ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО
FORESTRY

Научная статья
УДК 630*181
https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.6
EDN: YZPPZM

Использование параметров размерной структуры древостоев для оценки их текущего состояния и перспектив развития

Ю. П. Демаков*✉*, О. В. Шейкина, Е. С. Шарапов, А. С. Королев
Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
DemakovYP@volgatech.net✉

Аннотация. *Введение.* Размерная структура древостоя характеризует внутреннее его разнообразие, обеспечивающее устойчивое развитие ценопопуляции, поставляя материал для естественного отбора особей, а также целенаправленной их селекции по хозяйственно важным признакам. *Цель* исследования – усовершенствование приёмов использования параметров размерной структуры одновозрастных древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для оценки их текущего состояния и перспектив дальнейшего развития, а также для выбора ценных в селекционном отношении ценопопуляций. *Объекты и методы.* Исходный материал собран на 300 постоянных и временных пробных площадях, заложенных в чистых одновозрастных сосновых древостоях Республики Марий Эл, различающихся по происхождению, возрасту, густоте и условиям произрастания. На 17 постоянных пробных площадях периодически раз в 5–10 лет измеряли длину окружности ствола у всех пронумерованных деревьев и оценивали величину текущего прироста их по диаметру. Продолжительность наблюдений на стационарных объектах составляла от 10 до 40 лет. Полученный цифровой материал обработан на ПК с использованием стандартных методов математической статистики. *Результаты.* Установлены пределы вариабельности и основные закономерности изменения величины комплекса параметров размерной структуры древостоев, каждый из которых имеет специфичное информационное значение, и созданы соответствующие шкалы для оценки текущего состояния ценопопуляций и перспектив их дальнейшего развития. Показано, что надёжной основой для получения новых знаний о закономерностях динамики формирования размерной структуры древостоев является сеть стационарных пробных площадей. *Вывод.* Для адекватной оценки текущего состояния ценопопуляций и определения перспектив их дальнейшего развития величину параметров размерной структуры всегда необходимо сравнивать с эталоном, в качестве которого могут выступать их значения, присущие либо региональным модальным насаждениям, либо так называемым «нормальным» древостоям.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; ценопопуляции; размерная структура; параметры; динамика; оценка состояния; эталоны сравнения

Благодарности: авторы признательны к. с.-х. наук, заместителю директора по научной работе государственного заповедника «Большая Кокшага» А. В. Исаеву за помощь в сборе материала. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

Финансирование: работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 23-16-00220, https://rscf.ru/project/23-16-00220/

Для цитирования: Использование параметров размерной структуры древостоев для оценки их текущего состояния и перспектив развития / Ю. П. Демаков, О. В. Шейкина, Е. С. Шарапов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 4 (64). С. 6–21. https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.6; EDN: YZPPZM

© Демаков Ю. П., Шейкина О. В., Шарапов Е. С., Королев А. С., 2024

Введение

Структура – неотъемлемый атрибут всех объектов материального мира, характеризующий степень упорядоченности в них элементов по различным индивидуальным признакам, определяющим особенности внутренних и внешних связей, а следовательно, и закономерности функционирования систем любого уровня. Познание структуры есть способ познания системы [1, 2]. При этом, однако, чем больше признаков использовано для описания особей, каждая из которых имеет индивидуальные особенности, тем больше, как отмечает Л. А. Животовский [3], обнаруживается различий между ними и тем отчётливее проявляются различия между биологическими системами разного уровня: семьями, стаями, стадами, ценопопуляциями и популяциями. Образно это можно выразить фразой ихтиолога Ф. Хейнке, приведённой Л. А. Животовским в своей монографии: «Сообщите мне размеры ста рыб, и я скажу откуда они, дайте мне сто признаков одной рыбы, и я точно определю место её отлова» [3, с. 6]. К этому же должны стремиться, на наш взгляд, все исследователи-биологи, в том числе и специалисты в области лесоведения. Только особенности структуры позволяют провести надёжную идентификацию и классификацию различных природных объектов.

Текущая структура древостоя – временной срез длительных медленно протекающих в нём процессов взаимодействия деревьев между собой и с другими элементами ценоза, а также с внешней средой. Она отражает дифференциацию деревьев по различным фено- и генотипическим признакам, характеризуя количественно посредством статистических параметров внутреннее разнообразие древостоя, которое обеспечивает устойчивое его развитие, поставляя материал для естественного отбора особей. Это разнообразие может являться также и материалом для искусственного отбора, т. е. целенаправленной селекции деревьев по какому-либо важному хозяйственному признаку. Изучение структуры древостоев и закономерностей её формирования является, исходя из этого, актуальной научной задачей.

Исследователями давно отмечено, что деревья даже в одновозрастном древостое сильно различаются между собой по размерам, особенно по диаметру ствола, который интегрально количественно отражает скорость их роста и степень конкурентоспособности [2, 4–7]. Изучению особенностей формирования размерной структуры древостоев под действием факторов среды и хозяйственной деятельности человека посвящено множество публикаций [7–23], поскольку это важно для оценки ресурсной ценности насаждений, их жизнеспособности и возможностей дальнейшего развития, а также решения других лесоводственных задач. Большинство авторов отмечают очень большую вариабельность всех статистических параметров рядов распределения деревьев по их размерам. Ни в одной работе авторы не заостряют, однако, внимания на биологическом смысле статистических параметров размерной структуры древостоев, ограничиваясь в основном только констатацией их абсолютной величины, определяющей производительность насаждений, и сопоставлением значений с моделью так называемого нормального распределения, при котором A и E = 0. Следует отметить, однако, что это распределение, впервые выявленное Муавром в 1733 году в связи с исследованием предела биномиального распределения и вновь обнаруженное в 1809 году Гауссом, а в 1812 году также Лапласом в связи с их работой по теории ошибок наблюдений [24], является лишь предельной идеальной формой отображения вероятности встречаемости той или иной величины какого-либо признака в оцениваемой совокупности его значений. Оно соответствует тому случаю, когда все факторы, действующие на систему, уравновешивают друг друга по силе и ис-

пользуются для сравнения теоретических данных с фактическими. Различия в этом случае отражают лишь ошибку в оценке статистических параметров, а не явное проявление особенностей внутренней структуры объекта. Преобладание воздействия на систему какого-либо одного фактора над другими приводит к деформации нормального распределения и превращения его в иную форму.

Цель исследования – усовершенствование приёмов использования параметров размерной структуры одновозрастных древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для оценки их текущего состояния и перспектив дальнейшего развития, а также для выбора ценных в селекционном отношении ценопопуляций.

Материал и методы исследования

Данные для анализа собраны на 300 постоянных и временных пробных площадях, заложенных в чистых одновозрастных сосновых древостоях Республики Марий Эл, различающихся по происхождению (естественные постпирогенные и лесные культуры), возрасту (от 12 до 120 лет), густоте (от 0,5 до 103 тыс. экз./га) и условиям произрастания, каждая из которых включала не менее 200 живых деревьев, разбитых при учёте на ступени толщины и классы развития Г. Крафта. На 17 постоянных пробных площадях с полностью пронумерованными деревьями (рис. 1) периодически измеряли длину окружности ствола и оценивали величину текущего прироста по диаметру. Продолжительность наблюдений на стационарных объектах составляла от 10 до 40 лет.

Для анализа особенностей формирования размерной структуры древостоев использовали следующие параметры рядов распределения величины диаметра стволов и их текущего прироста: минимальное, максимальное и среднее арифметическое значение, размах изменения, среднеквадратическое (стандартное) отклонение, медиану, коэффициенты вариации, асимметрии и эксцесса, а также отношение среднего арифметического значения к медиане, максимального и минимального к среднему. Статистическую обработку цифрового материала провели стандартными методами биометрии [24–27] на ПК с использованием пакета прикладных программ Excel и Statistica-6.

Рис. 1. Общий вид древостоя на постоянных пробных площадях в сосняках лишайниковом и мшистом

Fig. 1. General view of a stand growing on permanent sample plots in lichen and mossy pine forests

Результаты и их обсуждение

Анализ эмпирического материала показал, что все деревья в обследованных нами одновозрастных ценопопуляциях сосны обыкновенной, под которыми понимается совокупность особей, обитающих в пределах одного экотопа и активно взаимодействующих между собой в процессе своего развития, сильно различаются меж-

ду собой по размерам и темпам роста. Различаются между собой, однако, не только деревья, но и ценопопуляции в целом, что связано с характером представленности в них деревьев разных размерных групп (табл. 1). Так, к примеру, доля сверхгосподствующих и господствующих деревьев, относящихся к I и II классам Крафта, по числу стволов невелика, однако по площади сечения стволов и массе хвои, а значит и роли в функционировании биогеоценозов, она составляет в среднем около 50 %, достигая в ряде случаев даже 80 %. Доля же деревьев IV–V классов Крафта, не имеющих особых перспектив развития, составляет по числу стволов в среднем 31,6 %, а по площади их сечения всего лишь 12,3 %. В большинстве древостоев преобладают деревья среднего рангового положения, однако долевое участие деревьев разных социальных классов, как и их относительные размеры (табл. 2), очень сильно варьируют в исследованной группе ценопопуляций, что обусловлено особенностями их генотипической структуры [12, 18, 28], а также с субъективными ошибками глазомерной оценки, избежать которых невозможно. Особенно велика изменчивость относительного диаметра ствола у сверхгосподствующих деревьев, меньше же всего варьирует величина этого параметра у деревьев III класса роста.

Таблица 1. **Доля деревьев сосны разных классов Крафта в сложении структуры ценопопуляций**
Table 1. The proportion of pine trees of different Kraft classes in the overall structure of cenopopulations

Параметр структуры	Доля деревьев разных классов Крафта в ценопопуляциях, % (n = 125)				
	I	II	III	IV	V
Число деревьев	8,4 ± 0,5 0,5 – 33,9	19,9 ± 0,6 5,7 – 39,6	40,2 ± 0,9 21,2 – 77,3	22,5 ± 0,7 1,1 – 42,0	9,1 ± 0,5 0,0 – 24,1
Площадь сечения стволов	18,8 ± 0,9 1,7 – 47,7	30,7 ± 0,6 9,9 – 47,7	38,3 ± 1,0 12,4 – 76,0	10,7 ± 0,5 0,7 – 33,4	1,6 ± 0,1 0,0 – 6,5
Масса хвои деревьев	16,1 ± 0,8 1,4 – 43,9	28,4 ± 0,6 9,1 – 44,2	39,6 ± 1,0 14,2 – 77,6	13,2 ± 0,6 0,7 – 35,1	2,7 ± 0,2 0,0 – 8,2

Примечание: над чертой – среднее значение и его ошибка, под чертой – пределы изменчивости.

Таблица 2. **Статистические показатели относительного диаметра деревьев разных классов роста**
Table 2. Statistics of the relative diameter of trees of different growth classes

Статистический показатель*	Значения статистических показателей у деревьев разных классов Крафта (n = 125)				
	I	II	III	IV	V
M ± m	153,7 ± 1,3	125,9 ± 0,9	97,5 ± 0,7	66,7 ± 0,8	40,2 ± 1,2
min	115,9	95,8	80,6	40,9	19,1
max	202,6	156,6	125,6	89,2	67,1
Размах	86,7	60,8	45,0	48,3	48,0
CV	9,5	9,1	7,6	13,8	32,2

***Примечание:** $M_x \pm m_x$ – среднее значение показателя и его ошибка относительно среднего диаметра древостоя, %; min, max – минимальное и максимальное значения в выборке, %; CV – коэффициент вариации, %.

Долевое участие деревьев разных классов Крафта в сложении древостоев довольно чётко отражает, по нашему мнению, текущее состояние жизнеспособности одновозрастных ценопопуляций сосны обыкновенной и определяет перспективы их развития. Для этой цели лучше всего использовать долю в них деревьев IV–V классов, опираясь на следующую шкалу значений индекса жизнеспособности (ИЖД):

1) ИЖД < 10 % – жизнеспособность ценопопуляции очень высокая, а перспективы её развития хорошие без проведения какого-либо лесоводственного ухода;

2) ИЖД 10–20 % – жизнеспособность ценопопуляции высокая и перспективы её развития хорошие, требуется проведение лишь незначительного лесоводственного ухода;

3) ИЖД 20–30 % – жизнеспособность ценопопуляции средняя, для повышения которой требуется удаление наиболее ослабленных и отставших в росте деревьев;

4) ИЖД 30–40 % – жизнеспособность ценопопуляции низкая и для её повышения требуется скорейшее удаление большого количества отставших в росте деревьев;

5) ИЖД > 40 % – жизнеспособность ценопопуляции очень низкая и перспективы её развития плохие даже при проведении интенсивного лесоводственного ухода.

Величина среднего диаметра деревьев разных классов (d_k, см), как показали расчёты, довольно чётко изменяется с возрастом древостоев (A, лет), что с высокой достоверностью ($p < 0{,}001$) описывает уравнение $d_k = K\times[1 - \exp(-a\times10^{-3}\times A)]^b$, параметры которого представлены в таблице 3. Установлено также, что средний диаметр деревьев каждого класса очень тесно связан со средним диаметром всего древостоя (D, см). Эту зависимость аппроксимирует степенное уравнение $d_k = a\times D^b$, позволяющее провести оценку ранговой структуры ценопопуляций как по материалам фактического учёта, так и данным таксационных описаний насаждений.

Оценка размерной структуры древостоя и состояния его жизнеспособности по долевому участию в нём деревьев разных социальных групп имеет, однако, большой недостаток, заключающийся в определённой субъективности их выделения, избежать которой практически невозможно. Для этой цели лучше опираться на количественные показатели, значения которых можно с требуемой точностью легко измерить и сопоставить с некоторым эталоном.

Таблица 3. **Значения параметров уравнений зависимости среднего диаметра деревьев от возраста и среднего диаметра древостоя в сосняках лишайниковых и зеленомошниковых**
Table 3. Values of the parameters in the equations of dependence of the mean diameter of trees on the age and the mean diameter of the stand in the lichen and green moss pine forests

Параметр функции	Значения параметров уравнений для деревьев разных классов Крафта				
	I	II	III	IV	V
$d_k = K\times[1 - \exp(-a\times10^{-3}\times A)]^b$					
K	44,6	38,7	31,6	23,2	13,7
a	21,47	18,74	16,01	13,28	10,55
b	1,350	1,292	1,234	1,176	1,118
R^2	0,973	0,960	0,956	0,967	0,976
$d_k = a\times D^b$					
a	1,736	1,421	1,005	0,539	0,232
b	0,937	0,940	0,987	1,115	1,301
R^2	0,975	0,984	0,986	0,984	0,957

Анализ полученного материала показал, что значения всех оцениваемых статистических количественных показателей размерной структуры одновозрастных сосняков, так же как и качественных, изменяются в очень больших пределах (табл. 4), указывая на их высокое информативное значение. Так, к примеру, текущая густота древостоев и средний диаметр деревьев могут быть использованы не только для оценки производительности древостоев, но и для оценки их текущего состояния и перспектив дальнейшего развития. Значения этих параметров необходимо в этом случае сравнивать с неким эталоном, в качестве которого могут выступать так называемые «нормальные» древостои (табл. 5 и 6), либо региональные нормативы, созданные на основе анализа материалов массовой таксации насаждений [29].

Сравнение фактических значений с эталонными позволило установить границы возможных отклонений, которые дают чёткое представление о пределах возможностей ценопопуляций к использованию ресурсов среды и реализации своего жизненного потенциала. Вариабельность нормированных значений густоты и среднего диаметра древостоев, как показал анализ эмпирического материала, наиболее велика в молодняках и неуклонно снижается по мере увеличения возраста древостоев (табл. 7). Так, к примеру, в молодых сосняках величина нормированной густоты древостоя изменяется от 0,05 до 15,7 единиц, а в старых – всего лишь от 0,76 до 1,25. Пределы же изменения нормированной величины среднего диаметра деревьев составляют соответственно 0,34–1,87 и 0,86–0,98. Особенно наглядно происходящие изменения отображает среднеквадратическое значение этих параметров, которое снижается с возрастом древостоев в 13 раз!

Таблица 4. **Пределы варьирования статистических показателей размерной структуры древостоя на объектах исследования**
Table 4. Limits of variation of statistical measures of the stand size structure at the study sites

Параметр	Значения статистических показателей (n = 300)			
	среднее	минимум	максимум	размах
Возраст древостоя, лет	39,6	12	120	108
Густота древостоя, тыс. экз./га	4,62	0,42	103,1	102,7
Нормированная густота, доля единицы	1,07	0,05	15,70	15,65
Средний диаметр деревьев, см	11,9	2,2	32,5	30,3
Медиана диаметра деревьев (Me), см	13,2	3,6	37,4	33,8
Нормированный диаметр, доля единицы	0,95	0,31	1,87	1,56
Минимальный диаметр деревьев, см	4,6	0,2	20,1	19,9
Максимальный диаметр деревьев, см	21,7	7,0	64,6	57,6
Отношение $Д_{max}$ к $Д_{min,}$ доля единицы	7,9	2,2	35,0	32,8
Минимальный ранг дерева, %	32,4	8,2	66,6	58,4
Максимальный ранг дерева, %	193,7	132,5	383,3	250,7
Размах диаметра деревьев, см	17,1	6,0	54,4	48,4
Среднеквадратическое отклонение, см	3,40	1,09	8,60	7,51
Коэффициент вариации диаметра, %	32,6	16,7	74,9	58,2
Коэффициент асимметрии	0,233	-1,140	1,348	2,488
Коэффициент эксцесса	-0,181	-1,125	1,960	3,085
Отношение $Д_{ср.}$к Me, доля единицы	0,90	0,48	1,29	0,82

Таблица 5. **Значения параметров математической модели динамики густоты сомкнутых сосновых древостоев разных классов бонитета, вычисленных по таблицам ВНИИЛМ [30]**
Table 5. Values of the parameters in the mathematical model of density dynamics in closed canopy pine stands of different growth classes (calculated using the VNIILM tables) [30]

Параметр модели	Значения параметров модели $N_i = K \times \exp[-a \times (A - b)^c]$ для разных классов бонитета				
	I	II	III	IV	V
K	9,615	13,125	17,600	10,230	16,000
a	0,201	0,203	0,216	0,140	0,165
b	10	10	10	20	20
c	0,610	0,590	0,615	0,652	0,629

Таблица 6. **Значения параметров математической модели динамики среднего диаметра деревьев в сосновых древостоях разных классов бонитета, вычисленных по таблицам ВНИИЛМ [30]**
Table 6. Values of the parameters in the mathematical model of the mean tree diameter dynamics in pine stands of different growth classes (calculated using the VNIILM tables) [30]

Параметр модели	Значения параметров модели $D_i = a \times (A - b)^c$ для древостоев разных классов бонитета				
	I	II	III	IV	V
a	1,662	1,368	1,048	0,812	0,595
b	7	8	8	9	9
c	0,663	0,676	0,697	0,711	0,730

Таблица 7. **Статистические показатели нормированных значений густоты и среднего диаметра деревьев в сосновых древостоях разного возраста на объектах исследования**
Table7. Statistics of the normalized values of the density and mean diameter of trees in the uneven-aged pine stands at the study sites

Возраст древостоя, лет	Значения статистических показателей*					
	n	среднее	min	max	размах	S_x
Нормированная густота древостоя, доля единицы						
12–20	108	1,05	0,05	15,70	15,65	1,50
21–40	65	1,01	0,10	2,68	2,58	0,50
41–60	74	1,26	0,18	7,44	7,25	1,10
61–90	33	0,84	0,37	1,70	1,34	0,23
более 90	20	0,95	0,76	1,25	0,49	0,11
Нормированный средний диаметр деревьев, доля единицы						
12–20	108	1,09	0,34	1,87	1,53	0,26
21–40	65	0,88	0,50	1,66	1,16	0,21
41–60	74	0,82	0,31	1,44	1,13	0,20
61–90	33	0,89	0,69	1,18	0,49	0,13
более 90	20	0,94	0,86	0,98	0,13	0,03

***Примечание:** n – объем выборки; S_x – среднеквадратическое (стандартное) отклонение признака.

Использование нормированной величины густоты древостоев, практически не зависящей от их возраста, позволило адекватно оценить её влияние на нормированное значение среднего диаметра деревьев, которое с высокой достоверностью ($R^2 = 0{,}683$ при $p < 0{,}001$) описывает уравнение $D_{норм.} = 2{,}265 \times \exp(-1{,}332 \times N_{норм.}^{0{,}406}) + 0{,}30$.

Величину среднего диаметра деревьев определяет не только густота древостоев, объясняющая только 68,3 % общей

дисперсии его значений, но также и потенциальные способности роста особей, которые в каждой из ценопопуляций могут быть разными в зависимости от сложившихся условий и характера представленности генотипов. Об этом же свидетельствует, в частности, большой размах величины редукционных чисел, т. е. минимального и максимального значений рангового положения деревьев в ценопопуляциях (табл. 8), не зависящих от их нормированной густоты. Для оценки состояния ценопопуляций представленный диапазон значений параметров целесообразно разбить на пять градаций и создать соответствующую шкалу индексов.

Важную информацию об особенностях размерной структуры древостоев и их состоянии несут также параметры, характеризующие диапазон варьирования в них диаметра деревьев: среднеквадратическое отклонение (S_d, см) и размах ($\lim D$, см). Расчёты показали, что их значения во многом детерминируют возраст (A, лет) и густота (N, тыс. экз./га) древостоев, что с высокой достоверностью аппроксимируют следующие уравнения регрессии:

$$S_d = 0{,}325 \times (A - 10)^{0{,}696} \times \exp(-0{,}515 \times N) + 1{,}48; \quad R^2 = 0{,}887;$$

$$\lim D = 2{,}871 \times A^{0{,}569} \times \exp(-0{,}266 \times N); \; R^2 = 0{,}806.$$

Значения этих параметров, как следует из представленных уравнений, которые можно использовать в качестве эталонов сравнения, разбив на ряд классов, возрастают по мере увеличения возраста древостоев и снижаются по мере роста их густоты. Величина остаточной дисперсии значений параметров связана с внутренними свойствами ценопопуляций, в том числе с наследственными свойствами особей.

Информацию об изменчивости размерной структуры древостоев отражает также коэффициент вариации диаметра деревьев в них (CV, %), однако возраст и густота ценопопуляций определяют только 47,9 % дисперсии его величины, описываемой уравнением регрессии

$$CV = 29{,}9 \times \exp(-1{,}62 \times 10^{-2} \times A) \times N^{0{,}339} + 16{,}2.$$

Для оценки состояния ценопопуляций по данному параметру в качестве эталона сравнения лучше использовать шкалу, созданную на основе собранного нами эмпирического материала (табл. 9).

Таблица 8. **Статистические показатели относительной величины минимального и максимального диаметра деревьев в сосновых древостоях разного возраста на объектах исследования**
Table 8. Statistics of the relative value of the minimal and maximal tree diameter in the uneven-aged pine stands at the study sites

Возраст древостоя, лет	Значения статистических показателей				
	среднее	min	max	размах	S_x
Относительная величина минимального диаметра деревьев, в % от среднего					
12–20	20,0	9,1	51,1	42,0	6,3
21–40	29,7	8,2	56,3	48,1	14,0
41–60	40,7	25,6	60,6	35,0	8,1
61–90	45,8	18,8	63,2	44,5	11,3
более 90	54,7	41,1	66,6	25,6	5,9
Относительная величина максимального диаметра деревьев, в % от среднего					
12–20	204,9	138,2	318,2	180,0	32,1
21–40	194,3	132,5	239,6	107,1	24,1
41–60	193,0	143,6	383,3	239,6	42,8
61–90	178,5	141,0	223,7	82,7	23,5
более 90	159,6	148,0	181,4	33,4	9,1

Таблица 9. **Шкала для оценки размерной структуры ценопопуляций сосны по величине значений коэффициента вариации рядов распределения в них диаметра деревьев**
Table 9. The score for assessing the size structure of pine cenopopulations based on the variation coefficients of the distribution series of tree diameters

Возраст древостоя, лет	Значения показателя в разных классах изменчивости рядов распределения				
	очень слабая	слабая	средняя	высокая	очень высокая
15–30	< 20	20–30	30–40	40–50	> 50
31–50	< 20	20–28	28–36	36–44	> 44
51–80	< 20	20–26	26–32	32–38	> 38
более 80	< 20	20–24	24–28	28–32	> 32

Величина коэффициента асимметрии рядов распределения диаметра, которая также отражает информацию об особенностях размерной структуры древостоев, изменяется с их возрастом нелинейно: в среднем она наиболее велика в 60…90 лет (табл. 10). Размах же значений параметра с увеличением возраста ценопопуляций в целом снижается. Величина коэффициента эксцесса рядов распределения в среднем всегда имеет отрицательные значения, экстремумы которых отмечаются в древостоях молодого и зрелого возраста, а размах значений параметра неуклонно снижается по мере взросления древостоев. Для оценки состояния ценопопуляций представленный диапазон значений параметров целесообразно разбить на пять градаций и создать соответствующую шкалу индексов (табл. 11). Изменения значений анализируемых показателей происходят, как свидетельствуют исследования, в результате индивидуальных особенностей деревьев по темпам роста и ответных реакций на колебания климата (рис. 2), приводящих к перегруппировке рангового положения особей в ценопопуляциях.

Таблица 10. **Статистические показатели коэффициентов асимметрии и эксцесса рядов распределения диаметра деревьев в сосновых древостоях разного возраста**
Table 10. Statistics of the coefficient of skewness and coefficient of kurtosis of the distribution series of tree diameters in the uneven-aged pine stands

Возраст древостоя, лет	Значения статистических показателей				
	среднее	min	max	размах	S_x
Коэффициент асимметрии (скоса) распределения					
12–20	0,014	-1,140	1,275	2,415	0,328
21–40	0,297	-0,973	0,930	1,903	0,409
41–60	0,366	-0,567	0,842	1,409	0,291
61–90	0,406	-0,304	1,048	1,352	0,279
более 90	0,266	0,071	0,431	0,360	0,101
Коэффициент эксцесса (крутизны) распределения					
12–20	-0,331	-1,125	1,615	2,741	0,431
21–40	-0,123	-0,847	1,559	2,406	0,498
41–60	-0,116	-1,068	0,907	1,975	0,422
61–90	-0,063	-0,705	0,991	1,697	0,463
более 90	-0,272	-0,633	0,326	0,959	0,259

Таблица 11. **Шкала для оценки размерной структуры ценопопуляций сосны по величине значений коэффициентов асимметрии и эксцесса рядов распределения в них диаметра деревьев**
Table 11. The score for assessing the size structure of pine cenopopulations based on the values of the skewness and kurtosis coefficients of the tree diameter distribution series

Возраст древостоя, лет	Значения показателей по классам их изменчивости в древостоях разного возраста				
	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс
Коэффициент асимметрии					
15–30	< -1,30	от -1,30 до -0,43	от -0,43 до 0,44	от 0,44 до 1,31	> 1,31
31–50	< -0,85	от -0,85 до -0,15	от -0,15 до 0,55	от 0,55 до 1,25	> 1,25
51–80	< -0,45	от -0,45 до 0,10	от 0,10 до 0,65	от 0,65 до 1,20	> 1,20
более 80	< -0,10	от -0,10 до 0,20	от 0,20 до 0,50	от 0,50 до 0,80	> 0,80
Коэффициент эксцесса					
15–30	< -1,25	от -1,25 до -0,39	от -0,39 до 0,47	от 0,47 до 1,33	> 1,33
31–50	< -1,45	от -1,45 до -0,50	от -0,50 до 0,45	от 0,45 до 1,40	> 1,40
51–80	< -1,35	от -1,35 до -0,45	от -0,45 до 0,45	от 0,45 до 1,35	> 1,35
более 80	< -1,15	от -1,15 до -0,53	от -0,53 до 0,09	от 0,09 до 0,71	> 0,71

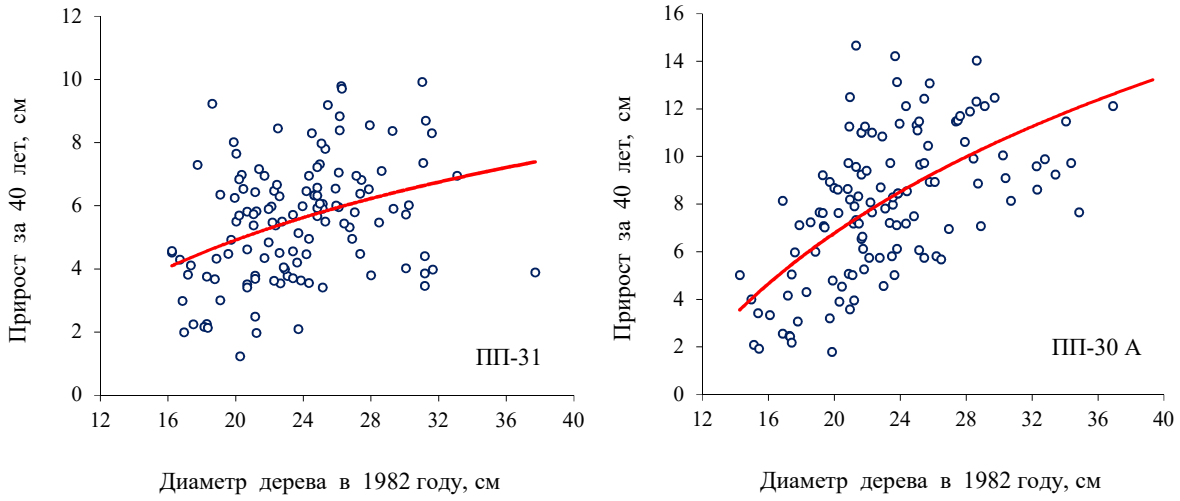

Рис. 2. Связь между диаметром ствола деревьев и его текущим приростом, оценённая по результатам многолетних измерений на постоянных пробных площадях в сосняках брусничниковых
Fig. 2. Relation between the tree trunk diameter and its current increment, based on long-term measurements on the permanent sample plots in cowberry-type pine stands

Величина прироста деревьев, как свидетельствуют приведённые выше данные, слабо зависит от их исходного диаметра на момент начала наблюдений, хотя в целом отмечается небольшой положительный тренд, описываемый уравнением $\Delta D = a \times (D - b)^c$, значения параметров которого варьируют в очень больших пределах (табл. 12), определяемых особенностями сложения ценопопуляций. Исследования показали также, что наиболее угнетённые в ценопопуляции деревья в последний этап своей жизни, продолжающийся иногда до 10–15 и более лет, не образуют годичных колец, а диаметр у отмирающих особей за счёт потери влажности древесины даже снижается.

Таблица 12. **Значения параметров уравнения, аппроксимирующего прирост ствола от исходного диаметра деревьев, полученные на основе многолетних наблюдений на объектах исследования**
Table 12. Values of the parameters in the equation approximating the trunk increment relative to the initial tree diameter (obtained from long-term observations at the study sites)

Статистический показатель	Значение параметров уравнения $\Delta D = a \times (D - b)^c$			
	a	b	c	R^2
Среднее арифметическое	2,140	11,3	0,421	0,299
Минимальное значение	0,147	6,7	0,208	0,142
Максимальное значение	5,772	14,9	0,804	0,508
Размах значений	5,625	8,2	0,596	0,366

Расчёты показали, что значения параметров этого уравнения, имеющие конкретный биофизический смысл, зависят от продолжительности периода между измерениями диаметра деревьев (T, лет) и их возраста на момент начала наблюдений (A, лет), что аппроксимирует следующий набор уравнений множественной регрессии:

$$a = 2{,}04 + 9{,}98 \times 10^{-2} \times T - 3{,}05 \times 10^{-2} \times A;$$
$$R^2 = 0{,}589;$$

$$b = 5{,}80 + 6{,}44 \times 10^{-2} \times T + 5{,}91 \times 10^{-2} \times A;$$
$$R^2 = 0{,}297;$$

$$c = 0{,}34 - 6{,}80 \times 10^{-3} \times T + 3{,}35 \times 10^{-3} \times A;$$
$$R^2 = 0{,}356.$$

Параметр c уравнения тесно связан, в свою очередь, с параметром a, что с высокой достоверностью ($p < 0{,}001$) описывает соответствующее математическое уравнение:

$$c = 0{,}169 + 0{,}512 \times \exp(-0{,}382 \times a);$$
$$R^2 = 0{,}736.$$

Отклонение фактических значений прироста от расчётных, описываемых для каждой ценопопуляции соответствующими математическими уравнениями, изменяется от 0 до 220 %, распределение которых в выборках почти во всех случаях практически подчиняется закону Гаусса–Лапласа (рис. 3), что свидетельствует об адекватности выбранной формы математической модели.

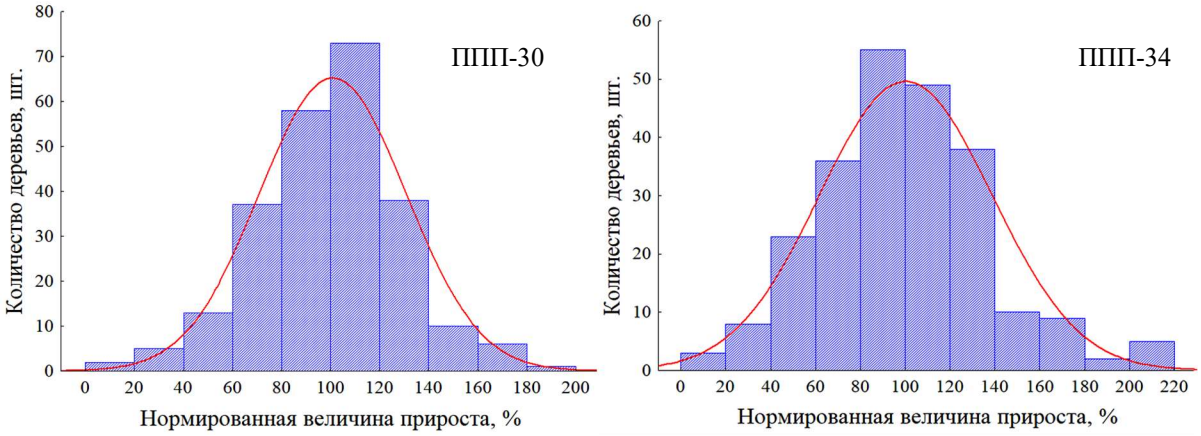

Рис. 3. Характер распределения отклонения фактических значений прироста диаметра ствола деревьев за 20 лет наблюдений на объектах исследования от расчётных
Fig. 3. Pattern of the distribution of deviations of the actual values from the calculated values of tree trunk diameter increment over 20 years of observations at the study sites

Заключение

Результаты исследований показали, таким образом, что все деревья в обследованных нами одновозрастных ценопопуляциях сосны обыкновенной сильно различаются между собой не только по размерам, но и темпам роста. В результате этого происходит непрерывная перестройка размерной структуры древостоя, описываемой целым комплексом различных показателей, каждый из которых имеет сугубо специфичное информационное значение. Текущая размерная структура древостоя – временной срез длительных медленно протекающих в нём процессов взаимодействия деревьев между собой и с другими элементами ценоза, а также с внешней средой, характеризующих внутреннее разнообразие ценопопуляции, обеспечивающих её устойчивое развитие, поставляя материал для естественного отбора особей. Внутреннее разнообразие ценопопуляций является также материалом для искусственного отбора деревьев, т. е. целенаправленной их селекции по хозяйственно важным признакам.

Для адекватной оценки текущего состояния ценопопуляций и определения перспектив их дальнейшего развития величину параметров размерной структуры всегда необходимо сравнивать с эталоном, в качестве которого могут выступать их значения, присущие либо региональным модальным насаждениям, либо так называемым «нормальным» древостоям. Сравнение фактических значений параметров с эталонными позволили нам установить границы возможных отклонений и создать соответствующие шкалы, которые дают чёткое представление о пределах возможностей ценопопуляций к использованию ресурсов среды и реализации своего жизненного потенциала. Установлено, что надёжной основой для получения новых знаний о закономерностях динамики формирования размерной структуры древостоев является сеть стационарных пробных площадей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Свидерский В. И.* О диалектике элементов и структуры в объективном мире и в познании. М.: Соцэкгиз, 1962. 275 с.

2. *Демаков Ю. П.* Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методические аспекты. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл, 2000. 415 с. EDN: WKWHSZ

3. *Животовский Л. А.* Интеграция полигенных систем в популяциях. Проблемы анализа комплекса признаков. М.: Наука, 1984. 183 с.

4. *Сукачев В. Н.* Растительные сообщества (введение в фитоценологию). Л.-М.: Книга, 1928. 232 с.

5. *Нестеров В. Г.* Вопросы современного лесоводства. М.: Сельхозгиз, 1961. 384 с.

6. *Белов С. В.* Лесоводство. М.: Лесная промышленность, 1983. 352 с.

7. *Демаков Ю. П., Нуреева Т. В.* Закономерности изменения рангового положения деревьев по их размерам в ценопопуляциях сосны обыкновенной // Лесоведение. 2019. № 4. С. 274–285. DOI: 10.1134/S0024114819030021; EDN: YHNVIT

8. *Свалов Н. Н.* Моделирование производительности древостоев и теория лесопользования. М.: Лесная промышленность, 1979. 216 с.

9. *Маслаков Е. Л.* Формирование сосновых молодняков. М.: Лесная промышленность, 1984. 165 с.

10. *Лебков В. Ф.* Типы строения древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 12–21.

11. *Лебков В. Ф.* Динамика распределения деревьев сосны по морфологическим показателям ствола и кроны // Лесоведение. 1990. № 5. С. 57–69.

12. *Романовский М. Г.* Полиморфизм древесных растений по количественным признакам. М.: Наука, 1994. 96 с.

13. *Набатов Н. М., Свалов Н. Н.* Статистики строения древостоев в оценке их продуктивности // Лесное хозяйство. 1996. № 2. С. 41–43.

14. *Гурьянов М. О.* Анализ процессов формирования размерной структуры древостоев методом синергетики // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2002. № 168. С. 60–67. EDN: HYWHVX

15. *Цветков В. Ф.* Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех. ун-та, 2002. 380 с.

16. *Lilja S., Kuuluvainen T.* Structure of old Pinus sylvestris dominated forest stands along a geographic and human impact gradient in mid-boreal Fennoscandia // Silva Fennica. 2005. Vol. 39, iss. 3. Pp. 407–428. DOI: 10.14214/SF.377

17. Типы размерной и виталитетной структуры ценопопуляций Pinus sylvestris (Pinaceae) в условиях северной тайги (Кольский п-ов) / В. В. Горшков, Н. И. Ставрова, П. Н. Катюнин и др. // Растительные ресурсы. 2013. Т. 49, № 4. С. 512–531. EDN: RCFEVF

18. *Романовский М. Г., Щекалев Р. В.* Система вида у древесных растений. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 212 с.

19. *Кутявин И. Н.* Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 176 с. DOI: 10.31140/book-2018-02

20. *Манов А. В., Кутявин И. Н.* Размерная, возрастная и пространственная структура древостоев постпирогенных среднетаёжных сосняков на автоморфных почвах (на примере Республики Коми) // Сибирский лесной журнал. 2019. № 6. С. 100–110. DOI: 10.15372/SJFS20190611; EDN: BFNNBT

21. Prediction of Diameter Distributions with Multimodal Models Using LiDAR Data in Subtropical Plant-ed Forests / Z. Zhang, L. Cao, C. Mulverhill et al. // Forests. 2019. Vol. 10, iss. 2. Art. 125. DOI: 10.3390/f10020125

22. *Ставрова Н. И., Горшков В. В., Катюнин П. Н.* Разнообразие размерной структуры средневозрастных сосновых (*Pinus sylvestris* L.) древостоев в условиях северной тайги (Мурманская область) // Труды Кольского научного центра РАН. 2021. Т. 12, № 6. С. 51–56. DOI: 10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.006; EDN: SULUJE

23. *Кутявин И. Н., Манов А. В.* Динамика размерной и возрастной структуры древостоев коренных сосняков Северного Предуралья // Лесоведение. 2022. № 5. С. 504–519. DOI: 10.31857/S0024114822040064; EDN: ERCOJQ

24. *Крамер Г.* Математические методы статистики / пер. с англ. А. С. Монина, А. А. Петрова; под ред. А. Н. Колмогорова. 2-е изд. М.: Мир, 1975. 648 с.

25. *Лакин Г. Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1980. 293 с.

26. *Зайцев Г. Н.* Математический анализ биологических данных. М.: Высшая школа, 1991. 182 с.

27. *Гринин А. С., Орехов Н. А., Новиков В. Н.* Математическое моделирование в экологии. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 269 с.

28. *Санников С. Н., Петрова И. В.* Дифференциация популяций сосны обыкновенной. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 248 с.

29. *Демаков Ю. П.* Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл: монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. 432 с. EDN: YOSWWD

30. Лесотаксационный справочник / Б. И. Грошев, С. Г. Синицын, П. И. Мороз, И. П. Сеперович. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.

Статья поступила в редакцию 15.09.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 25.11.2024

Информация об авторах

ДЕМАКОВ Юрий Петрович – доктор биологических наук, профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – биогеоценология, дендрохронология, почвоведение, геоэкология. Автор 370 научных публикаций, в том числе 14 монографий. SPIN-код: 1270-0945

ШЕЙКИНА Ольга Викторовна – доктор биологических наук, профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – популяционная и экологическая генетика древесных видов, использование ДНК-технологий в лесном семеноводстве и селекции древесных видов. Автор 78 научных публикаций. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7507-8588; SPIN-код: 2215-3308

ШАРАПОВ Евгений Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – неразрушающий контроль физико-механических свойств древесины и рациональное использование древесных ресурсов леса. Автор 136 научных публикаций. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6500-5377; SPIN-код: 4400-2367

КОРОЛЕВ Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник департамента научной и международной деятельности, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – термическая модификация, неразрушающий контроль и определение механических свойств древесины и древесных материалов. Автор 30 научных публикаций. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1370-1285; SPIN-код: 8836-4618

Доступность данных и материалов: наборы данных, проанализированные в ходе исследования, являются интеллектуальной собственностью авторов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article
UDC 630*181
https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.6
EDN: YZPPZM

Using the Size Structure Parameters of Stands to Assess their Current State and Development Prospects

Yu. P. Demakov ✉, O. V. Sheikina, E. S. Sharapov, A. S. Korolev
Volga State University of Technology,
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
DemakovYP@volgatech.net✉

Abstract. *Introduction.* The size structure of a stand defines its internal diversity that facilitates sustainable development of a cenopopulation by providing materials for the natural selection of specimens and their targeted artificial selection with regard to their economically important characteristics. *The aim of the study* is to improve the methods of using the size structure parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) even-aged stands in order to assess their current state and prospects for further development, as well as to identify cenopopulations valuable in terms of selective breeding. *Materials and methods.* The source material was collected from 300 permanent and temporary sample plots laid out in the even-aged pure pine stands varying in origin, age, density and growth conditions in the Republic of Mari El. On 17 permanent sample plots, circumference measurements were taken on all numbered trees and the estimation of their current diameter increment was performed periodically, every 5–10 years. The duration of observations at the stationary sites ranged from 10 to 40 years. The digital data obtained were processed on a PC using conventional methods of mathematical statistics. *Results.* The study determined the limits of variability and the key patterns of change in the values of a number of stand size structure parameters, each having its specific informative significance; relevant scores were developed for evaluating the current state and development prospects of the cenopopulations. The study has shown that a network of stationary sample plots is a reliable basis for gaining new knowledge about regularities in the dynamics of the stand size structure formation. *Conclusion.* For an adequate assessment of the current state of cenopopulations and determination of prospects for their further development, the values of size structure parameters must always be compared with a reference standard, which can be their values attributable either to regional modal stands or so-called “normal” stands.

Keywords: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.); cenopopulations; size structure; parameters; dynamics; assessment of the state; reference standards

Acknowledgments: the authors would like to thank A.V. Isaev, Candidate of Agricultural Sciences, Deputy Director for Research of the State Nature Reserve "Bolshaya Kokshaga" for his assistance in the specimen collection. The research results were obtained using the equipment of the Core Facility Centre “Ecology, Biotechnologies and Processes for Obtaining Environmentally Friendly Energy Carriers”, Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola).

Funding: this work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00220, https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/

For citation: Demakov Yu. P., Sheikina O. V., Sharapov E. S., et. al. Using the Size Structure Parameters of Stands to Assess their Current State and Development Prospects. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(4):6–21. (In Russ.). https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.6; EDN: YZPPZM

REFERENCES

1. Svidersky V. I. On the dialectic of elements and structure in the objective world and in cognition. Moscow, Socecgiz; 1962. 275 p. (In Russ.).

2. Demakov Yu. P. Diagnostics of the sustainability of forest ecosystems: methodological and methodical aspects. Yoshkar-Ola, Periodika Marij El; 2000. 415 p. EDN: WKWHSZ (In Russ.).

3. Zhivotovsky L. A. Integration of polygenic systems in populations. Problems of analyzing a complex of features. Moscow, Nauka; 1984. 183 p. (In Russ.)

4. Sukachev V. N. Plant communities (introduction to phytocenology). Leningrad-Moscow, Kniga; 1928. 232 p. (In Russ.).

5. Nesterov V. G. Issues of modern forestry. Moscow, Selhozgiz; 1961. 384 p. (In Russ.).

6. Belov S. V. Forestry. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1983. 352 p. (In Russ.).

7. Demakov Yu. P., Nureeva T. V. Features of evolution of a tree size rank in coenopopulations of Scots pine. *Russian Journal of Forest Science*. 2019;(4):274–285. DOI: 10.1134/S0024114819030021; EDN: YHNVIT (In Russ.).

8. Svalov N. N. Modeling forest stand productivity and forest management theory. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1979. 216 p. (In Russ.).

9. Maslakov E. L. Formation of young pine stands. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1984. 165 p. (In Russ.).

10. Lebkov V. F. Types of forest stand structure. *Russian Journal of Forest Science*. 1989;(4):12–21. (In Russ.).

11. Lebkov V. F. Dynamics of the distribution of pine trees according to the morphological indicators of the trunk and crown. *Russian Journal of Forest Science.* 1990;(5):57–69. (In Russ.).

12. Romanovsky M. G. Polymorphism of woody plants according to quantitative traits. Moscow, Nauka; 1994. 96 p. (In Russ.).

13. Nabatov N. M., Svalov N. N. Statistics of the structure of forest stands in assessing their productivity. *Lesnoe Hozjajstvo*. 1996;(2):41–43. (In Russ.).

14. Gurjanov M. O. Analysis of the processes of formation of the dimensional structure of tree stands using the synergetics method. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*. 2002;(168): 60–67. EDN: HYWHVX (In Russ.).

15. Tsvetkov V. F. Pine forests of the Kola forest growing region and the system of farming in them. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University; 2002. 380 p. (In Russ.).

16. Lilja S., Kuuluvainen T. Structure of old Pinus sylvestris dominated forest stands along a geographic and human impact gradient in mid-boreal Fennoscandia. *Silva Fennica*. 2005;39(3):407–428. DOI: 10.14214/SF.377

17. Gorshkov V. V., Stavrova N. I., Katjunin P. N. et. al. Types of size and vitality structure of *Pinus sylvestris (Pinaceae)* coenopopulations in northern taiga (Kola Peninsula). *Rastitelnye Resursy*. 2013;49(4): 512–531. EDN: RCFEVF (In Russ.).

18. Romanovsky M. G., Shchekalev R. V. Species system in woody plants. Moscow, KMK Scientific Press Ltd.; 2014. 212 p. (In Russ.).

19. Kutyavin I. N. Pine forests of the Northern Cis-Urals: structure, growth, productivity. Syktyvkar, IB Komi SC UB RAS; 2018. 176 p. DOI: 10.31140/book-2018-02 (In Russ.).

20. Manov A. V., Kutyavin I. N. Dimensional, age and spatial structure of middle taiga postfire pine stands on automorphic soils (on the example of Komi Republic). *Siberian Journal of Forest Science*. 2019;(6):100–110. DOI: 10.15372/SJFS20190611; EDN: BFNNBT (In Russ.).

21. Zhang Z., Cao L., Mulverhill C. et. al. Prediction of diameter distributions with multimodal models using LiDAR data in subtropical planted forests. *Forests*. 2019;10(2):Art.125. DOI: 10.3390/f10020125

22. Stavrova N. I., Gorshkov V. V., Katyunin P. N. Variety of size structure of middle-aged pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the northern taiga (Murmansk Region). *Transactions Kola Science Centre. Applied Ecology of the North*. 2021;12(6): 51–56. DOI: 10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.006; EDN: SULUJE (In Russ.).

23. Kutyavin I. N., Manov A. V. Size and age structure dynamics in native pine forests of the Northern Cis-Urals region. *Russian Journal of Forest Science*. 2022;(5):504-519. DOI: 10.31857/S0024114822040064; EDN: ERCOJQ (In Russ.).

24. Cramer H. Mathematical methods of statistics. Transl. from English by A. S. Monin and A. A. Petrov; A. N. Kolmogorov (ed.). 2nd edition. Moscow, Mir; 1975. 648 p. (In Russ.).

25. Lakin G. F. Biometrics. Moscow, Vysshaya Shkola; 1980. 293 p. (In Russ.).

26. Zaitsev G. N. Mathematical analysis of biological data. Moscow, Vysshaya Shkola; 1991. 182 p. (In Russ.).

27. Grinin A. S., Orekhov N. A., Novikov V. N. Mathematical modeling in ecology. Moscow, YUNITI-DANA; 2003. 269 p. (In Russ.).

28. Sannikov S. N., Petrova I. V. Differentiation of Scots pine populations. Ekaterinburg, Ural Branch of RAS; 2003. 248 p. (In Russ.).

29. Demakov Yu. P. Structure and regularities of forest development in Mari El Republic. Monograph. Yoshkar-Ola, VSUT Publ.; 2018. 432 p. EDN: YOSWWD (In Russ.).

30. Groshev B. I., Sinitsyn S. G., Moroz P. I. et al. Forest taxation guide. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1980. 288 p. (In Russ.)

The article was submitted 15.09.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 25.11.2024

Information about the authors

Yuri P. Demakov – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Chair of Forest Plantations, Selection and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – biogeocenology, dendrochronology, soil science, geoecology. Author of 370 scientific publications including 14 monographs. SPIN: 1270-0945

Olga V. Sheikina – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – population and ecological genetics of woody species, use of DNA technologies in forest seed production and tree species selection. Author of 78 scientific publications. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7507-8588; SPIN: 2215-3308

Evgenii S. Sharapov – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Structural Engineering and Water Supply, Volga State University of Technology. Research interests – nondestructive testing and evaluation of wood. Author of 136 scientific publications. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6500-5377; SPIN: 4400-2367

Alexander S. Korolev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Research and International Affairs, Volga State University of Technology. Research interests – thermal modification, nondestructive testing and determination of mechanical properties of wood and wood materials. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1370-1285; SPIN: 8836-4618

Availability of data and materials. Data sets analyzed during the study are the intellectual property of the authors.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the paper preparation.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.
All authors read and approved the final manuscript.