бхатти Дж., Быховец С.С., Глухова Е.М., Грабарник П.Я., Зубкова Е.В., Зудин С.Л., Зудина Е.В., Кубасова Т.С., Лукьянов А.М., Мартынкин А.В., Морен Ф., Припутина И.В., Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Шанин В.Н., Шо С. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. 380 с.

Komarov A.S., Chertov O.G., Mikhailov A.V., Abakumov E.V., Andrienko G., Andrienko N., Appes M., Bobrovsky M.V., Bhatti J., Bykhovets S.S., Gluhova E.M., Grabarnik P.Y., Zubkova E.V., Zudin S.L., Zudina E.V., Kubasova T.S., Lukyanov A.M., Martynkin A.V., Morin F., Priputina I.V., Smirnov V.E., Khanina L.G., Shanin V.N., Shaw S. *Modeling the Dynamics of Organic Matter in Forest Ecosystems*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 380 p. (In Russ.).

7. Новикова М.А., Грязькин А.В., Беляева Н.В., Хетагуров Х.М., Нгуен В.З. Формирование лесных фитоценозов на заброшенных землях сельскохозяйственного назначения // *Аграрн. науч. журн.* 2016. № 6. С. 29–33.

Novikova M.A., Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Khetagurov H.M., Nguyen V.Z. Formation of Forest Phytocenoses on Abandoned Agricultural Land. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal* = Agrarian Scientific Journal, 2016, no. 6, pp. 29–33. (In Russ.).

8. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Poluboyarinov O.I. *Density of wood*. Moscow, Forest Industry Publ., 1976. 160 p. (In Russ.).

9. Пристова Т.А. Фитомасса древесных растений в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения // *Лесн. вестн.* 2020. Т. 24, № 1. С. 5–13.

Pristova T.A. Phytomass of Woody Plants in Deciduous Phytocenoses After Felling. *Lesnoy Vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 5–13. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-1-5-13>

10. Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 145 с.

Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. *Methodological Guidelines for the Study of Dynamics and Biological Cycling in Phytocenoses*. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 145 p. (In Russ.).

11. Усольцев А.В., Ценордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 178 с.

Usoltsev A.V., Tsepordei I.S. *Qualimetry of Phytomass of Forest Trees: Density and Dry Matter Content*. Ekaterinburg, UGLTU Publ., 2020. 178 p. (In Russ.).

12. Усольцев В.А., Усольцев А.В. Регрессионная модель предельных показателей фитомассы сосновых древостоев // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2001. № 1. С. 7–13.

Usoltsev V.A., Usoltsev A.V. Regression Model of Limiting Indicators of Phytomass of Pine Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2001, no. 1, pp. 7–13. (In Russ.).

13. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы, осины в европейской части России // *Лесоведение*. 1996. № 6. С. 36–46.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gulbe T.A., Gulbe Y.I. Allometric Equations for Phytomass According to Pine, Spruce, Birch and Aspen Trees in European Russia. *Lesovedenie* = Forestry Science, 1996, no. 6, pp. 36–46. (In Russ.).

14. Феклистов П.А., Тюрикова Т.В., Аверина М.В. Роль типов леса в смене пород на старопашотных землях Кенозерского национального парка // *Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн.* 2016. Т. 20, № 6. С. 39–43.

Feklistov P.A., Tyurikova T.V., Averina M.V. The Role of Forest Types in the Change of Species in the Old-Fallow Lands of Kenozersky National Park. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 6, pp. 39–43. (In Russ.).

15. Яковлев А.А. Влияние почвенных условий на формирование растительных сообществ на постагрогенных и лесных землях (на примере Ленинградской области): дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2024. 354 с.

Yakovlev A.A. *Influence of Soil Conditions on the Formation of Plant Communities on Postagrogenic and Forest Lands (on the Example of the Leningrad Region)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2024. 354 p. (In Russ.).

16. Danilov D.A., Shestakova T.A., Shestakova V.I., Anders O.O., Ivanov A.A. The Effect of Living Ground Cover on the Development of the Young Generation of Tree Species on Post-Agrogenic Lands of the Boreal Zone. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 574, no. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012015>

17. Domke G.M., Woodall C.W., Smith J.E., Westfall J.A., McRoberts R.E. Consequences of Alternative Tree-Level Biomass Estimation Procedures on U.S. Forest Carbon Stock Estimates. *Forest Ecology and Management*, 2012. vol. 270, pp. 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.022>

18. Gradinaru S.R., Kienast F., Psomas A. Using Multi-Seasonal Landsat Imagery for Rapid Identification of Abandoned Land in Areas Affected by Urban Sprawl. *Ecological Indicators*, 2019, no. 96, pp. 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.022>
19. Kukuls I., Klavins M., Nikodemus O., Kasparinskis R., Brumelis G. Changes in Soil Organic Matter and Soil Humic Substances Following the Afforestation of Former Agricultural Lands in the Boreal-Nemoral Ecotone (Latvia). *Geoderma Regional*, 2019, no. 16, pp. e00213. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00213>
20. Mahajan V., Choudhary P., Raina N.S., Sharma P. Carbon Sequestration Potential of Trees in Arable Land-use and Allometric Modelling for Dominant Tree Species in Sub-Tropics of Jammu and Kashmir. *Journal of Environmental Biology*, 2021, no. 42(2), pp. 414–419. [https://doi.org/10.22438/jeb/42/2\(SI\)/SI-245](https://doi.org/10.22438/jeb/42/2(SI)/SI-245)
21. Marklund L.G. *Biomass Functions for Pine, Spruce and Birch in Sweden*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey, 1988, rep. 45, p. 73. (In Swed.).
22. Nogueira F.C.B., Dobe E.K., Silva Filho J.B., Rodrigues L.S. Allometric Equations to Estimate Aboveground Biomass of Dalbergia Cearensis Species in the Brazilian Seasonally Dry Tropical Forest. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 484, pp. 118920. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118920>
23. Ovsepyan L., Kurganova L., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Recovery of Organic Matter and Microbial Biomass After Abandonment of Degraded Agricultural Soils: The Influence of Climate. *Land Degradation and Development*, 2019, no. 30, pp. 1861–1874. <https://doi.org/10.1002/ldr.3387>
24. Pothong T., Elliott S., Chairuang Sri S., Chanthorn W., Shannon D., Wangpakapattanawong P. New Allometric Equations for Quantifying Tree Biomass And Carbon Sequestration in Seasonally Dry Secondary Forest in Northern Thailand. *New Forests*, 2022, no. 53, pp. 17–36. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09844-3>
25. Segura C., Navarro F.B., Jiménez M.N., Fernández-Ondoño E. Implications of Afforestation Vs. Secondary Succession for Soil Properties Under a Semiarid Climate. *Science of The Total Environment*, 2020, no. 704, pp. 135391. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135393>
26. Tabacchi G., Di Cosmo L., Gasparini P. Aboveground Tree Volume and Phytomass Prediction Equations for Forest Species in Italy. *European Journal of Forest Research*, 2011, no. 130(6), pp. 911–934. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0481-9>
27. Volkova I., Solodunov A., Kondratenko L. Composition and Structure of Regrowth Forests on Abandoned Agricultural Land. *Journal of Forest Science*, 2020, no. 66, pp. 436–442. <https://doi.org/10.17221/100/2020-JFS>
28. Zethof J.H.T., Cammeraat E.L.H., Nadal-Romero E. The Enhancing Effect of Afforestation Over Secondary Succession on Soil Quality Under Semiarid Climate Conditions. *Science of the Total Environment*, 2019, no. 652, pp. 1090–1101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.235>

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