

## Методика построения стохастических моделей структуры древостоя по толщине при проектировании лесных машин

*И. Р. Шегельман, П. В. Будник, И. А. Хюннинен*

*Петрозаводский государственный университет*

**Аннотация:** Параметры лесозаготовительных машин определяются характеристиками предмета труда, в частности размерами деревьев. В древостоях размеры деревьев варьируются и имеют стохастический характер. Это приводит к сложности определения расчетного дерева для валочной машины или вычислению массы древесины, перемещаемой транспортной машиной. Проблема осложнена тем, что конструкция лесной машины должна обеспечивать эффективность работы в различных древостоях. Решение задачи определения расчетных характеристик предмета труда (характеристик, определяющих значения внешних сил, действующих на лесную машину) может быть основано на анализе закономерностей в структуре древостоев по толщине. Цель данного исследования является описание методики построения стохастических моделей структуры древостоя по толщине при проектировании лесных машин и примера ее приложения. Предложенная методика позволяет сформировать стохастическую модель структуры древостоя по толщине для исследуемой лесной территории и охватывает процедуры от сбора исходных данных до получения алгоритма генерации диаметра дерева. Алгоритмы генерации, получаемые по методике, могут найти свое применение при разработке имитационных моделей для проведения экспериментов на ЭВМ, направленных на расчет оптимальных параметров лесных машин.

**Ключевые слова:** проектирование лесных машин, стохастическое моделирование, структура древостоя по толщине, распределение диаметров деревьев, имитационное моделирование, вычислительный эксперимент на ЭВМ

### Введение

Проектирование эффективных сложных технических систем, требует решения не только широкого круга проектно-конструкторских задач, но и научно-исследовательских задач прикладного характера [1]. Такой широкий спектр привел к интеграции в проектно-конструкторскую деятельность применение методов математического моделирования тесно связанных с компьютерными технологиями [2].

Приложение математических методов при проектировании технических систем весьма разнообразно [3]. В лесной промышленности для разработки новых образцов техники и совершенствования существующих математические методы применяются для моделирования внешней среды [4, 5], взаимодействия технической системы (машины или ее части) с внешней средой [6 – 9], функционирования технической системы путем отражения взаимосвязей отдельных ее частей их изменение во времени [10, 11], режимов работы технических системы [12] и др. Такого рода модели позволяют определять

---

рациональные, в том числе и оптимальные, значения конструктивных и технологических параметров проектируемых конструкций.

Параметры лесозаготовительных машин в первую очередь определяются характеристиками предмета труда, в частности размерами деревьев, с которыми машина будет взаимодействовать в процессе ее эксплуатации и которые задают значения внешних силы, действующих на нее. В древостоях размеры деревьев варьируются и имеют стохастический характер. Это приводит к сложности определения расчетного дерева для валочной машины или вычислению массы древесины (воза сортиментов, пачки деревьев или хлыстов), перемещаемой транспортной машиной. Проблема осложнена тем, что конструкция лесной машины должна обеспечивать эффективность работы в различных древостоях.

По нашему мнению, решение задачи определения расчетных характеристик предмета труда (характеристик, определяющих значения внешних сил, действующих на лесную машину) может быть основано на анализе закономерностей в структуре древостоев по толщине. Под структурой по толщине понимается распределение деревьев в древостое по диаметру, определяемому на высоте груди.

Диаметр дерева является важной характеристикой. Исследования в области лесоведения свидетельствуют о том, что достаточно располагать диаметром, чтобы в зависимости от породы, разряда высот и места произрастания достоверно определить все другие параметры ствола [13]. Распределение диаметров позволяет учесть стохастический характер предмета труда.

Целью данного исследования является описание методики построения стохастических моделей структуры древостоя по толщине при проектировании лесных машин и примера ее приложения.

## **Материалы и методы**

Предлагаемая методика основывается на методах статистического анализа, в частности понятиях средневзвешенной величины, вариационного ряда, теоретического закона распределения случайной величины, критерия согласия и др. В основе моделирующих алгоритмов случайных величин лежат методы монотонного нелинейного преобразования случайной величины: методы обращения и суперпозиции [14]. Кроме того, методика основывается на исследованиях в области лесоведения отечественных и

---

зарубежных специалистов А.В. Тюрина, В.К. Захарова, М.Л. Дворецкого, Ф.П. Моисеенко, А.Г. Мошкалева, Н.П. Анучина, В.С. Моисеева, М. Продана, Х. Майери др.

Методика включает в себя следующие основные этапы.

Этап 1. Сбор сведений о структурах древостоев, заключающийся в формировании вариационных рядов распределения ступеней толщины на отдельных участках леса, расположенных на рассматриваемой территории, а также в установлении соотношений пород деревьев на этих участках.

Вариационный ряд распределения ступеней толщины для отдельного участка леса представляет собой ряд распределения:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_1 & \dots & a_n \\ p_k & p_k & \dots & p_n \end{pmatrix}, \sum_{k=1}^n p_k = 1, \quad (1)$$

где  $a_1, \dots, a_n$  – ступени толщины;  $p_1, \dots, p_n$  – относительные частоты ступеней толщины.

Вариационные ряды формируются по каждой породе деревьев в отдельности.

Количество и площадь отдельных участков, с которых собираются данные о структурах древостоев, должны обеспечивать с одной стороны охват разнообразия структур рассматриваемой территории, а с другой не исказить их вероятностную картину. Другими словами, наибольшее количество участков, с которых собираются данные, должны находиться в местах с наиболее характерными типами лесов (условиями произрастания) рассматриваемой территории.

Сведения о структуре древостоя могут быть получены из нескольких источников. Во-первых, путем самостоятельной закладки пробных площадей и проведения на них измерений путем сплошного перечёта. При этом сбор сведений таким образом трудоемок и сильно зависит от размеров рассматриваемой территории. Однако характеризуется высокой степенью достоверности. Вариационные ряды при таком подходе могут представлять собой не распределение ступеней толщины, а интервальный статистический ряд, т. е. в выражении (1)  $a_1, \dots, a_n$  – середины интервалов, полученные при статистической обработке,  $p_1, \dots, p_n$  – относительные частоты интервалов. Следует отметить, что границы интервалов вариационных рядов для каждого участка должны быть идентичными.

Во-вторых, путем анализа данных со средств объективного контроля лесозаготовительных машин, работающих на рассматриваемой территории. Данный

подход позволяет собрать большой объем адекватных данных, который другими способами получить практически невозможно, при этом обеспечиваются наименьшие трудозатраты. Однако может потребовать значительных затрат времени на обработку данных, если отсутствуют программные средства анализа данных от производителя техники. При таком подходе вариационные ряды также могут представлять собой интервальные статистические ряды.

Кроме того, необходимые сведения могут быть получены из ведомостей перечета деревьев, назначенных в рубку. Такие ведомости формируются при материально-денежной оценки лесосеки. Подход является наименее трудозатратным, но адекватность данных невозможно проверить.

Соотношения пород деревьев целесообразно также представлять в виде вариационных рядов. При таком подходе в выражении (1)  $a_1, \dots, a_n$  представляют собой конкретные породы деревьев, а  $p_1, \dots, p_n$  – их процентное содержание на рассматриваемом участке леса.

Этап 2. Анализ вариационных рядов, целью которого является определение подхода к формированию обобщенных вариационных рядов. Под обобщенным вариационным рядом понимается вариационный ряд, построенный на основе средневзвешенных величин. На данном этапе для каждого участка леса осуществляется построение гистограмм, содержащих сопоставление пород деревьев и ступеней толщины, а также гистограммы соотношения пород. На основе анализа гистограмм принимается решение о возможности использования обобщенного вариационного ряда без разделения по породам или необходимости формирования нескольких обобщенных вариационных рядов по каждой породе в отдельности.

Этап 3. Формирование обобщенных вариационных рядов для стохастического моделирования ступеней толщины деревьев и их пород, заключающийся в расчете средневзвешенных величин и построении обобщенных гистограмм распределения ступеней толщины, а также обобщенной гистограммы соотношения пород.

Для построения обобщенного вариационного ряда относительные частоты появления ступени рассчитываются согласно выражениям:

$$N = \sum_{i=1}^m \frac{q_{ik}}{Q}, \quad (2)$$

$$N_j = \sum_{i=1}^m \frac{q_{ikj}}{Q_j}, \quad (3)$$

где  $N$  – частота ступени толщины без разделения по породам;  $N_j$  – частота ступени толщины для  $j$ -ой породы;  $m$  – число участков леса;  $q_{ik}$  – количество деревьев  $k$ -ой ступени толщины на  $i$ -ом участке леса;  $q_{ikj}$  – количество деревьев  $j$ -ой породы  $k$ -ой ступени толщины на  $i$ -ом участке леса;  $Q$  – суммарное количество деревьев на  $m$  участках;  $Q_j$  – суммарное количество деревьев на  $m$  участках  $j$ -ой породы.

Аналогичным образом рассчитываются частоты для обобщенного вариационного ряда соотношения пород деревьев.

Этап 4. Определение вида случайной величины, заключающийся в выборе между дискретным или непрерывным представлением распределения диаметра дерева на высоте груди. Полученные обобщённые вариационные ряды представляют собой дискретные величины. Однако при разработке алгоритма моделирования целесообразно перейти к непрерывной величине. Для этого необходимо подобрать теоретический закон распределения случайной величины, который наиболее точно описывает вариационный ряд. Для этого могут быть применены любые известные законы распределения случайных величин [14] и критерии согласия [15].

На практике может быть достаточно сложным подбор теоретического закона распределения ступени толщины ввиду формы кривой распределения. С высокой степенью достоверности распределение деревьев по диаметру в насаждениях можно описать кривой нормального распределения [16]. Однако в результате конкуренции между деревьями в смешанных насаждениях, состоящих из светолюбивых и теневыносливых древесных пород, хозяйственной деятельности и др. причин кривая распределения искажается и сильно отклоняется от кривой нормального распределения [16,17]. Это может выражаться в наличие у кривой распределения нескольких вершин [18, 19]. В таком случае можно отказаться от подбора теоретического закона распределения и рассматривать имеющееся распределение как дискретное.

Этап 5. Моделирование случайной величины, заключающееся в разработке алгоритма генерации случайной величины с заданным законом распределения с

использованием ЭВМ. Алгоритм генерации включает в себя две стадии: первая – генерация породы дерева; вторая – генерация диаметра дерева.

На первой стадии порода рассматривается как дискретная случайная величина  $\varphi$ , принимающая  $n$  значений  $a_1, \dots, a_n$  (породы в древостое) с вероятностями  $p_1, \dots, p_n$  (относительными частотами),  $\sum_{k=1}^n p_k = 1$ . Отрезок  $[0,1]$  разбивается на  $n$  последовательных отрезков  $\Delta_1, \dots, \Delta_n$ , длины которых равны соответственно вероятностям  $p_1, \dots, p_n$ . При помощи псевдослучайной величины с равномерным распределением ( $\gamma \sim \text{Rav}[a, b], a = 0, b = 1$ ) разыгрываются значения на ЭВМ. Далее принимается  $\varphi = a_k$ , если  $\gamma \in \Delta_k$ .

На второй стадии подход к генерации диаметра дерева зависит от вида распределения, полученного на этапе 4 (дискретное или непрерывное). Для моделирования непрерывной случайной величины могут применяться метод обращения, метод суперпозиции, моделирование с помощью гамма-распределения и др. методов [14].

Если на этапе 4 было принято решение о дискретном характере распределения диаметров, то в начале генерируют ступень толщины (середина интервала), а затем в ее пределах значение диаметра. Генерация ступени толщины осуществляется аналогично породе, где  $a_1, \dots, a_n$  – ступени толщины,  $p_1, \dots, p_n$  – относительные частоты их появления.

При генерации диаметра в пределах ступени толщины можно использовать псевдослучайную величину с равномерным распределением. Необходимо учитывать, что распределение стволов деревьев в их пределах необязательно равномерное. Встречаются различные типы: убывающее, равномерное, возрастающее; причем в большинстве случаев отклонение среднего диаметра деревьев в ступени от середины ступени не превышает 5% [16].

### Пример приложения методики

Методика апробирована на территории Тулоского лесничества Муезерского района Республики Карелия. На основе ведомостей перечета деревьев были собраны сведения о распределении ступеней толщины.

Пример вариационных рядов, формируемых по методике на первом этапе, приведены в таблице 1 и 2.

Таблица № 1

Вариационный ряд распределения числа деревьев по ступеням толщины для участка, расположенного в 37 квартале, делянка № 11, выдел № 36

Порода	Степень толщины, см										
	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
Сосна	0	10	38	64	54	26	9	1	0	0	0
Ель	0	23	91	153	128	61	22	1	0	0	0
Береза	0	5	18	31	27	13	4	0	0	0	0

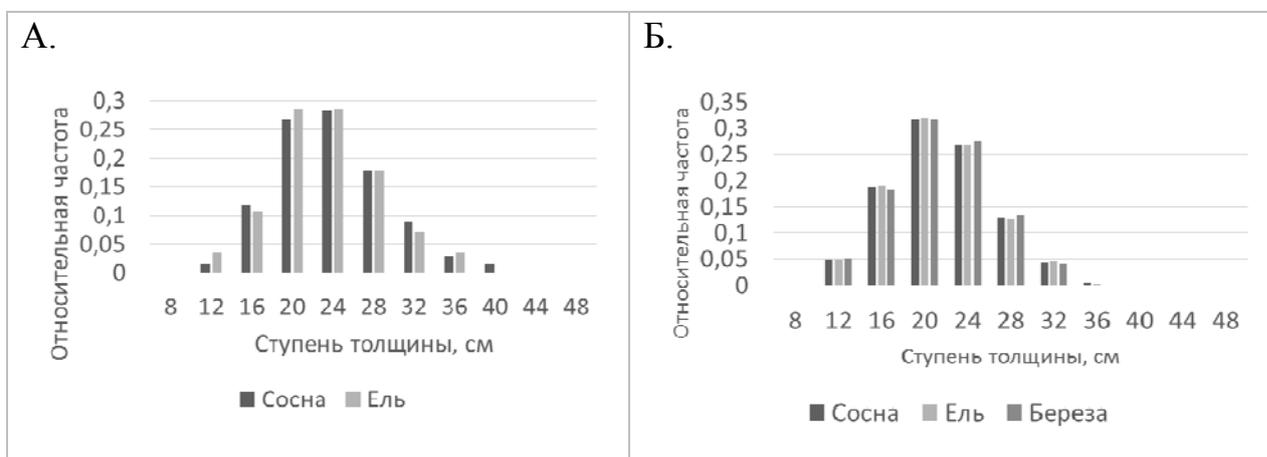
Таблица № 2

Вариационный ряд соотношения числа деревьев по породам для участка, расположенного в 37 квартале, делянка № 11, выдел № 36

Порода	Сосна	Ель	Береза
Доля содержания	0,26	0,61	0,13

На рис. 1 приведены примеры гистограмм сопоставления пород деревьев и ступеней толщины для некоторых участков Тулосского лесничества. На рис. 2 приведены примеры гистограмм соотношения пород деревьев.

Анализ гистограмм показа, что на части участков деревья различных пород имеют сходные распределения по ступеням толщины. Например, как показано на рис. 1А и 1Б. Однако на другой части участков распределения по ступеням толщины отличаются для различных пород деревьев, например, как показано на рис. 1В и 1Г. Таким образом целесообразно строить обобщенные вариационные ряды для каждой породы в отдельности.



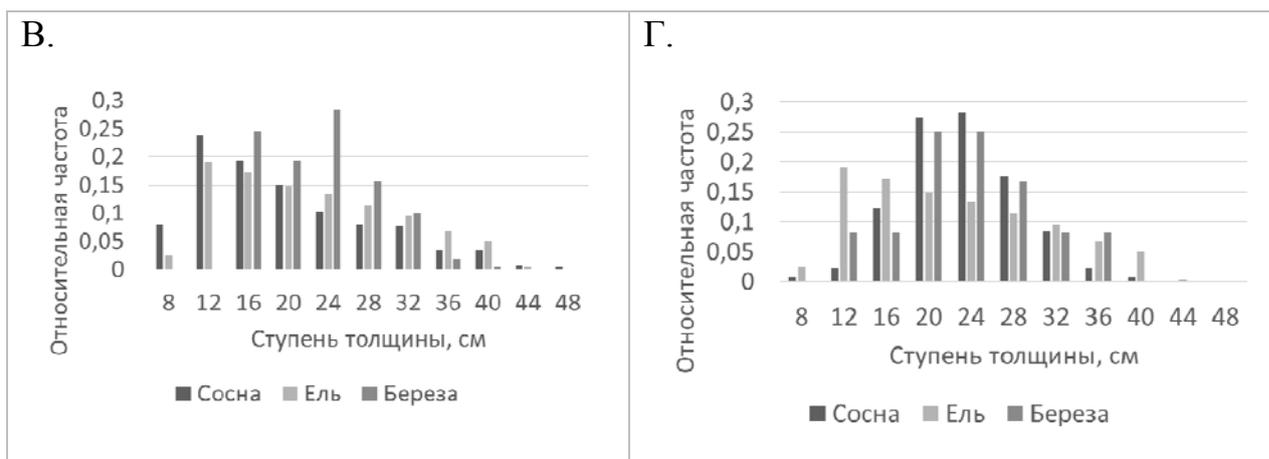
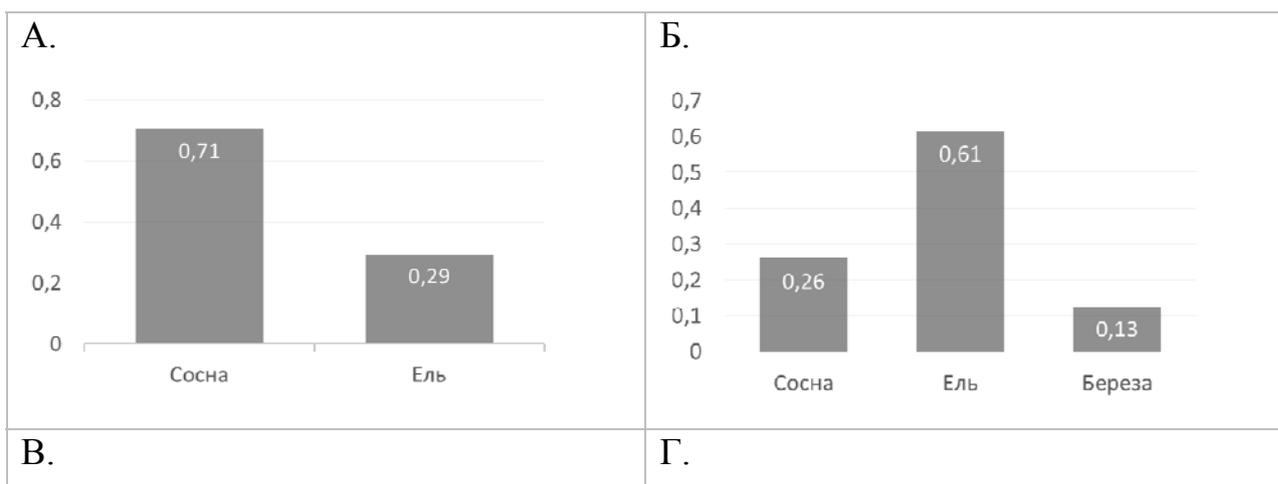


Рис. 1. – Гистограммы сопоставления пород деревьев и ступеней толщины, где А –37 квартал, делянка № 11, выдел № 35; Б –49 квартал, делянка № 4-2, выдел № 16; В –37 квартал, делянка № 11, выдел № 36; Г –37 квартал, делянка № 10, выдел № 22

Различным является соотношение пород деревьев. Однако на большей части участков преобладает ель, например, как показано на рис. 2 Б, 2В и 2Г. На небольшой части участков преобладает сосна, например, как показано на рис. 2 А. Участки с преобладанием березы отсутствовали. В целом такая картина позволяет утверждать, что обобщенный вариационный ряд соотношений пород деревьев будет в достаточной степени адекватно характеризовать рассматриваемую территорию (территорию Тулосского лесничества). В случае, когда такой зависимости не прослеживается, то можно рекомендовать выделение отдельных кластеров участков, для каждого из которых на следующем этапе рассчитываются обобщенные вариационные ряды.



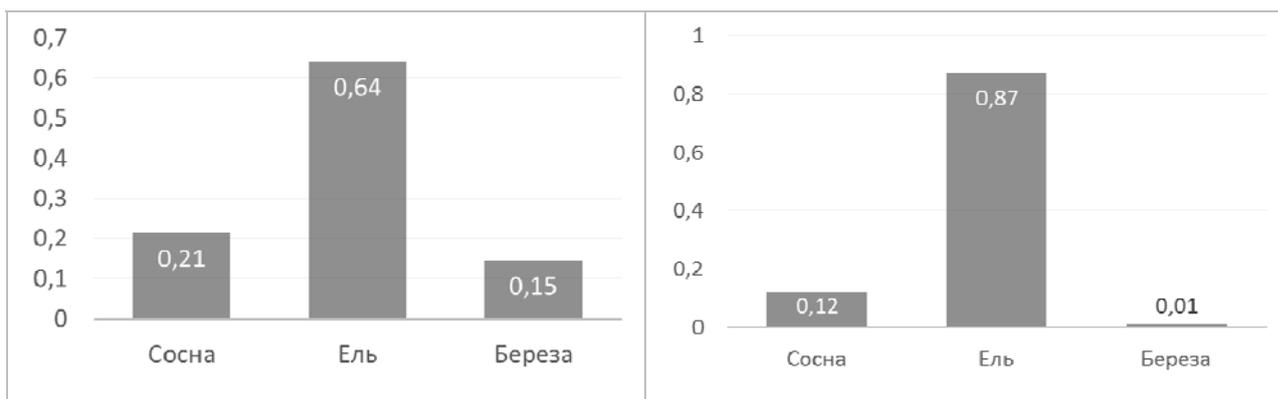


Рис. 2. – Гистограммы соотношения пород деревьев, где А – 37 квартал, делянка № 11, выдел № 35; Б – 49 квартал, делянка № 4-2, выдел № 16; В – 37 квартал, делянка № 11, выдел № 36; Г – 37 квартал, делянка № 10, выдел № 22

На основе собранных сведений согласно выражению (2) и (3) проведены расчеты и получены обобщенные вариационные ряды распределения ступеней толщины для Тулосского лесничества. На рис. 3 приведены гистограммы данных вариационных рядов.

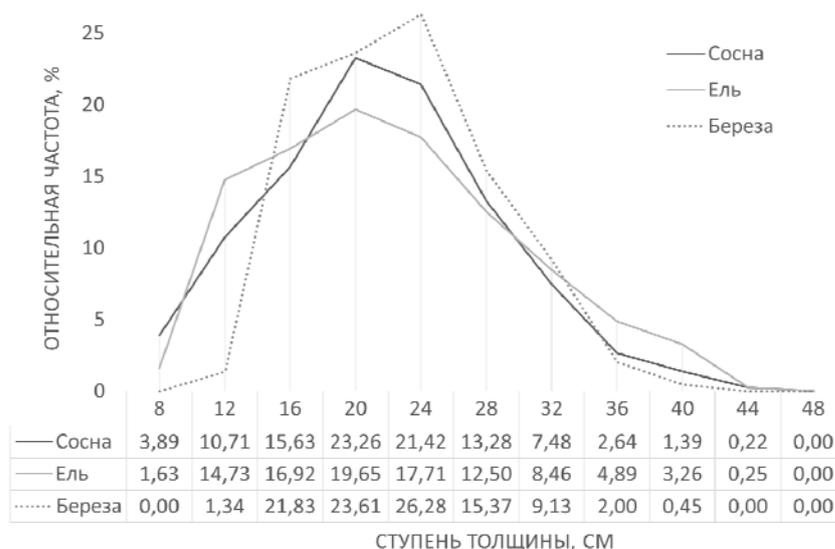


Рис.3. – Обобщенные вариационные ряды распределения ступеней толщины для Тулосского лесничества

Анализ гистограмм, приведенных на рис. 1, показал, что на рассматриваемой территории в среднем различия в распределении деревьев по ступеням толщины для разных пород не так значителен. В данной ситуации с учетом произрастающих пород для уменьшения объема дальнейших расчетов можно перейти к обобщенному вариационному ряду без разделения по породам (рис. 4).

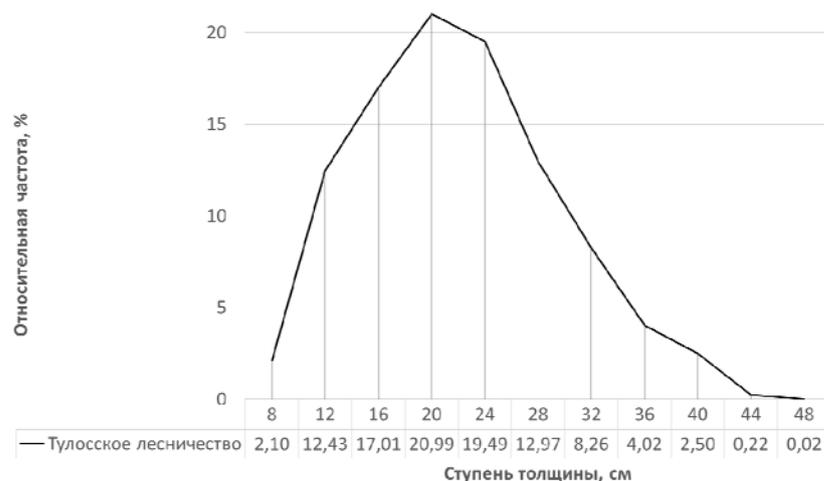


Рис.4. – Обобщенный вариационный ряд распределения ступеней толщины без разделения по породам для Тулосского лесничества

На рис. 5 приведена гистограмма для обобщенного вариационного ряда соотношения пород деревьев для Тулосского лесничества.

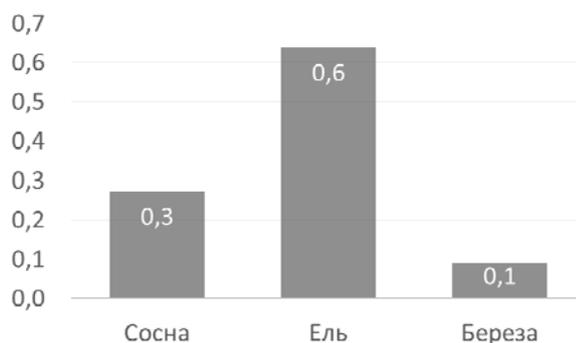


Рис. 5. – Гистограмма обобщенного вариационного ряда соотношений пород деревьев для Тулосского лесничества

Подбор теоретического закона распределения проводился с использованием программного пакета Statistica. Результаты приведены на рис. 6.

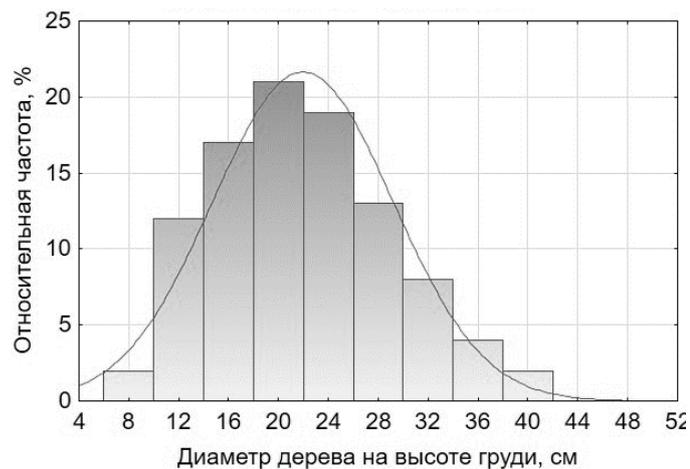


Рис. 6. – Результаты подбора теоретического закона распределения к гистограмме обобщенного вариационный ряд распределения ступеней толщины без разделения по породам для Тулосского лесничества

В качестве критерия согласия использовался критерий Пирсона  $\chi^2$ . Гипотеза о нормальном распределении диаметров принята на основе того, что  $\chi^2=0,738$  при степени свободы  $k=3$  и уровне значимости  $p=0,864$ . Распределение характеризуется математическим ожиданием 21,959 см и дисперсией 7,225 см<sup>2</sup>.

Таким образом, распределение диаметров деревьев в Тулосском лесничестве может быть описано кривой нормального распределения:

$$f(d) = \frac{1}{7,225\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d-21,959)^2}{14,45}}, \quad (4)$$

где  $f(d)$  – функция плотности распределения диаметров;  $d$  – диаметр дерева на высоте груди, см.

Для разработки алгоритма генерации случайно величины с нормальным законом распределения можно использовать различные подходы[20]: табличный метод генерации; метод генерации, использующий центральную предельную теорему; метод Мюллера. Например, при использовании метода генерации на основе центральной предельной теоремы алгоритм генерации определяется выражением:

$$d = 10,218(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6 - 3) + 21,959, \quad (5)$$

где  $\gamma_k$  случайные числа с равномерным распределением ( $\gamma_k \sim \text{Rav}[a, b], a = 0, b = 1$ ), получаемые при помощи ЭВМ.

Данный алгоритм не учитывает ограничения по ступеням толщины, т.е. при генерации могут появляться значения диаметров, которые будут выходить за границы рассматриваемых ступеней толщины. При реализации данного алгоритма на ЭВМ необходимо вводить дополнительные процедуры, позволяющие откидывать данные значения.

### Обсуждение результатов

Моделирование структуры леса для определения параметров лесных машин, оценки их производительности нашли широкое применение [20, 21] и др. Предлагаемая методика в полной мере согласуется с применяемыми в них методами. Однако такого рода исследования направлены на решение частных задач, ввиду чего в недостаточной мере уделяется внимание методологическому вопросу и не охватывается широкий круг проблем, стоящих перед исследователем при разработке стохастических моделей. Предлагаемая методика является попыткой структурирования и формализации процесса построения стохастических моделей, начиная от процедур сбора данных о распределении деревьев и заканчивая разработкой алгоритма генерации.

Достижение высокой степени формализации при построении стохастических моделей структуры древостоя по толщине является сложной научно-практической задачей. Формализация позволила бы полностью автоматизировать процесс построения стохастических моделей. При разработке методики нам не удалось достичь полной формализации. Некоторые этапы опираются на неформализованные процедуры, и их эффективность зависит от опыта исследователя. Например, определение количества и расположения площадок или принятие решений о составлении модели с разделением по породам или без такого. При описании методики мы не приводили критерии, по которым могут быть приняты те или иные решения. Обуславливается это многообразием возможных ситуаций. Мы считаем, что такие критерии должны определяться в каждом отдельном случае и будут требовать проведения процедур их обоснования.

При использовании данной методики важным вопросом является выделение территории, для которой осуществляется построение стохастической модели структуры леса. Данный вопрос является не менее сложным, чем рассмотренный нами. Однако



решение этого вопроса должно предшествовать процессу формирования стохастической модели.

Дальнейшим направлением исследований мы видим в разработке алгоритмов принятия решений при использовании данной методики, позволяющие повысить формализацию и обоснованность принятия решений при построении стохастических моделей. Развитие методики мы видим также в разработке моделей горизонтальной и вертикальной структур древостоев, включая определение формы и высоты ствола, расположение деревьев на рассматриваемой территории.

### **Заключение**

Предложенная методика позволяет сформировать стохастическую модель структуры древостоя по толщине для исследуемой лесной территории и охватывает процедуры от сбора исходных данных до получения алгоритма генерации диаметра дерева. Алгоритмы генерации, получаемые по методике, могут найти свое применение при разработке имитационных моделей для проведения экспериментов на ЭВМ, направленных на расчет оптимальных параметров лесных машин, таких как: необходимой грузоподъемности самоходного шасси, мощности двигателя и других параметров технологического оборудования, например, зажимного усилия на штоке гидроцилиндра коника трелевочного трактора.

*Исследования проведены в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации № МК-5321.2018.8.*

### **Литература**

1. Фиговский О. Л. Инновационный инжиниринг путь к реализации оригинальных идей и прорывных технологий // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321/).
2. Боргоякова Т. Г., Лозицкая Е. В. Системный анализ и математическое моделирование // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763/).
3. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем. Минск: Дизайн-ПРО, 2004. 640 с.

4. Попиков П. И., Дручинин Д. Ю., Шерстюков Н. А. Методика моделирования лесной почвы при взаимодействии с рабочими органами лесохозяйственных машин // Resources and Technology. 2017. №3. С. 1-12.
  5. Суханов Ю. В. Моделирование природно-производственных условий эксплуатации лесных машин // Resources and Technology. 2010. №. С. 149-150.
  6. Сиркин А.С., Жуков Д.В., Моделирование случайных функций микропрофиля трелевочных волоков в среде MatlabSimulink// Символ науки. 2018. №1-2. С. 31-33.
  7. Ranjbar, I. Modeling of double action discharrow draft force based on tillage depth and forward speed / I. Ranjbar, M. Rashidi, H. F. Lehmalı, M. Mirmoradi, E. Abdolalizaden // Middle east journal of scientific research. 2013. V. 17, № 8. pp. 1061-1067.
  8. Gafarov, A. A. Modeling of tillage machines working tools and the analysis of the interaction taking into account rheological properties of the soil / A. A. Gafarov, S. G. Mudarisov, I. M. Farkhutdinov // Tractors and agricultural machinery. 2009. № 5. pp. 23-27.
  9. Корниенко В. В. Математическое моделирование рельефа опорной поверхности при исследовании динамической нагруженности погрузчиков // Вестник КрасГАУ. 2010. №4. С. 162-165.
  10. Высоцкий М. С., Дубовик Д. А. Математическое моделирование криволинейного движения колесных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2008. №2. С. 6-15.
  11. Као Х. Ж., Кочнев А. Обоснование способа поворота шарнирно-сочлененных машин // Universum: технические науки, 2018, №7(52)URL: [cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-sposoba-povorota-sharnirno-sochlenennyh-mashin/](http://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-sposoba-povorota-sharnirno-sochlenennyh-mashin/).
  12. Беленький Ю.И., Валяжонков В.Д., Демидов С.А., Фам Н. Л. Вероятностно-статистическая оценка режимов трелевки леса // Вестник КрасГАУ. 2017. №11. С. 105-111.
  13. Лебков В. Ф. Аппроксимация образующей ствола и идентификация его формы функцией распределения // Лесной журнал. 2002. № 5. С. 16-24.
  14. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. Л.: Машиностроение. Ленинг. отделение, 1986. 320 с.
  15. Орлов А.И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2006. 671 с.
  16. Тюрин А. В. Закономерности в строении лесонасаждений и их использование в лесном хозяйстве // Сб. работ по лесн. хоз-ву. М.: ВНИИЛМ. 1971. № 53. С. 49–73.
-



17. Зиганшин Р. А. Изменчивость диаметра деревьев в древостоях Прибайкалья // Структура и рост древостоев Сибири. Красноярск, 1993. С. 87–94.
18. Ковалев Н. В., Беляева Н. В., Данилов Д. А. Влияние рубок ухода на рост и товарную структуру смешанных древостоев сосны и ели кисличного типа леса // Лесотехнический журнал. 2014. №2(14). С. 31-36.
19. Данилов Д. А., Ищук Т. А. Оценка конкурентных взаимоотношений сосны и ели в смешанных древостоях черничного типа леса, пройденных рубками ухода и комплексным уходом за лесом // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 1 (17).С. 176-181.
20. Сушков Ю. А. Статистические модели систем. СПб.: изд-во СПбГУ, 2004. 80 с.
21. Герасимов Ю.Ю. Сюнев В. С. Лесосечные машины для рубок ухода: компьютерная система принятия решений. – Петрозаводск: Изд-во Петрозавод. ун-та, 1998. 235 с.
22. Ширнин Ю. А., Онучин Е. М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2003. №4. С. 66-72.

### References

1. Figovskij O. L. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321/).
  2. Borgoyakova T. G., Lozickaya E. V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763/).
  3. Tarasik V. P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh system [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk: Dizajn-PRO, 2004. 640p.
  4. Popikov P. I., Druchinin D. YU., Sherstyukov N. A. Resources and Technology (Rus), 2017, №3,pp. 1-12.
  5. Suhanov YU. V. Resources and Technology (Rus), 2010, №. 8, pp. 149-150.
  6. Sirkin A. S., Zhukov D. V. Simvolnauki (Rus), 2018, №1-2, pp. 31-33.
  7. Ranjbar, I., Rashidi M., Lehmalı H. F., Mirmoradi M., Abdolalizaden E. Middle east journal of scientific research, 2013, T. 17, № 8,pp. 1061-1067.
  8. Gafarov, A. A., Mudarisov S. G., Farkhutdinov I. M. Tractors and agricultural machinery, 2009, № 5, pp. 23-27.
-



9. Kornienko V. V. Vestnik KrasGAU (Rus), 2010, №4, pp. 162-165.
10. Vysockij M. S., Dubovik D. A. Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta (By), 2008, №2, pp. 6-15.
11. Kao H. ZH., Kochnev A. M. Universum: tekhnicheskienauki (Rus). 2018, №7 (52), URL: [cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-sposoba-povorota-sharnirno-sochlenennyh-mashin/](http://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-sposoba-povorota-sharnirno-sochlenennyh-mashin/).
12. Belen'kij YU. I., Valyazhonkov V. D., Demidov S. A., Fam N. L. VestnikKrasGAU (Rus), 2017, №11, pp. 105-111.
13. Lebkov V. F. Lesnojzhurnal (Rus), 2002, № 5, pp. 16-24.
14. Shalygin A. S., Palagin YU. I. Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniya [Application methods of statistical modeling]. Leningrad: Mashinostroenie. Leningrad. otdelenie, 1986, 320 p.
15. Orlov A. I. Prikladnaya statistika [Application statistics]. Moskva: Ehkzamen, 2006. 671p.
16. Tyurin A. V. Sbornik rabot po lesnomu hozyajstvu (Rus), 1971, № 53, pp. 49–73.
17. Ziganshin R. A. Struktura i rost drevostoev Sibiri (Rus), 1993, pp. 87–94.
18. Kovalev N. V., Belyaeva N. V., Danilov D. A. Lesotekhnicheskij zhurnal (Rus), 2014, №2(14). pp. 31-36.
19. Danilov D. A., Ishchuk T. A. Sistemy. Metody. Tekhnologii (Rus), 2013, № 1 (17). pp. 176-181.
20. Sushkov YU. A. Statisticheskie modeli system [Statistical models of systems]. Sankt-Peterburg.: SpbGU, 2004, 80 p.
21. Gerasimov YU. YU. Syunev V. S. Lesosechnye mashiny dlya rubok uhoda: komp'yuternaya Sistema prinyatiya reshenij [Felling machines for thinning: computer decision-making]. Petrozavodsk: PetrGU, 1998, 235 p.
22. Shirnin YU. A., Onuchin E. M. Izvestiya VUZov. Lesnoj zhurnal (Rus). 2003, №4, pp. 66-72.