 © Авторы статьи / Authors of the article

ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ, ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ/FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY, LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.11 EDN: BPTHRL

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЯДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ ПО ДИАМЕТРУ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТВЕННИЦЫ СУКАЧЕВА В АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Научная статья

Богданов А.П.[1,] *, Коптев С.В.[2], Третьяков С.В.[3], Жданов В.В.[4], Парамонов А.А.[5]

[1] ORCID : 0000-0002-1655-7212;

[2] ORCID : 0000-0002-5402-1953;

[3] ORCID : 0000-0001-5982-3114;

[4] ORCID : 0009-0006-9575-325X;

[5] ORCID : 0000-0002-0961-221X;

[1, 2, 3, 4, 5] Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Архангельск, Российская Федерация

[1, 2, 3, 4] Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (a.p.bogdanov[at]sevniilh-arh.ru)

Предложена: 06.08.2026; Принята: 18.08.2026; Опубликована: 18.09.2026

Аннотация

Лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.*)* является одной из лесообразующих пород Архангельской области. Изучение распределения деревьев по диаметру имеет важное значение для оценки товарной структуры и повышения надежности стоимостной оценки древостоев, особенностей формирования и устойчивости региональных популяций в условиях Европейского Севера России. На основе материалов 23 пробных площадей, заложенных в смешанных лиственнично-сосновых и лиственнично-еловых насаждениях, построены теоретические ряды распределения стволов по 2-сантиметровым ступеням толщины в диапазоне средних диаметров древостоев 8–48 см.

Для аппроксимации эмпирических рядов использована трёхпараметрическая функция Вейбулла, характеризуемая параметрами формы, масштаба и сдвига. Параметры теоретического распределения определялись методом максимального правдоподобия. Для исследуемых древостоев вычислены показатели описательной статистики для таксационного диаметра, а именно среднее значение, среднее квадратичное отклонение, асимметрия и эксцесс, а также проведен регрессионный анализ. Получены линейные уравнения зависимости параметров функции Вейбулла от среднеквадратического диаметра с коэффициентом детерминации (R^2 = 0,88; 0,98; 0,77).

Для оценки точности сходства теоретических и фактических рядов распределения рассчитаны среднеквадратическая ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя систематическая ошибка (MBE), а также критерий Пирсона (χ^2) с определением уровня статистической значимости (*p*-value). Проведенная оценка параметров соответствия теоретических и эмпирических данных (RMSE, MAE и MBE) показала высокую степень соответствия теоретических и эмпирических распределений и невысокой величине ошибок. Статистическая проверка по критерию Пирсона показала, что в 56,5% случаев (13 из 23) модель не отвергается на 5% уровне значимости ($p > 0,05$). Высокие значения χ^2 обусловлены главным образом локальными отклонениями в крайних ступенях толщины, что характерно для древостоев со сложной возрастной структурой. Что говорит о том, что полученные результаты характеризуют особенности дифференциации деревьев по диаметру в лиственничных насаждениях Архангельской области и могут быть использованы для моделирования товарной структуры лиственничных древостоев на Европейском Севере России.

Ключевые слова: лиственница Сукачева (Larix sukaczewii), Архангельская область, ряды распределения, структура древостоев, диаметры, регрессионное моделирование, трехпараметрическое распределение Вейбулла.

MODELLING THE DISTRIBUTION OF TREES BY DIAMETER ON THE EXAMPLE OF SUKACHEV'S LARCH IN ARKHANGELSK OBLAST

Research article

Bogdanov A.P.[1,] *, Koptev S.V.[2], Tretyakov S.V.[3], Zhdanov V.V.[4], Paramonov A.A.[5]

[1] ORCID : 0000-0002-1655-7212;

[2] ORCID : 0000-0002-5402-1953;

[3] ORCID : 0000-0001-5982-3114;

[4] ORCID : 0009-0006-9575-325X;

[5] ORCID : 0000-0002-0961-221X;

[1, 2, 3, 4, 5] Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russian Federation

[1, 2, 3, 4] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

* Corresponding author (a.p.bogdanov[at]sevniilh-arh.ru)

Suggested: 06.08.2026; Accepted: 18.08.2026; Published: 18.09.2026

Abstract

 © Авторы статьи / Authors of the article

Sukaczew's larch (*Larix sukaczewii* Dyl.) is one of the forest-forming species in Arkhangelsk Oblast. Studying the distribution of trees by diameter is of great importance for assessing the commercial structure and improving the reliability of stand valuation, as well as for understanding the traits of the formation and stability of regional populations in the conditions of the European North of Russia. Based on data from 23 sample plots established in mixed larch–pine and larch–spruce stands, theoretical distribution curves for tree trunks have been constructed in 2-centimetre thickness intervals within the range of average stand diameters of 8–48 cm.

A three-parameter Weibull function, characterised by the shape, scale and shift parameters, was used to approximate the empirical data series. The parameters of the theoretical distribution were determined using the maximum likelihood method. For the studied tree stands, descriptive statistics were calculated for the assessment diameter, namely the mean, standard deviation, skewness and kurtosis, and a regression analysis was carried out. Linear equations were obtained showing the relationship between the parameters of the Weibull function and the root-mean-square diameter, with coefficients of determination (R^2 = 0.88; 0.98; 0.77).

To evaluate the accuracy of the agreement between the theoretical and empirical distribution series, the root-mean-square error (RMSE), mean absolute error (MAE), mean bias error (MBE) and Pearson's chi-squared test (χ^2) were calculated, with the level of statistical significance (p-value) determined. The assessment of the parameters of agreement between the theoretical and empirical data (RMSE, MAE and MBE) revealed a high degree of agreement between the theoretical and empirical distributions and low error values. A statistical test using the Pearson's χ^2 criterion showed that in 56.5% of cases (13 out of 23), the model was not rejected at the 5% significance level ($p > 0.05$). The high χ^2 values are mainly due to local deviations at the extreme ends of the diameter distribution, which is characteristic of stands with a complex age structure. This suggests that the obtained results characterise the patterns of tree differentiation by diameter in larch stands in Arkhangelsk Oblast and can be used to model the commercial structure of larch stands in the European North of Russia.

Keywords: Sukaczew's larch (Larix sukaczewii), Arkhangelsk Oblast, distribution ranges, stand structure, diameters, regression modelling, Weibull three-parameter distribution.

Введение

В справочной литературе приведены данные о рядах распределения по 4-сантиметровым ступеням толщины лиственницы в диапазоне средних диаметров 20–40 см. [1], [2]. Однако они не позволяют в полной мере описать структуру древостоев за пределами данного диапазона. Результаты стационарных исследований показывают, что структура древостоев может изменяться с течением времени по мере роста и развития насаждения [3]. Моделирование рядов распределения по ступеням толщины с применением современных методов статистического анализа является актуальной задачей в лесной таксации [4], [5].

Распределение числа деревьев по ступеням толщины определяется биологическими особенностями породы, внутривидовой и межвидовой конкуренцией, условиями местопроизрастания и другими факторами внешней и внутренней среды [6]. Функции, описывающие распределение числа деревьев по ступеням толщины не являются универсальными и могут быть найдены в результате выявления особенностей структуры древостоев [4], [7].

При выборе модели, описывающей распределение по ступеням толщины, должны учитываться особенности сукцессионного развития древостоев [5], [8]. В настоящее время применяются различные уравнения для моделирования структуры древостоев с приемлемой точностью, однако эффективность отдельных моделей может снижаться при их применении к выборкам, различающимся по возрасту, составу и диапазону средних диаметров. Для хозяйственных задач необходимы модели, наилучшим образом аппроксимирующие эмпирические данные для унификации рядов распределения. Применение единого типа уравнений является основой автоматизированной обработки и последующего статистического анализа [4].

Знание структуры насаждений важно для моделирования процессов роста, а также обоснования лесохозяйственных мероприятий. Полученные данные могут быть использованы при разработке подходов к формированию устойчивых древостоев с преобладанием лиственницы в условиях северной границы ее естественного распространения в Европейской части России, доля которой снижается и в настоящее время составляет менее 1% от покрытой лесом площади. Выбор единой функции для описания структуры древостоев представляет собой методический подход, реализованный в ряде исследований. Так, обоснованность использования обобщенного нормального распределения (ряда Грама-Шарлье) подтверждена в работах [4], [9], [10]. Согласно методическим подходам, изложенным в работах В.Ф. Багинского [11] для пород с долей участия менее 1% допускается снижение точности расчетов, что позволяет сократить объем полевых работ и количество пробных площадей без потери приемлемой точности таблиц.

Однако в нашем случае высокая вариабельность диаметров лиственницы и ограниченный объём выборки не позволили получить параметры для построения ряда Грама–Шарлье с приемлемой точностью. В связи с этим для построения рядов распределения деревьев по ступеням толщины использована функция Вейбулла, широко применяемая для аппроксимации эмпирических распределений диаметров деревьев по данным ограниченного объёма выборки [7], [12]. В настоящем исследовании использована трёхпараметрическая функция Вейбулла, включающая параметры формы, масштаба и сдвига. Параметр сдвига позволяет учитывать положение нижней границы распределения и более гибко описывать эмпирические ряды при различной форме распределения диаметров, в том числе при положительной и отрицательной асимметрии [13], [14].

Целью работы является выявление закономерностей распределения деревьев по ступеням толщины и разработка модели структуры древостоев лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) в смешанных насаждениях на территории Архангельской области.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Методы и принципы исследования

Для объективной оценки региональных особенностей формирования и строения насаждений необходима достоверная и репрезентативная исходная информация. Всего в работе использованы ряды распределения лиственницы, полученные на 23 пробных площадях, заложенных в смешанных лиственнично-сосновых и лиственнично-еловых насаждениях на территории Архангельской области. Использованы как собственные результаты полевых работ, так и архивные данные, собранные под руководством преподавателей с участием студентов Архангельского лесотехнического института / Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова (САФУ). В основе сбора и обработки исходных данных лежат общепринятые в лесной таксации методы.

Использованы стандартные пакеты статистических компьютерных программ и общепринятые методы в лесной таксации и лесоводства с учетом ОСТ 56-69-83. На каждой пробной площади определены состав, средняя высота, среднеквадратический диаметр, возраст, класс бонитета, относительная и абсолютная полнота, запас древостоя и сухостоя, а также построены ряды распределения деревьев по 2-сантиметровым ступеням толщины.

Выборка включает древостои возрастом 15–280 лет, со среднеквадратическим диаметром 3,2–46,9 см. Изучаемые древостои относятся к Ia–IV классам бонитета, а доля лиственницы составляет от 3 до 9 единиц доли в составе. Все пробные площади заложены в насаждениях, относящихся к черничной группе типов лесорастительных условий северной и средней тайги [15].

Первичная обработка полевых материалов выполнена в Microsoft Excel. На основе перечётных ведомостей для каждой пробной площади сформированы вариационные ряды по ступеням толщины, а также найден среднеквадратический диаметр древостоя. Статистический анализ выполнен в программе Statistica с использованием стандартных показателей вариационных рядов (среднее квадратичное отклонение (σ), коэффициента изменчивости (C), асимметрии (α1) и эксцесса (j) [16].

Для аппроксимации эмпирических распределений деревьев по ступеням толщины были отобраны наиболее распространённые модели, сгруппированные по семействам согласно классификации О. А. Атрощенко (1989) [8]:

1. Параметрические законы распределения (нормальное, гамма-, бета-, Вейбулла, логнормальное) [5], [8].
2. Ряды на основе нормального распределения (ряд Грама-Шарлье) [4], [9].
3. Обобщённые гибкие системы (кривые Пирсона, распределения Джонсона) [7].

Широкое распространение получили также ряды распределения по естественным ступеням толщины [17].

Для каждой пробной площади первоначально задавался параметр сдвига (γ) [14], который принимался равным половине минимального диаметра деревьев в выборке (γ=0,5Dmin). После определения параметра сдвига для каждого дерева рассчитывали преобразованный диаметр с учетом полученного значения (1).

$$xi = Di - \gamma \quad (1)$$

где, (Di) — исходный диаметр дерева, см;

xi — преобразованный диаметр, см.

По полученному ряду преобразованных диаметров параметры формы (k) и масштаба (λ) определялись методом максимального правдоподобия с использованием онлайн-калькулятора [18]. Полученные для каждой пробной площади значения параметров γ, k и λ были сопоставлены со среднеквадратическим диаметром древостоя, после чего методом линейной регрессии получены уравнения, позволяющие рассчитывать параметры трёхпараметрической функции Вейбулла по среднеквадратическому диаметру древостоя.

Расчёт теоретического распределения числа стволов по ступеням толщины выполнялся в Microsoft Excel с использованием встроенной статистической функции ВЕЙБУЛЛ.РАСП. Для каждого значения среднеквадратического диаметра $D_{ср}$ рассчитывались параметры формы (k), масштаба (λ) и сдвига (γ) для. На их основе для каждой ступени толщины рассчитывалась теоретическая доля деревьев (%) с учетом параметра сдвига [14].

Для оценки соответствия теоретических рядов распределений эмпирическим данным использован критерий согласия Пирсона (χ^2) с определением уровня статистической значимости (p-value) [5], [14]. Качество аппроксимации оценивали по среднеквадратической ошибке (RMSE), средней абсолютной ошибке (MAE) и средней смещения ошибок (MBE) [5], [14].

Основные результаты

Таксационные характеристики 23 пробных площадей, а также основные статистические показатели эмпирических распределений диаметров представлены в таблице 1.

© Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 1 - Таксационные характеристики пробных площадей, а также основные статистические показатели эмпирических распределений диаметров лиственницы

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.11.1

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
1	III	8Лц2Е+Б	240	24,9	46,9 ± 1,2	12,3	0,80	1,81	27,0	0,67	223
2	III	5Лц2С2Е1Бед Ос	180	25,2	44 ± 1,2	10,3	0,24	0,16	23,4	0,91	453

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
3	II	3С2Лц 4Б1Е	50	16,2	13,3 ± 0,8	6,65	1,48	3,43	50,0	1,02	211
4	Iа	4Лц4Е2С + Б	201	35,6	47,1 ± 1,1	9,97	-0,10	1,19	21,2	0,93	514
5	III	5Лц5Е+Б ед Ос	230	24,9	33,2 ± 1,2	9,20	0,15	-0,49	27,7	0,85	279

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
6	III	6Лц3Е1Б	210	26,1	43 ± 2,0	13,4	-0,92	-0,03	31,2	0,96	384
7	IV	7Лц2Е1Б	280	22,8	33,7 ± 1,3	9,83	0,13	-0,53	29,2	0,81	280
8	III	8Лц1Е1С+Б	280	26,6	37,4 ± 1,1	8,27	0,15	-0,75	22,1	1,0	372

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
9	III	4С3Лц 2Б1Е	55	15,1	15,4 ± 0,8	8,06	0,85	-0,13	52,2	1,0	196
10	II	3С2ЛцЗБ2Е	61	19,5	17,8 ± 0,9	8,74	0,69	-0,67	49,1	0,9	244
11	II	3ЛцЗС2Б1Е	68	20,7	19,9 ± 1,0	8,65	0,72	-0,28	43,4	0,88	283

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
12	II	6С4Лц+Б, Е	48	16	14,6 ± 0,7	5,57	0,65	-0,17	38,2	1,0	207
13	III	5С4Лц1Е+Е	60	15,2	14,9 ± 0,8	7,29	0,79	0,21	49,0	1,27	293
14	III	8Лц1Е1Б+С	85	21,8	29 ± 1,2	10,8	-0,05	-1,12	37,1	0,97	338

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
15	III	8Лц1Е1Б едС	83	19,6	24,4 ± 0,8	8,74	0,51	0,30	35,8	1,00	310
16	III	8Лц1Е1Б едС	85	21,3	27,7 ± 0,9	9,25	0,04	-0,18	33,3	1,00	338
17	III	9Лц1Е+Б	85	19,2	23,8 ± 0,6	7,88	0,31	-0,48	33,2	1,20	371

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	σ	α_1	j	C, %		
18	III	9Лц1Б+Е	84	20,6	22,8 ± 0,8	8,13	0,45	-0,52	35,7	1,11	370
19	II	5Лц2С2Б1Е	45	15,6	15,1 ± 1,0	8,94	2,05	5,15	59,1	0,63	145
20	III	6Лц2Е2Б ед С, Ос	15	4,2	4,3 ± 0,22	2,73	1,04	0,18	62,9	0,48	15

© Авторы статьи / Authors of the article

№	Бонитет	Состав	Средние			Статистические показатели вариационного ряда по диаметру				Относительная полнота	Запас $м^3$/га
			А, лет	Н, м	D±m, см	*σ*	α_1	*j*	*C, %*		
21	III	7Лц1С1Е1Б ед Ос	50	13,7	12,9 ± 0,5	4,52	1,00	0,97	35,1	1,13	223
22	I	6Лц4С+Е	20	8,8	9 ± 0,6	7,30	3,83	15,72	80,8	0,05	17
23	III	7С3Лц ед. Е, Б	15	3,6	3,2 ± 0,2	1,78	1,33	2,31	55,1	0,5	22

Примечание: А – возраст, лет; Н – высота, м; D ±m – Диаметр ± ошибка среднего, см; σ – среднее квадратичное отклонение, см, α_1 – асимметрия, j – эксцесс, С – коэффициент изменчивости, %

 © Авторы статьи / Authors of the article

Анализ данных (см табл. 1) показал, что с увеличением среднего диаметра древостоя наблюдается рост среднего квадратичного отклонения диаметров. Минимальное значение (1,8 см) зафиксировано в тонкомерных древостоях, тогда как в отдельных спелых и перестойных насаждениях оно достигает 13,4 см. Данное наблюдение свидетельствует об увеличении абсолютной дифференциации деревьев по диаметру в процессе роста и развития древостоя. При этом отдельные деревья достигают значительно больших размеров, тогда как часть деревьев замедляет рост и отмирает. В то же время коэффициент изменчивости в большинстве случаев снижается с увеличением среднего диаметра от 55–80% в молодых насаждениях до 20–31% в большинстве спелых и перестойных насаждений. Это указывает на то, что, несмотря на возрастание абсолютного разброса диаметров, относительная изменчивость диаметров с увеличением среднего диаметра снижается. Выявленная закономерность может быть связана с естественной дифференциацией деревьев и отпадов части деревьев из тонкомерных ступеней в процессе роста, в результате чего в древостое постепенно возрастает доля деревьев, достигших параметров основного яруса насаждения.

Для совокупности пробных площадей и рассчитанных значений параметров формы (*k)*, масштаба (λ) и сдвига (γ) проведён регрессионный анализ их зависимости от среднеквадратического диаметра древостоя $D_{ср}$. В результате получены следующие линейные уравнения, приведенные в формулах (2–4).

(2)

(3)

(4)

где $D_{ср}$ — среднеквадратический диаметр древостоя, см.

Полученные значения коэффициентов детерминации характеризуют тесноту линейной зависимости параметров функции Вейбулла от среднеквадратического диаметра древостоя. Полученные зависимости позволили рассчитать параметры трехпараметрической функции Вейбулла в диапазоне средних диаметров от 8 до 46 см, соответствующем исследуемой выборке.

Результаты расчёта теоретических рядов распределения для исследуемого диапазона средних диаметров представлены на рисунке 1 и в таблице 2.

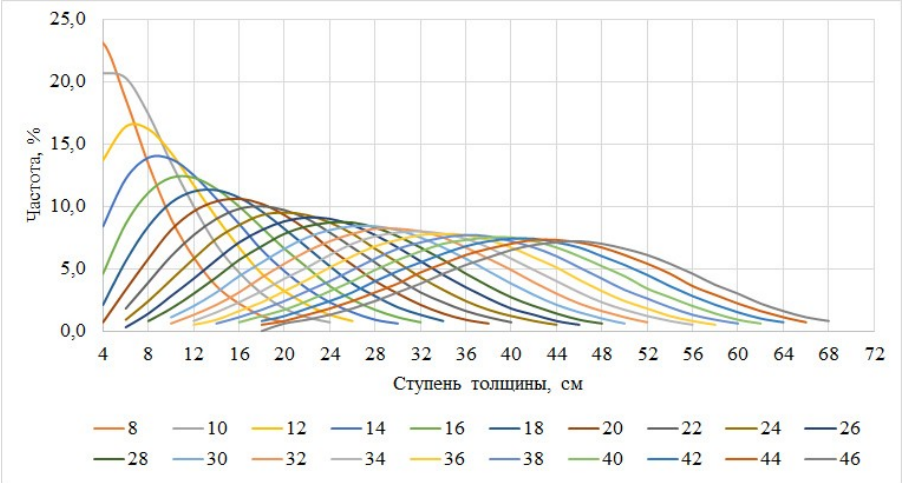

Рисунок 1 - Распределение деревьев по ступеням толщины
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.11.2

Статистические параметры соответствия теоретических и экспериментальных рядов распределения приведены в таблице 2.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 2 - Статистические параметры соответствия теоретических и экспериментальных рядов распределения лиственницы Сукачева

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.11.3

Номер пробной площади	RMSE, %	MAE, %	MBE, %	Критерий Пирсона (χ^2)	p-value
1	2,2	1,5	0,1	20,0	0,051
2	1,3	0,8	0,0	6,0	0,46
3	5,4	2,5	0,3	87,0	0,0001
4	2,1	1,3	0,0	13,0	0,280
5	1,3	0,9	0,0	7,0	0,65
6	2,5	1,9	0,0	32,0	0,0001
7	1,7	1,1	0,0	1,0	0,91
8	1,9	1,2	0,0	16,0	0,01
9	1,5	0,8	0,1	41,0	0,0001
10	3,1	1,5	-0,1	32,0	0,0001
11	2,1	1,2	-0,1	21,0	0,08
12	2,1	1,0	-0,2	20,0	0,06
13	2,7	1,7	0,0	37,0	0,001
14	2,2	1,1	0,0	19,0	0,06
15	1,6	1,0	0,0	14,0	0,2
16	1,3	0,8	0,0	6,0	0,73
17	1,5	0,9	0,0	8,0	0,40
18	1,6	0,9	0,2	59,0	0,0001
19	2,8	1,4	-0,1	32,0	0,0001
20	1,1	0,3	-0,3	16,0	0,06
21	2,6	1,0	-0,7	52,0	0,0001
22	1,6	0,8	0,6	46,0	0,0001
23	0,6	0,1	-0,1	7,0	0,06

Примечание: RMSE – квадратный корень из среднеквадратической ошибки; MAE– средняя абсолютная ошибка; MBE – среднее смещение ошибок

Согласно рисунку 1 и таблицы 1, наблюдается изменение асимметрии распределения деревьев по ступеням толщины от преимущественно положительной в древостоях с низкими средними диаметрами до нулевой и отрицательной в спелых и перестойных древостоях с высокими средними диаметрами. Положительная асимметрия характеризует преобладание деревьев с диаметром меньше среднего при наличии отдельных более крупных деревьев. По мере роста древостоя и уменьшения доли тонкомерных деревьев распределение становится более симметричным, а в отдельных случаях приобретает отрицательную асимметрию.

Качество аппроксимации оценивалось по показателям RMSE, MAE, MBE и критерию Пирсона (χ^2) (см табл. 2). Статистически значимые различия между фактическими и теоретическими рядами распределений выявлено в 10 из 23 случаев ($p<0,05$). Необходимо отметить, что характер дифференциации деревьев и формирование ценотической структуры в спелых и перестойных древостоях могут существенно различаться в зависимости от условий произрастания, истории формирования и воздействия внешних факторов. Согласно литературным данным, немаловажную роль в сохранении лиственницы играют пожары различной интенсивности и давности [19]. На северной границе распространения в условиях более сурового климата структура древостоев может отличаться сложностью, что связано с высокой продолжительностью жизни деревьев, периодическим воздействием лесных пожаров и формированием нескольких поколений. В более благоприятных условиях средней части Архангельской области, в частности в Плесецком и Обозерском лесничествах, при отсутствии пополнения деревьями последующих генераций происходит увеличение толщины деревьев и, соответственно, среднего диаметра древостоя, что проявляется в отрицательной асимметрии. С этим может быть связаны различия, выявленные между фактическими и теоретическими рядами распределения по критерию Пирсона.

Таким образом, характер распределения деревьев по ступеням толщины отражает не только возраст древостоя, но и влияние конкуренции, естественного отпада, условий произрастания и истории формирования насаждений.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Заключение

Для моделирования распределения деревьев лиственницы Сукачева по ступеням толщины в смешанных древостоях разного возраста, произрастающих в северной и средней подзоне тайги в Архангельской области применена трехпараметрическая функция Вейбулла. На основе 23 пробных площадей получены эмпирические и теоретические ряды распределения по 2-сантиметровым ступеням толщины в диапазоне средних диаметров 8–48 см.

Установлено, что с увеличением среднего диаметра древостоя среднее квадратичное отклонение диаметров возрастает, что свидетельствует об увеличении абсолютной изменчивости диаметров и усилении дифференциации деревьев в процессе роста. В то же время происходит уменьшение относительной изменчивости диаметров, что указывает на понижение их коэффициента изменчивости.

Выявлено изменение характера распределения деревьев по толщине от выраженной положительной асимметрии в молодняках к близкой к нулю и отрицательной в спелых и перестойных насаждениях. Данная закономерность отражает изменение возрастной и размерной структуры древостоев в процессе развития и роста. Различия в структуре могут быть связаны с условиями произрастания, конкуренцией, естественным отпадом и историей формирования насаждений.

Согласно статистическим параметрам соответствия теоретических и экспериментальных рядов распределения для большинства рядов распределения лиственницы Сукачева в смешанных насаждениях региона значения среднеквадратической и средней абсолютной ошибок не превышает 5,4% и 2,5% соответственно, а ошибка смещения близка к нулю, что свидетельствует об отсутствии систематического смещения модельных распределений относительно фактических измерений.

Для оценки меры совпадения фактического и теоретического вариационных рядов рассчитан критерий Пирсона. Установлено, что на 5%-м уровне значимости (p>0,05) модель не отвергается для 13 рядов распределения (56,5% случаев). В остальных рядах модель статистически значимо отличается от эмпирических данных. Это в первую очередь связано с высокой вариабельностью распределения в молодняках, а также в перестойных древостоях с наличием нескольких возрастных поколений, что подтверждает низкие значения ошибок.

Результаты исследования показали, что трёхпараметрическая функция Вейбулла с параметрами, рассчитанными на основе среднеквадратического диаметра, может быть эффективно использована для моделирования рядов распределения деревьев по ступеням толщины в лиственничных древостоях Архангельской области. Данный подход может быть использован для автоматизированного моделирования рядов распределения, оценки товарной структуры, повышения надежности стоимостной оценки, а также планирования лесохозяйственных мероприятий.

Финансирование

Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства по теме 4-И26 товарность «Совершенствование системы нормативов оценки сортиментной и товарной структуры древостоев для таежной зоны северо-востока Европейской части России». Регистрационный номер темы: 126022417892-4.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Ильина В.Н., Самарский государственный социально-педагогический университет, Самара Российская Федерация

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.11.4

Funding

The publication is based on the results of research carried out within the framework of the state assignment to the FBI "NRIF" for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Agency for Forestry, on topic 4-I26, “Improvement of the system of standards for assessing the assortment and commercial structure of tree stands for the taiga zone of the northeastern part of the European part of Russia.” Registration number of the topic: 126022417892-4.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Iliyna V.N., Samara State University of Social Sciences and Education, Samara Russian Federation

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.11.4

Список литературы / References

1. Войнов Г.С. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Г.С. Войнов, Н.П. Чупров, С.В. Ярославцев и др. — Архангельск: Правда Севера, 2012. — 672 с.

2. Калинин В.И. Лиственница Европейского Севера / В.И. Калинин. — Архангельск: Лесная промышленность, 1965. — 91 с.

3. Богданов А.П. Закономерности строения и динамика старовозрастных лиственнично-сосновых древостоев по результатам стационарных исследований в Архангельской области / А.П. Богданов, С.В. Третьяков, С.В. Коптев и др. // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. — 2024. — 3. — С. 20–29. — DOI: 10.17076/eco1751

4. Черных В.Л. Унифицированный алгоритм расчёта товарной и сортиментной структуры запаса древостоев / В.Л. Черных, Л.В. Черных, Д.В. Черных // Вестник ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. — 2020. — 2(46). — С. 27–45. — DOI: 10.25686/2306-2827.2020.2.27

5. Дубенок Н.Н. Оценка статистических моделей распределения деревьев по диаметру в культурах сосны / Н.Н. Дубенок, А.В. Лебедев, В.В. Кузьмичев // Лесохозяйственная информация. — 2022. — 1. — С. 50–61. — DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.03

 © Авторы статьи / Authors of the article

6. Василенко Н.А. Динамика строения древостоев смешанных лесов юга Дальнего Востока / Н.А. Василенко // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН. — 2009. — 3. — С. 78–86.

7. Gorgoso J.J. Modelling diameter distributions of Betula alba L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function / J.J. Gorgoso, J.G. Álvarez González, A. Rojo et al. // Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. — 2007. — 16(2). — P. 113–123. — DOI: 10.5424/srf/2007162-01002

8. Атрощенко О.А. Система моделирования строения древостоев по диаметру / О.А. Атрощенко // Лесной журнал. — 1989. — 2. — С. 3–7.

9. Багинский В.Ф. Особенности методики составления современных товарных таблиц для древостоев Беларуси / В.Ф. Багинский, Н.Н. Катков, Е.А. Усс // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. — 2018. — 6(111). — С. 5–9.

10. Мошкалев А.Г. Таксация товарной структуры древостоев / А.Г. Мошкалев, А.А. Книзе, Н.И. Ксенофонтов и др. — Москва: Лесная промышленность, 1982. — 160 с.

11. Багинский В.Ф. Разработка новых сортиментных таблиц для лесов Республики Беларусь / В.Ф. Багинский, Ф.Ф. Бурак, Н.К. Крук // Лесная таксация и лесоустройство. — 2008. — 1(39). — С. 24–30.

12. Güner Ş.T. Diameter distributions in Pinus sylvestris L. stands: evaluating modelling approaches including a machine learning technique / Ş.T. Güner, M.J. Diamantopoulou, R. Özçelik // Journal of Forestry Research. — 2023. — 34. — P. 1829–1842. — DOI: 10.1007/s11676-023-01625-2

13. Лебедев А.В. Моделирование рядов распределения деревьев ели в поврежденных короедом-типографом древостоях Подмосковья / А.В. Лебедев, Д.Ю. Гостева // Лесной вестник. — 2026. — 30(3). — С. 5–16. — DOI: 10.17816/2542-1468-2026-3-5-16

14. Лебедев А.В. Обобщенная модель распределения диаметров деревьев в сосновых древостоях / А.В. Лебедев // Лесной вестник. — 2022. — 26(4). — С. 53–62. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-53-62

15. Курнаев Л.Ф. Лесорастительное районирование СССР / Л.Ф. Курнаев. — Москва: Лесная промышленность, 1973. — 240 с.

16. Гусев И.И. Моделирование экосистем: учебное пособие / И.И. Гусев. — Архангельск: АГТУ, 2002. — 112 с.

17. Машковский В.П. Усредненные ряды распределения диаметров стволов по естественным ступеням толщины с учетом категорий технической годности деревьев и методика их использования для товаризации расчетной лесосеки / В.П. Машковский // Труды БГТУ. Лесное хозяйство. — 2016. — 1(183) . — С. 9–13.

18. Wessa P. Maximum-likelihood Weibull Distribution Fitting (v1.0.3) in Free Statistics Software (v1.2.1 (new version)) / P. Wessa // Office for Research Development and Education. — 2013. — URL: http://www.wessa.net/rwasp_fitdistrweibull.wasp/. (дата обращения: 11.05.26)

19. Дылис Н.В. Лиственница / Н.В. Дылис. — Москва: Лесная промышленность, 1981. — 96 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vojnov G.S. Lesotaksacionny'j spravochnik po severo-vostoku evropejskoj chasti Rossijskoj federacii (normativny'e materialy' dlya Neneczkogo avtonomnogo okruga, Arxangel'skoj, Vologodskoj oblastej i Respubliki Komi) [Forest Inventory Reference Book for the North-East of the European Part of the Russian Federation (Regulatory Materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk, Vologda Regions, and the Komi Republic)] / G.S. Vojnov, N.P. Chuprov, S.V. Yaroslavcev et al. — Arxangel'sk: Pravda Severa, 2012. — 672 p. [in Russian]

2. Kalinin V.I. Listvennicza Evropejskogo Severa [Larch of the European North] / V.I. Kalinin. — Arxangel'sk: Lesnaya promy'shlennost', 1965. — 91 p. [in Russian]

3. Bogdanov A.P. Zakonomernosti stroeniya i dinamika starovozrastny'x listvennichno-sosnovy'x drevostoev po rezul'tatam stacionarny'x issledovanij v Arxangel'skoj oblasti [Patterns of structure and dynamics of old-growth larch-pine stands based on long-term research in the Arkhangelsk region] / A.P. Bogdanov, S.V. Tret'yakov, S.V. Koptev et al. // Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. — 2024. — 3. — P. 20–29. — DOI: 10.17076/eco1751 [in Russian]

4. Cherny'x V.L. Unificirovanny'j algoritm raschyota tovarnoj i sortimentnoj struktury' zapasa drevostoev [Unified Algorithm to Calculate the Commodity and Assortment Structure of the Growing Stock] / V.L. Cherny'x, L.V. Cherny'x, D.V. Cherny'x // Bulletin of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. — 2020. — 2(46). — P. 27–45. — DOI: 10.25686/2306-2827.2020.2.27 [in Russian]

5. Dubenok N.N. Ocenka statisticheskix modelej raspredeleniya derev'ev po diametru v kul'turax sosny' [Estimation of Statistical Models of Distribution of Diameters of Trees in Pine Plantations] / N.N. Dubenok, A.V. Lebedev, V.V. Kuz'michev // Forestry information. — 2022. — 1. — P. 50–61. — DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.03 [in Russian]

6. Vasilenko N.A. Dinamika stroeniya drevostoev smeshanny'x lesov yuga Dal'nego Vostoka [Dynamics of stand structure in mixed forests of the southern Far East] / N.A. Vasilenko // Botanical Garden Institute FEB RAS. — 2009. — 3. — P. 78–86. [in Russian]

7. Gorgoso J.J. Modelling diameter distributions of Betula alba L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function / J.J. Gorgoso, J.G. Álvarez González, A. Rojo et al. // Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. — 2007. — 16(2). — P. 113–123. — DOI: 10.5424/srf/2007162-01002

8. Atroshhenko O.A. Sistema modelirovaniya stroeniya drevostoev po diametru [A system for modeling the structure of tree stands by diameter] / O.A. Atroshhenko // Forest Journal. — 1989. — 2. — P. 3–7. [in Russian]

9. Baginskij V.F. Osobennosti metodiki sostavleniya sovremenny'x tovarny'x tablicz dlya drevostoev Belarusi [Features of the method of compiling modern commodity tables for forest stands of Belarus] / V.F. Baginskij, N.N. Katkov, E.A. Uss // Proceedings of Gomel State University named after F. Skoriny. — 2018. — 6(111). — P. 5–9. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

10. Moshkalev A.G. Taksaciya tovarnoj struktury' drevostoev [Taxation of the commodity structure of tree stands] / A.G. Moshkalev, A.A. Knize, N.I. Ksenofontov et al. — Moscow: Lesnaya promy'shlennost', 1982. — 160 p. [in Russian]

11. Baginskij V.F. Razrabotka novy'x sortimentny'x tablicz dlya lesov Respubliki Belarus' [The elaboration of new timber assortment tables for forests in the republic of Belarus] / V.F. Baginskij, F.F. Burak, N.K. Kruk // Forest inventory and forest planning. — 2008. — 1(39). — P. 24–30. [in Russian]

12. Güner Ş.T. Diameter distributions in Pinus sylvestris L. stands: evaluating modelling approaches including a machine learning technique / Ş.T. Güner, M.J. Diamantopoulou, R. Özçelik // Journal of Forestry Research. — 2023. — 34. — P. 1829–1842. — DOI: 10.1007/s11676-023-01625-2

13. Lebedev A.V. Modelirovanie ryadov raspredeleniya derev'ev eli v povrezhdenny'x koroedom-tipografom drevostoyax Podmoskov'ya [Modeling spruce trees distribution series in engraver-beetle-damaged forest stands in Moscow] / A.V. Lebedev, D.Yu. Gosteva // Forestry Bulletin. — 2026. — 30(3). — P. 5–16. — DOI: 10.17816/2542-1468-2026-3-5-16 [in Russian]

14. Lebedev A.V. Obobshhennaya model' raspredeleniya diametrov derev'ev v sosnovy'x drevostoyax [Generalized model of pine trees diameter distribution] / A.V. Lebedev // Forestry Bulletin. — 2022. — 26(4). — P. 53–62. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-53-62 [in Russian]

15. Kurnaev L.F. Lesorastitel'noe rajonirovanie SSSR [Forest-vegetation zoning of the USSR] / L.F. Kurnaev. — Moscow: Lesnaya promy'shlennost', 1973. — 240 p. [in Russian]

16. Gusev I.I. Modelirovanie e'kosistem: uchebnoe posobie [Modelling of Ecosystems: A Textbook] / I.I. Gusev. — Arxangel'sk: AGTU, 2002. — 112 p. [in Russian]

17. Mashkovskij V.P. Usrednenny'e ryady' raspredeleniya diametrov stvolov po estestvenny'm stupenyam tolshhiny' s uchetom kategorij texnicheskoj godnosti derev'ev i metodika ix ispol'zovaniya dlya tovarizacii raschetnoj lesoseki [Averaged stem diameter distribution series by natural diameter classes accounting for tree technical grades and their use for merchantability assessment of the planned cutting area] / V.P. Mashkovskij // Proceeedings of BSTU. Forestry. — 2016. — 1(183) . — P. 9–13. [in Russian]

18. Wessa P. Maximum-likelihood Weibull Distribution Fitting (v1.0.3) in Free Statistics Software (v1.2.1 (new version)) / P. Wessa // Office for Research Development and Education. — 2013. — URL: http://www.wessa.net/rwasp_fitdistrweibull.wasp/. (accessed: 11.05.26)

19. Dy'lis N.V. Listvennicza [Larch] / N.V. Dy'lis. — Moscow: Lesnaya promy'shlennost', 1981. — 96 p. [in Russian]