

Научная статья

УДК 630.521.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-42-57

### Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной

**А.К. Габделхаков**<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X),

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

**В.Ф. Коновалов**<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540),

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

**З.З. Рахматуллин**<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726),

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

**М.В. Мартынова**<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [G-4659-2018](https://orcid.org/0000-0002-8804-8425),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-8804-8425>

**И.И. Фазлутдинов**<sup>2</sup>, вед. специалист; *ResearcherID*: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752),

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

<sup>1</sup>Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34, г. Уфа, Россия, 450001; [aliya201199@mail.ru](mailto:aliya201199@mail.ru)<sup>✉</sup>, [vfkonovalov@bk.ru](mailto:vfkonovalov@bk.ru), [zagir1983@mail.ru](mailto:zagir1983@mail.ru), [maaarussia@mail.ru](mailto:maaarussia@mail.ru)

<sup>2</sup>Министерство лесного хозяйства Республики Башкортостан, ул. Ленина, д. 86, г. Уфа, Россия, 450006; [solnc2007@yandex.ru](mailto:solnc2007@yandex.ru)

Поступила в редакцию 19.06.23 / Одобрена после рецензирования 11.09.23 / Принята к печати 13.09.23

**Аннотация.** Информация о распределении деревьев по ступеням толщины в древостоях необходима для планирования выборочных рубок и формирования экологически устойчивых и экономически ценных насаждений. Целью данной статьи является характеристика и сравнение структурного разнообразия распределения диаметров деревьев смешанных одно- и двухвозрастных древостоев *Tilia cordata* Mill., произрастающих в условиях Архангельского лесничества Республики Башкортостан. По данным 25 временных пробных площадей кластерным анализом и методом визуализации по эмпирическим данным распределений диаметров деревьев выделено 4 унимодальных структурных типа распределений и нисходящий (обратной J-образной формы). Среди исследованных двухвозрастных древостоев распределения древостоев по диаметрам на высоте груди с 2 пиками (бимодальность) не наблюдается. Установлено, что коэффициенты вариации диаметров устойчиво снижаются с возрастом древостоя (коэффициент корреляции Пирсона  $r = -0,57$  при  $p = 0,003$ ) и увеличением доли участия липы в его составе ( $r = -0,71$  при  $p < 0,001$ ), а ряды распределения характеризуются правосторонней асимметрией. Разнообразие размеров деревьев оценивалось на основе данных о площадях поперечного сечения с использованием индексов Шеннона, Симпсона, Джини и Сийпилехто. Сравнение индексов Шеннона и Симпсона показало, что структурное разнообразие диаметров деревьев было более сложным в двухвозрастных лесах по сравнению с одновозрастными. Оба индекса обеспечили четкое деление исследованных двухвозрастных древостоев на 2 унимодальных типа распределения диаметров. Индекс Джини (0,28–0,52) свидетельствовал о широком уровне структурного разнообразия и достигал высоких значений (0,48–0,52), когда распределение диаметров было близко к

нисходящему. Большие индексы Сийпилехто (0,63–1,05) подтвердили унимодальность распределений диаметров древостоев, в т. ч. для пикообразного типа. Сделан вывод, что кластерный анализ и применение индексов размерного разнообразия диаметров позволяют лучше понять структуру строения липняков, а индексы для древостоев липы должны стать частью их дальнейших лесоводственных оценок.

**Ключевые слова:** распределение по диаметру, индексы, типы структуры, липа мелколистная, Республика Башкортостан

**Для цитирования:** Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Мартынова М.В., Фазлутдинов И.И. Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 42–57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-42-57>

Original article

### Variability of Tree Diameters in Small-Leaved Linden Stands

**Aydar K. Gabdelkhakov**<sup>✉</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

**Vladimir F. Kononov**<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540),

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

**Zagir Z. Rakhmatullin**<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726),

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

**Maria V. Martynova**<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4659-2018](https://orcid.org/0000-0002-8804-8425),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-8425>

**Ilyas I. Fazludtinov**<sup>2</sup>, Leading Specialist; ResearcherID: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752),

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

<sup>1</sup>Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, 450001, Russian Federation; [aliya201199@mail.ru](mailto:aliya201199@mail.ru)<sup>✉</sup>, [vfkononov@bk.ru](mailto:vfkononov@bk.ru), [zagir1983@mail.ru](mailto:zagir1983@mail.ru), [maaarussia@mail.ru](mailto:maaarussia@mail.ru)

<sup>2</sup>Ministry of Forestry of the Republic of Bashkortostan, ul. Lenina, 86, Ufa, 450006, Russian Federation; [solnc2007@yandex.ru](mailto:solnc2007@yandex.ru)

Received on June 19, 2023 / Approved after reviewing on September 11, 2023 / Accepted on September 13, 2023

**Abstract.** Information on the distribution of trees by thickness grades in stands is necessary for planning selective fellings and the formation of environmentally sustainable and economically valuable plantations. The aim of this article is to characterize and compare the structural diversity of tree diameter distribution in mixed one- and two-age stands of *Tilia cordata* Mill. growing in the Arkhangelsk forestry of the Republic of Bashkortostan. Based on the data from 25 temporary sample plots, cluster analysis and visualization method based on empirical data of tree diameter distributions have identified 4 unimodal structural types of distributions and a descending (reverse J-shaped) one. Among the studied two-aged stands, distribution of stands by diameter at breast height with 2 peaks (bimodality) is not observed. It has been found that the coefficients of diameter variation steadily decrease with the age of the tree stand (Pearson correlation coefficient  $r = -0.57$  at  $p = 0.003$ ) and an increase in the proportion of linden in the forest stand ( $r = -0.71$  at  $p < 0.001$ ), and the distribution series are characterized by right-sided asymmetry. Tree size diversity has been assessed based on cross-sectional area data using the Shannon, Simpson, Gini and Siipilehto indices. A comparison of the Shannon and Simpson indices has shown that the structural diversity of tree diameter has been more

complex in two-aged forests compared to one-aged ones. Both indices have provided a clear division of the studied two-aged stands into 2 unimodal types of diameter distribution. The Gini index (0.28–0.52) has indicated a high level of structural diversity and has reached high values (0.48–0.52) when the diameter distribution has been close to downward sloping. Large values of the Siipilehto index (0.63–1.05) have confirmed the unimodality of the diameter distributions of the stands, including for the peak-shaped type. It has been concluded that cluster analysis and the use of indices of dimensional diversity of diameters allow a better understanding of the structure of linden forests, and the indices for linden stands should become part of their further forestry assessments.

**Keywords:** diameter distribution, indices, structural types, small-leaved linden, the Republic of Bashkortostan

**For citation:** Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Martynova M.V., Fazlutdinov I.I. Variability of Tree Diameters in Small-Leaved Linden Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 42–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-42-57>

### Введение

Принципы многоцелевого и экологически обоснованного лесопользования требуют информации как о текущем, так и о будущем состоянии древостоев [32]. Подобная информация, особенно в региональном масштабе, в виде моделей роста и продуктивности для разработки эффективных планов управления развитием в существующих сложных лесных экосистемах различных древесных видов недостаточна [5, 34]. Одним из полезных инструментов для создания моделей роста и продуктивности древостоев является частотное распределение диаметров отдельных древесных видов [7, 20, 33]. Лесоводы заинтересованы в оценке распределения деревьев по ступеням толщины в древостоях [18, 21], поскольку диаметр вместе с другими количественными и качественными показателями ствола определяет сортиментную структуру и, следовательно, цену древесины [20, 36]. По характеру распределения диаметров деревьев древостоя можно судить о его структуре [19, 22, 24], стадии развития древостоя [13], устойчивости [6], проектировать рубки и анализировать их результаты [10, 17, 37]. Показатели, описывающие разнообразие размеров деревьев в древостоях, позволяют оценить экономическую, экологическую и социальную ценности режимов управления как для одновозрастных, так и для разновозрастных насаждений. Эти показатели имеют несколько потенциальных применений в качестве инструментов планирования лесопользования в целом [20].

Различия в размерах деревьев в насаждениях обусловлены геоморфологической неоднородностью среды, возрастом, конкуренцией видов, скоростью роста, воздействием человека и животных, генетическими свойствами, влиянием вредителей и болезней леса, стихийных явлений [5, 12, 28]. В естественных лесах структура распределения диаметров деревьев часто значительно различается даже среди насаждений одного возраста (сукцессионная стадия), а также типа древостоя (старовозрастные, управляемые одновозрастные и разновозрастные, вторичные неуправляемые) [8]. Структура распределения диаметров на высоте груди (*dbh*-распределения) в естественных лесах может быть унимодальной, мультимодальной, уменьшающейся и неравномерной [22].

Количество выделяемых типов *dbh*-распределений в различных исследова-

ниях варьирует: S. Rouvinen и T. Kuuluvainen [31] называют 3 (униmodalный, бимodalный и нисходящий типы); Valbuena et al. [36] – 4 (одинакового размера, равномерный, бимodalный и обратный J-образный); M. Pach и R. Podlaski [29] – 6, в их числе 3 униmodalных разного диапазона ширины *dbh* (в основном для управляемых насаждений), обратный J-образный, ротационно-сигмовидный и бимodalный (для неуправляемых насаждений).

Описание размерной структуры лесов осуществляется с помощью ряда индексов [20, 28, 36], которые рассчитываются на основе числа деревьев, диаметра на высоте 1,3 м, площади сечения, расстояния между деревьями и др. Индекс структурной сложности древостоя представляет собой математическую конструкцию, суммирующую эффекты 2 или более структурных атрибутов 1 числом [24]. Наиболее часто применяются индексы Шеннона, Симпсона и Джини, представляющие различные свойства размерной структуры древостоев [9]. Индекс Джини – это показатель неоднородности, используется как мера для сравнения диапазона, индекс Симпсона определяется как показатель доминирования или концентрации, а индекс Шеннона – как показатель равномерности распределения по всем ступеням толщины. Эти 3 индекса не меняются при увеличении плотности каждого класса диаметров в одинаковой пропорции, что позволяет сравнивать разнообразие диаметров в одном или разных насаждениях с течением времени, независимо от их плотности [14, 20].

Естественные леса из липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) составляют значительную часть лесного фонда Республики Башкортостан, занимая около 1,2 млн га, что составляет более 22 % от общей площади лесных угодий региона [2]. Несмотря на широкую распространенность липняков, исследования структуры насаждений этого вида очень ограничены [15], в т. ч. в горно-лесной зоне республики [1]. Оценка и сравнение разнообразия диаметров как одновозрастных, так и разновозрастных древостоев липы отсутствуют.

Цель данного исследования – оценка и сравнение структурного разнообразия *dbh*-распределения деревьев в смешанных одно- и двухвозрастных насаждениях *Tilia cordata* Mill., произрастающих в условиях Архангельского лесничества Республики Башкортостан.

#### *Объекты и методы исследования*

Объекты исследования расположены в лесостепной лесорастительной зоне Южно-Уральского лесостепного района (54°5' с. ш. 56°8' в. д.). Климат территории резко континентальный. Многолетние данные получены с метеорологической станции с. Архангельское. Среднегодовая температура воздуха – 2–3 °С. Годовая сумма осадков – около 600–700 мм и более, в т. ч. 400–450 мм за вегетационный период, который длится с мая по сентябрь. Средняя продолжительность безморозного периода с температурой выше 10 °С – 130–140 дней.

В Архангельском лесничестве республики липа – одна из самых распространенных и ценных пород деревьев, здесь на нее приходится более 85 тыс. га (43 %) площади лесного фонда. Она образует как смешанные, так и чистые древостои, большая их часть является одновозрастными, но значительные территории представлены и разновозрастными насаждениями.

Изучение распределения деревьев по диаметрам проведено по данным пробных площадей (ПП), заложенных в 15 одно- и 10 двухвозрастных смешанных порослевых насаждениях липы снытьевой группы типов леса. Почвы ПП

определены нами как серые лесные среднесуглинистые. ПП прямоугольной формы заложены размером 0,25–1,00 га, что обусловлено необходимостью получить достаточное количество наблюдений для подгонки *dbh*-распределений. Насаждения были выбраны в соответствии со следующими критериями: 1) преобладание липы по запасу; 2) разное доленое участие древесных видов при доминировании липы; 3) охват древостоев разной полноты и возраста; 4) площадь насаждений не менее 5,0 га. Все деревья толще 6,0 см были идентифицированы по видам, а их диаметры измерены в 2 перпендикулярных направлениях по 4-сантиметровым ступеням толщины. В общей сложности на 25 ПП обследовано 8040 деревьев. Высота (*h*) 3–5 деревьев каждой ступени толщины установлена высотомером Блюма–Лейсса с точностью до 0,5 м для построения графика и оценки разряда высот. Запас древостоев рассчитан по региональным сортиментным таблицам. На каждой ПП у 1–5 доминирующих видов деревьев возрастным буровом извлекали керны у оснований стволов для определения возраста (*A*). Для каждой ПП рассчитаны следующие переменные древостоя: средний квадратический диаметр (*DBH*), количество деревьев на гектаре (*N*), сумма площадей сечений древостоя (*G*), средняя высота (*H*) и запас (*M*).

Выявление закономерностей *dbh*-распределения на начальном этапе исследования было основано на кластерном анализе по иерархическому агломеративному методу (древовидная кластеризация). Каждая ПП рассматривалась как ветвь, в которой переменные – количество деревьев в 4-сантиметровых ступенях толщины с интервалом от 8 до 64 см. Группировка ближайших ПП в кластеры осуществлялась методом Ward, принимающим за меру рассеивания Евклидово расстояние [18, 30]. Метод Ward обеспечивает сильную кластеризацию и широко применяется при кластерном анализе количественных переменных [18], без учета требования нормальности распределения случайных величин. Далее, ориентируясь на результаты иерархического кластерного анализа, провели кластеризацию методом *k*-средних. Минимальное количество кластеров было подобрано таким образом, чтобы дисперсионным анализом добиться значимого уровня различия ( $p = 0,05$ ) для каждой ступени толщины по F-критерию.

На следующем этапе исследования различия *dbh*-распределения между ПП сравнивались путем визуальной интерпретации исходного распределения диаметров, анализа выборочных статистик и сравнения индексов: Шеннона (*SEI*), Симпсона (*D*), Джини (*GI*) и Сийпилехто (*Ψ*). Визуально на графиках оценивались диапазон распределения диаметров, количество пиков, стволов липы и всех пород.

Для обобщенных (по всем древесным породам) рядов *dbh*-распределений ПП вычислены основные статистики: размер выборки (*n*), среднее арифметическое значение (*Dm*), медиана (*Me*), коэффициенты вариации (*Cv*), асимметрии (*As*) и эксцесса (*Es*). *Cv* часто используется для количественной оценки разнообразия размеров деревьев в пределах насаждения: если все деревья имеют одинаковый диаметр, то  $Cv = 0$ , увеличение *Cv* указывает на рост изменения диаметров деревьев [11, 38]. *Cv* измеряет относительную, а не абсолютную вариацию, что позволяет проводить прямое перекрестное сравнение между насаждениями [13]. Асимметрия распределения диаметров является мерой разнообразия и отклонения от симметрии нормального распределения [23].

Положительные значения  $A_s$  указывают на правостороннее распределение, что характерно для разновозрастных насаждений, тогда как однородные насаждения обычно имеют симметричное распределение.  $E_s$  является мерой толщины или тяжести хвостов  $dbh$ -распределения, описывает его форму (или остроту), на этот коэффициент, как правило, больше влияют несколько крайних отличий от среднего значения, чем множество небольших [23].  $C_v$ ,  $A_s$  и  $E_s$  – пространственно неявные меры структурного разнообразия [35].

Стандартизированный индекс равномерности Шеннона рассчитывался следующим образом [4]:

$$SEI = \frac{-\sum_{i=1}^k p_i \ln p_i}{\ln k},$$

где  $p_i$  – доля площади сечения деревьев в ступени толщины  $i$ ,  $m^2 \cdot га^{-1}$ ;  $k$  – количество ступеней толщины.

Максимальный индекс Шеннона, равный 1, достигается, когда площади сечений равны для всех ступеней толщины. Минимальное значение – 0, в этом случае все деревья относятся к одной ступени [20].  $SEI$  зависит от ступени толщины: уменьшается с увеличением ширины ступени при уменьшении количества ее представленности в древостое [27].

Индекс разнообразия Симпсона находится по формуле [26, 27]:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^k p_i^2.$$

$D$ , принимая значения от 0 до 1, интерпретируется как вероятность того, что любые 2 случайно взятых дерева принадлежат к разным классам диаметра [4]. Индекс сильно привязан к наиболее распространенному классу диаметров в выборке, в то же время он менее чувствителен к количеству ступеней толщины [20].

Для характеристики структурного разнообразия каждой ПП использовали индекс Джини в связи с его широким применением в исследованиях леса [3, 10, 17]. Общая формула этого индекса:

$$GI = 1 - \sum_{i=1}^k [(ba_{i-1} + ba_i)(n_i - n_{i-1})],$$

где  $ba_i$  ( $ba_{i-1}$ ) – кумулятивная доля площади сечений деревьев всех ступеней толщины, меньших или равных  $i$ -му классу диаметра (для  $i = 1$ ,  $ba_{i-1} = 0$ );  $n_i$  ( $n_{i-1}$ ) – кумулятивная доля количества деревьев всех ступеней толщины, меньших или равных  $i$ -му классу диаметра (для  $i = 1$ ,  $n_{i-1} = 0$ ).

Индекс  $GI$  представляет собой отношение между (а) площадью ограниченной кривой Лоренца и диагональю совершенной однородности и (б) всей площадью ниже этой диагонали [9].  $GI$  может принимать значения в диапазоне 0–1. Теоретически, в случае абсолютного неравенства, индекс может быть максимальным – 1,0. Однако на практике его наибольшее значение для лесных насаждений – 0,8. Когда все деревья на участке имеют одинаковые  $dbh$ ,  $GI = 0$ .  $GI$  не зависит от густоты и общей суммы площадей сечений древостоя, что позволяет проводить сравнение между насаждениями [13, 19].

Все 3 индекса легко рассчитываются по данным обычной таксации, интерпретируются и быстро сравниваются. Расчет этих индексов для

описания распространенности каждой ступени толщины вельса по площади сечения, что позволяет учесть более крупные деревья, встречающиеся на ПП [20, 25].

Для описания формы *dbh*-распределений всех древесных пород ПП рассчитан индекс формы Сийпилехто [33]:

$$\Psi = \frac{G}{g_m N},$$

где  $G$  – сумма площадей сечений древостоя,  $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $g_m$  – взвешенное по площади сечения медианное дерево,  $\text{м}^2$ ;  $N$  – общее количество деревьев, экз.  $\cdot \text{га}^{-1}$ .

Если *dbh*-распределение напоминает пикообразное унимодальное распределение,  $\Psi \approx 1,0$ ; унимодальные распределения –  $0,54 < \Psi < 1,0$ . Значения уменьшаются с увеличением отклонения диаметров и асимметрии вправо. Когда *dbh*-распределение однородно по форме или напоминает перевернутую букву J,  $\Psi$  уменьшается примерно до 0,54 и 0,48 соответственно [31].

Все расчеты и статистический анализ выполнены с использованием приложений Microsoft Excel и Statistica.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Все пробные площади располагались в естественных смешанных насаждениях с преобладанием липы в составе 5–10 ед. Древостои характеризуются разным соотношением участия дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.), вяза (*Ulmus glabra* Huds.), березы повислой (*Betula pendula* L.) и осины (*Populus tremula* L.). Средний квадратический диаметр деревьев на ПП варьируют от 13 до 38 см (табл. 1). Сумма площадей сечений древостоя изменяется в широком диапазоне – от 18 до 52  $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$ , как и запас – от 155 до 528  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ . Они зависят как от возраста (40–95 лет), так и от густоты древостоев (494–1300 экз.  $\cdot \text{га}^{-1}$ ). Средний возраст указан только для липы. Возраст сопутствующих видов в одновозрастных древостоях был почти таким же, кроме крупных единичных деревьев дуба на ПП 15 – 130 лет. Анализ ПП по основным таксационным показателям подтверждает, что подобранные для изучения древостои II и III классов бонитета по происхождению, составу и полноте (0,4–1,0) отвечают наиболее распространенным условиям формирования липняков района исследования.

С помощью кластерного анализа по иерархическому агломеративному методу были установлены 5 кластеров *dbh*-распределений. На дендрограмме (рис. 1) по вертикальной оси показаны объединяемые в кластеры ПП (ветви, с присвоенными идентификационными литерами), а по горизонтали – Евклидово расстояние между ними. Большая протяженность Евклидова расстояния означает меньшее сходство между ПП. Дендрограмма отражает слияние ветвей в 4 крупных кластера, которые, с небольшими вариациями, объединяют одновозрастные и разновозрастные древостои, ПП 22 образует обособленный кластер. Каждый цветной прямоугольник на рис. 1 представляет собой различный кластер *dbh*-распределения.

Таблица 1

Основные таксационные характеристики пробных площадей  
The main inventory characteristics of the sample plots

ПП	А, лет	Состав	Н, м	DBH, см	N, экз.·Га <sup>-1</sup>	G, м <sup>2</sup> ·Га <sup>-1</sup>	M, м <sup>3</sup> ·Га <sup>-1</sup>
<i>Одновозрастные древостои</i>							
1	70	9Лп1Б+Д+В+Кл	19,8	35	664	50,03	458
2	65	10Лп +В	16,9	22	848	30,60	267
3	55	7Лп2Д1В+Б	19,8	22	586	24,79	232
4	45	6Лп2В1Д1Б+В	16,7	17	1140	32,73	293
5	40	6Лп2Д2В	14,4	13	1300	25,79	225
6	55	5Лп5Ос+Д+В	16,5	19	890	27,37	237
7	55	5Лп3Д1В1Б	17,7	19	1064	36,45	323
8	55	9Лп1В	17,8	20	951	32,62	365
9	55	7Лп2Д1Б+В	17,6	19	1077	37,41	447
10	55	6Лп3Д1Кл+В	16,5	15	944	21,78	188
11	55	8Лп1Д1В+Б+Ос	19,4	23	735	31,23	283
12	75	8Лп2Б+В+Ос	21,6	26	704	32,51	296
13	55	8Лп1Д1В+Б	20,1	23	494	21,36	192
14	50	5Лп3Б1Д1В	16,4	17	590	18,28	155
15	55	8Лп1Д1Б+Ос	16,1	23	654	31,11	257
<i>Двухвозрастные древостои</i>							
16	90/65	6Лп3Лп1Б+Ос	22,2/17,9	27/18	668	28,15	270
17	90/65	7Лп2Лп1Д+В	22,2/17,7	30/18	573	27,96	276
18	95/75	6Лп3Лп1Д+В+Б	22,1/17,8	36/25	595	46,47	465
19	90/65	6Лп3Лп1Ос	21,9/17,7	31/19	542	27,69	272
20	95/65	6Лп3Лп1Ос+В+Б	23,6/19,8	34/25	545	38,25	386
21	80/60	7ЛпП3Лп+Д <sub>н</sub> +В	22,7/18,6	30/20	352	18,45	187
22	70/55	6Лп3Лп1Ос	22,8/18,9	28/21	560	27,39	281
23	80/50	6Лп3Лп1Ос+В	22,2/17,9	35/25	451	32,37	323
24	95/75	6Лп3Лп1Д <sub>н</sub> +В+Кл	22,4/18,0	38/28	618	52,09	528
25	90/60	6Лп3Лп1Д <sub>н</sub> +В	21,9/18,0	30/23	668	38,79	382

Результаты последовательной кластеризации методом  $k$ -средних с заданием 3–5 кластеров показали, что при 3 кластерах различия между ПП в  $dbh$ -распределении незначительны. Начиная с 4 кластеров  $dbh$ -распределения ПП имеют существенную разность по  $F$ -критерию при уровне значимости  $p < 0,01$ . Задание 5 кластеров приводит к аналогичному с иерархическим методом результату.

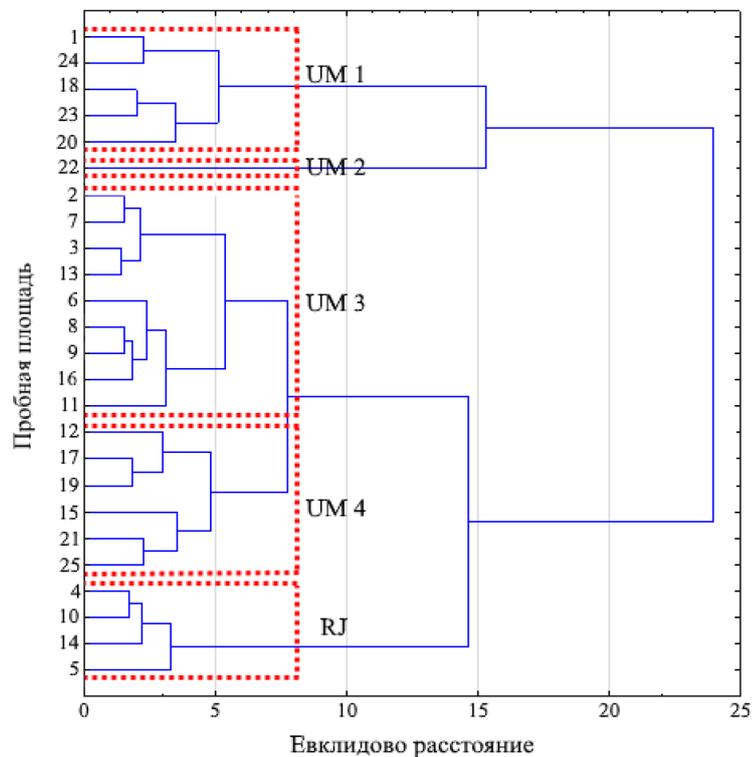


Рис. 1. Дендрограмма иерархического агломеративного кластерного анализа *dbh*-распределения исследованных липняков

Fig. 1. The dendrogram of hierarchical agglomerative cluster analysis of the *dbh*-distribution of the studied linden forests

Каждый кластер визуализирован отдельно по эмпирическим данным *dbh*-распределений ПП, их наиболее характерные примеры представлены на рис. 2. На основе визуального анализа обнаружено, что исследованные древостои сформировали следующие структурные типы *dbh*-распределений: 1) UM1 – унимодальный с *DBH* от 34 до 38 см, включает 4 двухвозрастные ПП и 1 одновозрастную (ПП 1); 2) UM2 – унимодальный с *DBH* 28 см, его составляет двухвозрастный древостой; 3) UM3 – унимодальный с *DBH* от 19 до 27 см, включает 8 одновозрастных ПП и 1 двухвозрастную (ПП 16); 4) UM4 – унимодальный с *DBH* от 23 до 31 см, в него входят 2 одновозрастные ПП (ПП 12 и 15) и 4 двухвозрастные; 5) RJ – нисходящий (обратной J-образной формы) с *DBH* от 13 до 17 см, объединяет 4 одновозрастные ПП. Среди исследованных двухвозрастных древостоев *dbh*-распределения с 2 пиками (бимодальность) не наблюдается.

Широкий диапазон *dbh*-распределения деревьев присущ как одно-, так и двухвозрастным древостоям. Крупные деревья с *DBH* > 40 см отмечены в 22 древостоях. В среднем количество таких деревьев составляет 25 экз.·га<sup>-1</sup>, при максимальном количестве 87 экз.·га<sup>-1</sup> (ПП 24). Диапазон распределения диаметров деревьев на ПП различается даже в пределах одного возраста (55-летние древостои). Например, если на ПП 3 деревья представлены ступенями толщины от 8 до 60 см, то на ПП 6 – только до 32 см.

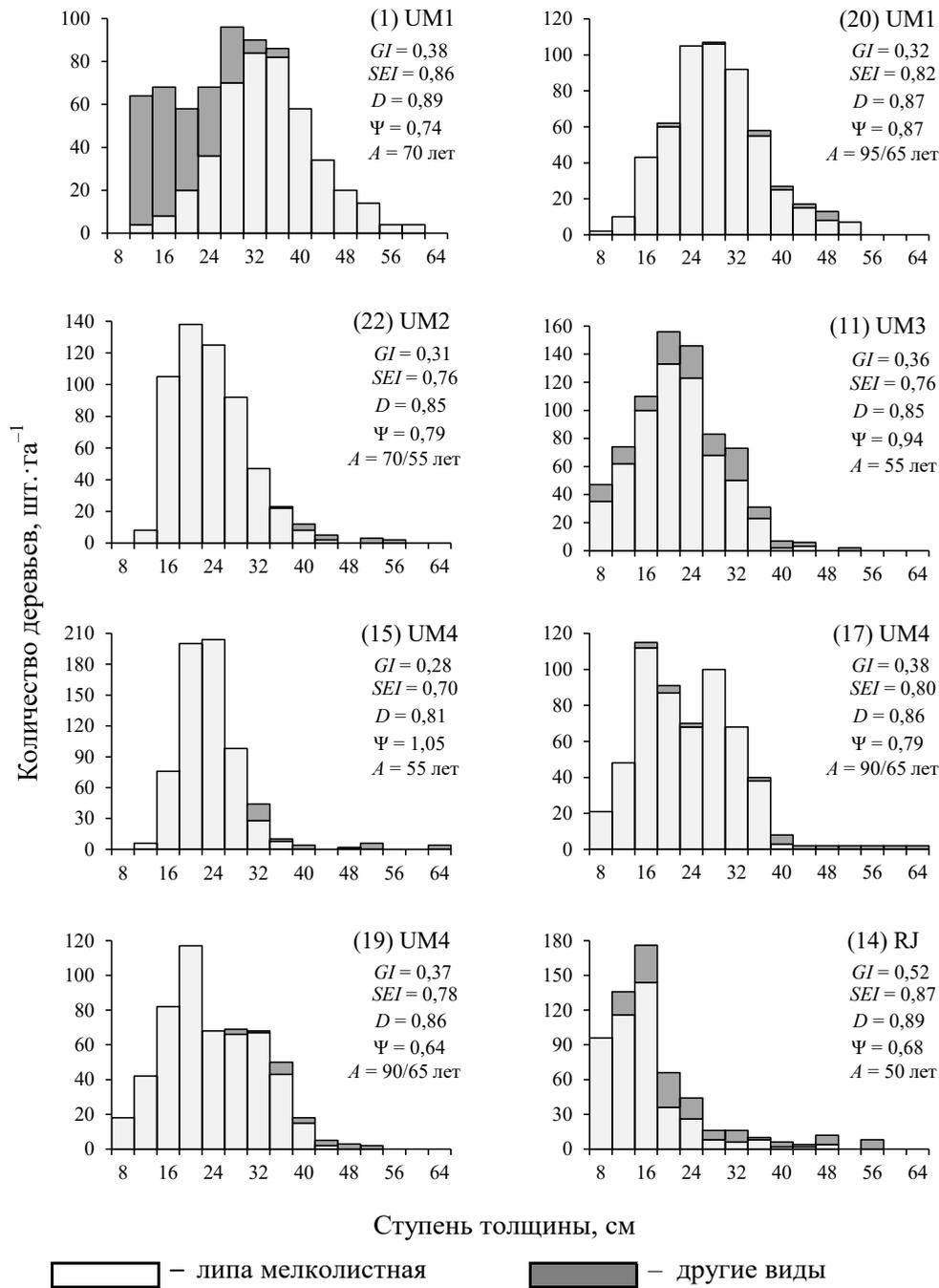


Рис. 2. *Dbh*-распределения исследованных липняков. В круглых скобках – порядковый номер пробной площади, справа от них – структурный тип

Fig. 2. The *dbh*-distributions of the studied linden forests. In parentheses is the serial number of the sample plot, to the right of them is the structural type

Таблица 2

Статистические показатели и индексы *dbh*-распределений пробных площадей  
The statistical indicators and indices of *dbh*-distributions of the sample plots

ПП	n	Dm	Me	min	max	Cv	As	Es	Ψ	SEI	D	GI
<i>Одновозрастные древостои</i>												
1	332	29,0	28	12	60	37,3	0,25	-0,47	0,74	0,86	0,89	0,38
2	212	20,4	20	8	40	33,1	0,03	-0,14	0,80	0,67	0,81	0,32
3	293	20,9	20	8	60	46,4	1,52	3,01	0,69	0,89	0,90	0,46
4	285	17,0	16	8	60	51,9	2,12	6,94	0,63	0,82	0,87	0,48
5	325	14,1	12	8	48	51,8	2,78	9,23	0,78	0,73	0,84	0,50
6	356	18,8	20	8	32	32,8	-0,21	-0,83	0,68	0,59	0,77	0,32
7	266	19,2	20	8	48	42,3	0,68	0,08	0,76	0,80	0,87	0,42
8	285	20,2	20	10	44	27,3	0,93	2,12	0,76	0,64	0,79	0,28
9	323	20,0	20	10	40	33,4	0,84	0,65	0,77	0,73	0,84	0,36
10	236	15,4	12	8	52	48,9	2,09	6,23	0,73	0,80	0,87	0,48
11	442	21,9	20	8	52	35,7	0,36	0,04	0,94	0,76	0,85	0,36
12	352	22,5	24	8	48	39,7	0,02	-0,65	0,75	0,75	0,84	0,38
13	269	21,7	20	8	56	39,3	1,29	2,35	0,64	0,82	0,86	0,40
14	295	17,5	16	8	56	54,0	1,95	4,35	0,68	0,87	0,89	0,52
15	327	23,7	24	12	64	27,6	2,41	10,72	1,05	0,70	0,81	0,28
<i>Двухвозрастные древостои</i>												
16	334	22,2	20	8	56	31,8	1,06	2,42	0,93	0,77	0,85	0,33
17	344	23,4	24	8	64	37,7	0,77	1,65	0,79	0,80	0,86	0,38
18	358	30,0	28	12	64	29,7	0,36	-0,14	0,77	0,78	0,87	0,31
19	325	24,0	24	8	52	36,0	0,35	-0,37	0,64	0,78	0,86	0,37
20	327	28,6	28	8	64	30,6	0,71	1,18	0,87	0,82	0,87	0,32
21	352	24,7	24	12	64	30,6	0,74	1,85	0,85	0,77	0,85	0,32
22	336	23,9	24	12	56	29,2	1,13	2,15	0,79	0,76	0,85	0,31
23	361	29,1	28	12	56	28,2	0,57	0,06	0,89	0,80	0,87	0,30
24	371	31,0	32	8	60	34,1	0,39	-0,05	0,83	0,86	0,89	0,35
25	334	26,2	24	12	56	27,5	0,98	1,00	0,94	0,76	0,86	0,29

Представленность сопутствующих видов по ступеням толщины на ПП варьирует. На ПП1 и ПП2 примесь зафиксирована в ступенях толщины ниже средней, на ПП 8, 15 и 19 наоборот – выше средней, а на ПП 5 и 22 другие породы – только крупные деревья дуба и вяза, осины соответственно. На остальных ПП количество примеси по ступеням толщины либо распределено равномерно (ПП 4, 11 и 23), либо соотношение сильно различается. Например, на ПП 12 вяза больше в ступенях толщины 8–24 см, а береза с осиной встречаются по несколько экземпляров в ступенях толщины 24 см и выше.

Статистические показатели *dbh*-распределений обобщенных рядов сведены в табл. 2. *Dm* для отдельных объектов составляет от 14 до 31 см. Коэффициент вариации, являющийся показателем однородности строения древостоя, изменяется от 27 до 52 %, устойчиво снижаясь с возрастом древостоя (коэффициент корреляции Пирсона  $r = -0,57$  при  $p = 0,003$ ) и увеличением доли липы в его составе ( $r = -0,71$  при  $p < 0,001$ ). На ПП 6 *dbh*-распределение характеризуется левосторонней асимметрией ( $-0,21$ ), на остальных – правосторонней, причем на 10 из них *As* превышает 1,0. *Dbh*-распределения характеризуются различной степенью уплощения – от 0,8 до 10,7. Анализ *As* и *Es* для всех древостоев, кроме ПП 2, показал, что они лежат за пределами своих 2-кратных основных ошибок. Это свидетельствует об отличии данных рядов от нормального распределения. Соответственно, для ПП 2 оценки достоверности *As* и *Es* по *t*-критерию Стьюдента говорят об отсутствии отклонения кривых распределений от нормального на уровне  $t_{0,05} < 1,97$ .

Стандартизированный индекс равномерности *SEI* изменяется от 0,59 до 0,89, а индекс разнообразия *D* – от 0,81 до 0,90. Оба индекса не позволили четко разделить структурное *dbh*-разнообразие одно- и двухвозрастных древостоев ПП. Однако сравнение средних значений индексов Шеннона и Симпсона показало, что структурное разнообразие диаметра деревьев сложнее в двухвозрастных лесах. При этом оба индекса характеризуются корреляционной связью со стандартным отклонением ( $r = 0,86$  и  $r = 0,83$  соответственно с  $p < 0,001$ ), а также обеспечили деление исследованных двухвозрастных древостоев на 2 типа UM1 ( $0,78 < SEI < 0,86$ ;  $0,87 < D < 0,89$ ) и UM4 ( $0,70 < SEI < 0,80$ ;  $0,81 < D < 0,86$ ).

Большое разнообразие диаметров (до 48 см и более) оказывает влияние на *GI* (находится в пределах 0,28–0,52), что свидетельствует о широком уровне структурного разнообразия. При анализе распределения деревьев по ступеням толщины для ПП замечено, что *GI* достигает более высоких значений (0,48–0,52), когда распределение диаметров близко к нисходящей (обратной J-образной) форме кривой (ПП 4, 5, 10 и 14). Нисходящий характер распределения диаметров отмечается для ПП в возрасте от 40 до 55 лет. Это согласуется с данными N. Løxerød и T. Eid [20] для смоделированных *dbh*-распределений смешанных хвойных древостоев, *GI* которых при варьировании от 0,16 до 0,30 свидетельствовали о нормальном распределении, а при диапазоне 0,44–0,57 – о нисходящем. Указанный характер распределения частично согласуется с данными G. Duduman et al. [9], которые для смешанных (хвойные с буком) насаждений Румынии установили следующие пределы: одновозрастные –  $GI < 0,35$ , двухвозрастные –  $0,35 < GI < 0,43$ , разновозрастные нерегулярные –  $0,43 < GI < 0,51$  и разновозрастные сбалансированные –  $GI > 0,51$ .

Индекс формы Сийпилехто  $\Psi$  варьирует от 0,63 (ПП 4) до 1,05 (ПП 15). Большие значения индекса подтверждают унимодальность *dbh*-распределений исследованных древостоев, причем для ПП 15 – как пикообразное унимодальное.

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции (над диагональю) и уровень значимости (под диагональю) индексов и статистик *dbh*-распределений для пробных площадей**  
**The correlation coefficients (above the diagonal) and significance level (below the diagonal) of indices and statistics of *dbh*-distributions for the sample plots**

	$\Psi$	<i>SEI</i>	<i>D</i>	<i>GI</i>	<i>Cv</i>	<i>As</i>	<i>Es</i>
$\Psi$	–	–0,184	–0,157	<b>–0,584</b>	<b>–0,587</b>	0,019	0,129
<i>SEI</i>	0,378	–	<b>0,979</b>	<b>0,499</b>	<b>0,436</b>	0,201	0,012
<i>D</i>	0,453	<b>&lt;0,001</b>	–	<b>0,474</b>	<b>0,404</b>	0,158	–0,047
<i>GI</i>	<b>0,002</b>	<b>0,011</b>	<b>0,017</b>	–	<b>0,991</b>	<b>0,542</b>	<b>0,404</b>
<i>Cv</i>	<b>0,002</b>	<b>0,029</b>	<b>0,045</b>	<b>&lt;0,001</b>	–	<b>0,537</b>	<b>0,426</b>
<i>As</i>	0,929	0,336	0,450	<b>0,005</b>	<b>0,006</b>	–	<b>0,947</b>
<i>Es</i>	0,539	0,956	0,822	<b>0,045</b>	<b>0,034</b>	<b>&lt;0,001</b>	–

Примечание: Достоверные значения выделены полужирным шрифтом.

Оценка корреляций между различными индексами показывает (табл. 3), что индекс формы  $\Psi$  отрицательно коррелирует с *SEI*, *D*, *GI*, и *Cv*, причем для 2 последних связь умеренная и достоверная. Индекс *SEI* с *D* коррелируют сильно, а с *GI* и *Cv* слабо, но достоверно. Из всех рассматриваемых индексов *GI* имеет сильную достоверную корреляционную связь с *Cv*, а также умеренные – с коэффициентами *As* и *Es*. По мнению M. Pach и R. Podlaski [29], *GI* позволяет полностью и логически различать типы *dbh*-распределений. Однако в данном исследовании при ограниченном числе ПП индекс Джини не дал возможности четко дифференцировать одно- и двухвозрастные древостои. Поэтому следует согласиться с мнением [16, 19], что индекс *GI* может быть чувствителен к внутренним эколого-физиологическим характеристикам составляющих видов деревьев или к уникальной истории нарушений конкретного насаждения и необходимо дальнейшее изучение его изменчивости в разных типах леса.

### Заключение

Полученные результаты по распределению по диаметрам на высоте груди как одно-, так и двухвозрастных смешанных древостоев липы мелколистной характеризуются широкой размерной изменчивостью деревьев. Распределения древостоев сильно варьируют по ПП, даже среди древостоев одного сукцессионного возраста. Несмотря на это, форма объединенных распределений по диаметру между древостоями различается слабо. Результаты исследования показывают, что кластерный анализ и применение индексов разнообразия позволяют лучше понять структуру строения древостоев липы. Поэтому индексы размерного разнообразия диаметров для насаждений липы мелколистной должны стать частью дальнейших оценок их надежности и использования в лесоводственной практике. Предложенный в настоящей работе подход к исследованию древостоев липы необходимо развивать, в т. ч. с использованием бимодальных, мультимодальных и неравномерных типов распределений диаметра в разновозрастных и старовозрастных древостоях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Габделхаков А.К., Ситдииков М.Р. Ход роста деревьев липы мелколистной в разновозрастном древостое // Вестн. БГАУ. 2013. № 3. С. 119–122.  
Gabdelkhakov A.K., Sitdikov M.R. *Tilia cordata* Mill Growth Rate in an Uneven-Aged Stand. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik Bashkir State Agrarian University, 2013, no. 3, pp. 119–122. (In Russ.).
2. Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Блонская Л.Н., Фазлутдинов И.И. Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 21–36.  
Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Blonskaya L.N., Fazlutdinov I.I. Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 21–36. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-21-36>
3. Barbu C.-O., Duduman G., Tomescu C.V. Variation Patterns of Forest Structure Diversity after Set-Aside in Rarău-Giumalău Mountains, Romania. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 2, art. no. 251. <https://doi.org/10.3390/f14020251>
4. Bílek L., Remeš J., Švec O., Zahradník D. On the Way to Continuous Cover Forest at Middle Elevations – the Question of Forest Structure and Specific Site Characteristics. *Journal of Forest Science*, 2013, vol. 59, iss. 10, pp. 391–397. <https://doi.org/10.17221/57/2013-JFS>
5. Bourdier T., Cordonnier T., Kunstler G., Piedallu C., Lagarrigues G., Courbaud B. Tree Size Inequality Reduces Forest Productivity: An Analysis Combining Inventory Data for Ten European Species and a Light Competition Model. *PLoS One*, 2016, vol. 11(3), art. no. e0151852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151852>
6. Burkhart H.E., Tomé M. Modeling Forest Trees and Stands. Springer Dordrecht, 2012. 458 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
7. Ciceu A., Pitar D., Badea O. Modeling the Diameter Distribution of Mixed Uneven-Aged Stands in the South Western Carpathians in Romania. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, art. no. 958. <https://doi.org/10.3390/f12070958>
8. Crow T.R., Buckley D.S., Nauertz E.A., Zasada J.C. Effects of Management on the Composition and Structure of Northern Hardwood Forests in Upper Michigan. *Forest Science*, 2002, vol. 48, iss. 1, pp. 129–145. <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.1.129>
9. Duduman G. A Forest Management Planning Tool to Create Highly Diverse Uneven-Aged Stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2011, vol. 84, iss. 3, pp. 301–314. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr014>
10. Duduman G., Tomescu C., Drăgoi M., Palaghianu C. Variabilitatea dimensională a arborilor și diversitatea florei vasculare în amestecuri de rășinoase cu fag din rezervația Codrul secular Slătioara = Tree Size Variability and Plant Diversity in Mixed Coniferous-Beech Forests in Slătioara Forest Reserve. *Bucovina Forestieră*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 135–147. (In Rom.).
11. Fischer C., Mölder A. Trend to Increasing Structural Diversity in German Forests: Results from National Forest Inventories 2002 and 2012. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. no. 80. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0675-5>
12. Gabdelkhakov A., Rakhmatullin Z., Martynova M., Fazlutdinov I., Mullagaleev I. Evaluating Diameter Distribution Series of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) in Forest Stands. *Plant Methods*, 2021, vol. 17, art. no. 45. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00741-6>
13. Hakkenberg C.R., Song C., Peet R.K., White P.S. Forest Structure as a Predictor of Tree Species Diversity in the North Carolina Piedmont. *Journal of Vegetation Science*, 2016, vol. 27, iss. 6, pp. 1151–1163. <https://doi.org/10.1111/jvs.12451>
14. Hui G., Pommerening A. Analysing Tree Species and Size Diversity Patterns in Multi-Species Uneven-Aged Forests of Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 316, pp. 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.029>

15. Jaworski A., Kołodziej Z., Bartkiewicz L. Structure and Dynamics of Stands of Primeval Character Composed of the Little-Leaf Linden (*Tilia cordata* Mill.) in the “Las lipowy 19. Obrozyska” Reserve (Southern Poland). *Journal of Forest Science*, 2005, vol. 51, iss. 7, pp. 283–304. <https://doi.org/10.17221/4565-JFS>
16. Johannes H.S., Sterba H. The Semi-Logarithmic Stem Number Distribution and the Gini-Index – Structural Diversity in “Balanced” DBH-Distributions. *Austrian Journal of Forest Science*, 2018, vol. 135, no. 1, pp. 19–31.
17. Kadavý J., Kneifl M., Fedorová B., Bartůněk J. Evaluation of Transformation from Even-Aged to Selection Forest by Means of Gini Index. *Journal of Forest Science*, 2017, vol. 63, iss. 10, pp. 476–484. <https://doi.org/10.17221/48/2017-jfs>
18. Kara F. Comparison of Tree Diameter Distributions in Managed and Unmanaged Kazdaği Fir Forests. *Silva Balcanica*, 2021, vol. 22(1), pp. 31–43. <https://doi.org/10.3897/silvabalkanica.22.e58020>
19. Keren S., Svoboda M., Janda P., Nagel T.A. Relationships between Structural Indices and Conventional Stand Attributes in an Old-Growth Forest in Southeast Europe. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 1, art. no. 4. <https://doi.org/10.3390/f11010004>
20. Lexerød N.L., Eid T. An Evaluation of Different Diameter Diversity Indices Based on Criteria Related to Forest Management Planning. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 222, iss. 1–3, pp. 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.046>
21. Liu F., Li F., Zhang L., Jin X. Modeling Diameter Distributions of Mixed-Species Forest Stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 7, pp. 653–663. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.960891>
22. Maltamo M., Kangas A., Uuttera J., Torniainen T., Saramäki J. Comparison of Percentile Based Prediction Methods and the Weibull Distribution in Describing the Diameter Distribution of Heterogeneous Scots Pine Stands. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 133, iss. 3, pp. 263–274. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(99\)00239-x](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00239-x)
23. McCarthy J.W., Weetman G. Stand Structure and Development of an Insect-Mediated Boreal Forest Landscape. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 241, iss. 1–3, pp. 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.030>
24. McElhinny C., Gibbons P., Brack C., Bauhus J. Forest and Woodland Stand Structural Complexity: Its Definition and Measurement. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 218, iss. 1–3, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034>
25. Merganič J., Šmelko Š. Quantification of Tree Species Diversity in Forest Stands – Model BIODIVERSS. *European Journal of Forest Research*, 2004, vol. 123, pp. 157–165. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0032-8>
26. Motz K., Sterba H., Pommerening A. Sampling Measures of Tree Diversity. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 260, iss. 11, pp. 1985–1996. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.046>
27. Ozcelik R., Gül A.U., Merganic J., Merganicova K. Tree Species Diversity and its Relationship to Stand Parameters and Geomorphology Features in the Eastern Black Sea Region Forests of Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 291–298.
28. Ozdemir I., Norton D.A., Ozkan U.Y., Mert A., Senturk O. Estimation of Tree Size Diversity Using Object Oriented Texture Analysis and Aster Imagery. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 8, pp. 4709–4724. <https://doi.org/10.3390/s8084709>
29. Pach M., Podlaski R. Tree Diameter Structural Diversity in Central European Forests with *Abies alba* and *Fagus sylvatica*: Managed versus Unmanaged Forest Stands. *Ecological Research*, 2015, vol. 30, iss. 2, pp. 367–384. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1232-4>
30. Podlaski R., Sobala T., Kocurek M. Patterns of Tree Diameter Distributions in Managed and Unmanaged *Abies alba* Mill. and *Fagus sylvatica* L. Forest Patches. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 435, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.046>

31. Rouvinen S., Kuuluvainen T. Tree Diameter Distributions in Natural and Managed Old *Pinus sylvestris*-Dominated Forests. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 208, iss. 1–3, pp. 45–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.11.021>
32. San-Miguel-Ayanz J., Ståhl G., Vidal C., Cienciala E., Korhonen K. Criterion 1: Maintenance and Appropriate Enhancement of Forest Resources and their Contribution to Global Carbon Cycles. *FOREST EUROPE, UNECE, FAO 2011: State of Europe's Forests 2011: Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*. Oslo, FOREST Europe Liaison Unit, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 2011, pp. 17–27.
33. Siipilehto J., Sarkkola S., Mehtätalo L. Comparing Regression Estimation Techniques when Predicting Diameter Distributions of Scots Pine on Drained Peatlands. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 2, art. no. 300. <https://doi.org/10.14214/sf.300>
34. Sohrabi V., Rahmani R., Jabbari S., Moayeri H. Evaluation Structural Diversity of *Carpinus betulus* Stand in Golestan Province, North of Iran. *Nusantara Bioscience*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 23–27. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n030104>
35. Sterba H. Diversity Indices Based on Angle Count Sampling and Their Interrelationships when Used in Forest Inventories. *Forestry*, 2008, vol. 81, iss. 5, pp. 587–597. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn010>
36. Valbuena R., Packalén P., Martí'n-Fernández S., Maltamo M. Diversity and Equitability Ordering Profiles Applied to Study Forest Structure. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 276, pp. 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.036>
37. Valdés G.E., Agramont A.R.E., Vazquez-Lozada S., Todd F.S. Forest Harvesting Impacts on the Structure and Composition of Coniferous Forests in Mexico. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 8, art. no. 1068. <https://doi.org/10.3390/f12081068>
38. Varga P., Chen H.Y.H., Klinka K. Tree-Size Diversity between Single- and Mixed-Species Stands in Three Forest Types in Western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 3, pp. 593–601. <https://doi.org/10.1139/x04-193>

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